

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОУ ВПО ТЮМЕНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

А. А. ВАКУЛИН

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

Учебное пособие

Допущено УМО вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 200500 «Метрология, стандартизация и сертификация»

Тюмень
Издательство
Тюменского государственного университета
2010

УДК 681.518.3(075.8)

ББК 3965я73

В148

А. А. Вакулин. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ: учебное пособие. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2010. 256 с.

Соответствует требованиям государственного образовательного стандарта к структуре и содержанию одноименного курса. Представлены общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле, измерительных преобразователях, средствах измерений. Большое внимание уделено методам и средствам испытаний. Подбор и изложение материала базируются на лекциях автора студентам специальности «Управление качеством» Тюменского государственного университета.

Теоретическую часть предваряет учебно-методическая, позволяющая студентам самостоятельно изучать соответствующий курс.

Предназначено для студентов специальности «Управление качеством», изучающих дисциплину «Методы и средства измерений, испытаний и контроля». Может быть использовано студентами университетов, инженерами, аспирантами и научными работниками.

Рекомендовано к печати учебно-методической комиссией физического факультета, кафедрой механики многофазных систем.

Рецензенты: **С. В. Пономарев**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем и приборов Тамбовского государственного технического университета
В. И. Пронякин, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и взаимозаменяемости Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана
Я. Б. Горелик, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института криосферы Земли СО РАН
О. В. Андреев, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой неорганической и физической химии Тюменского государственного университета

Ответственный

за выпуск: **А. В. Трофимова**, зав. отделом учебно-методического обеспечения ИДО Тюменского государственного университета

ISBN 978-5-400-00313-4

© ГОУ ВПО Тюменский государственный университет, 2010

© А. А. Вакулин, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ.....	8
Пояснительная записка.....	8
Содержание дисциплины.....	9
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТА.....	11
Календарно-тематический план работы.....	11
Методические рекомендации по отдельным видам самостоятельной работы.....	11
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, ИСПЫТАНИЯХ И КОНТРОЛЕ.....	15
§ 1. Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле. Их особенности и различия.....	15
§ 2. Измерение физических величин — основа всех направлений человеческой деятельности.....	17
§ 3. Роль измерений, испытаний и контроля в повышении качества продукции, услуг и производства.....	22
Резюме.....	28
Вопросы для самопроверки.....	28
Глава 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ИП).....	29
§ 1. Структурная схема ИП.....	29
§ 2. Классификация измерительных преобразователей.....	33
§ 3. Измерительные цепи генераторных и параметрических преобразователей.....	38
Резюме.....	43
Вопросы для самопроверки.....	43
Глава 3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ.....	44
§ 1. Определение и классификация средств измерений электрических величин.....	44
§ 2. Сигналы измерительной информации.....	47
§ 3. Измерение параметров элементов электрических цепей (L, C, R)....	52
3.1. Метод вольтметра-амперметра.....	53
3.2. Метод непосредственной оценки.....	56

3.3. Электронные омметры.....	58
3.4. Измерительные мосты постоянного тока.....	60
3.5. Измерительные мосты переменного тока.....	65
3.6. Резонансный метод измерения.....	67
3.7. Метод дискретного счета. Цифровые приборы.....	69
3.8. Измерение напряжений.....	72
3.9. Измерение частоты электромагнитных колебаний.....	79
3.10. Электронно-лучевой осциллограф.....	89
3.11. Измерение фазового сдвига.....	93
3.12. Анализ спектра сигналов.....	95
3.13. Автоматизация измерений.....	100
Резюме.....	106
Вопросы для самопроверки.....	107
Глава 4. ИСПЫТАНИЯ.....	108
§ 1. Общие сведения о современных испытаниях и их отличие от технического контроля.....	108
§ 2. Воздействующие факторы.....	115
2.1. Внешние воздействующие факторы (ВВФ).....	116
2.2. Внутренние воздействующие факторы.....	122
§ 3. Виды испытаний.....	122
§ 4. Опасные и вредные производственные факторы.....	135
§ 5. Особенности испытаний на функционирование, на безопасность и на надежность.....	139
5.1. Особенности испытаний на функционирование.....	139
5.2. Особенности испытаний на безопасность.....	141
5.3. Особенности испытаний на надежность.....	148
§ 6. Испытания на механические воздействия вибрации, ударов, линейных ускорений и акустических шумов.....	156
§ 7. Средства измерений механических воздействий.....	170
7.1. Оборудование для механических испытаний.....	170
7.2. Средства измерения вибрации и шума.....	174
7.3. Применяемое оборудование для вибродиагностики.....	187
7.4. Современное состояние технических средств анализа вибрации.....	190
§ 8. Разработка программы и методик испытаний.....	211
8.1. Программа испытаний.....	211
8.2. Методика испытаний.....	216
§ 9. Автоматизация испытаний.....	220
Резюме.....	229
Вопросы для самопроверки.....	231
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	233

ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ.....	237
Тесты для самоконтроля.....	237
Ключи к тестам для самоконтроля.....	251
Вопросы к зачету.....	252
Вопросы к экзамену.....	253
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	255

КлубОК.net

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» входит в перечень общепрофессиональных дисциплин федерального компонента и изучается студентами ряда инженерных и менеджерских специальностей высших учебных заведений после дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация», поэтому предполагается, что студенты знают основные понятия метрологии, основы теории погрешностей, методы практической обработки результатов измерений и т. п.

Структура пособия повторяет структуру требований государственного образовательного стандарта (ГОС) к содержанию курса.

Большое внимание уделено методам и средствам испытаний, занимающим по объему половину данного учебного пособия, поскольку методы и средства измерений достаточно подробно описаны в существующей многочисленной учебной литературе по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация».

В первой главе изложены общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле, обсуждаются их особенности и различия, показана роль измерений, испытаний и контроля в повышении качества продукции, услуг и производства.

Вторая глава посвящена измерительным преобразователям. Приведены их классификация, области применения некоторых типов датчиков, показаны примеры измерительных цепей.

В третьей главе, посвященной средствам измерений, приведены определение и классификация средств измерений электрических величин, дано описание сигналов измерительной информации. Здесь же обсуждаются разнообразные методы и средства измерений физических величин. В завершение главы освещаются вопросы автоматизации измерений.

Испытаниям посвящена четвертая глава. Обсуждаются современные испытания и их отличие от технического контроля, приведена классификация испытаний, показана роль воздействующих факторов при испытаниях. Здесь же описаны средства измерений важных механических воздействий — вибрации и шума, обсуждается современное состояние рынка приборов вибродиагностики. Приведено содержание основных разделов при разработке программы и методик

испытаний. В конце главы рассмотрены современные виртуальные информационно-измерительные приборы, используемые для автоматизации испытаний. Они представляют собой компьютер, оснащенный набором аппаратных и программных средств. Для наглядности описание ведется на примере ряда разработок двух фирм-конкурентов: Хьюлетт-Паккард и National Instruments.

Подбор и изложение материала базируется на лекциях автора студентам специальности «Управление качеством» Международного института управления, финансов и бизнеса Тюменского государственного университета.

Автор выражает глубокую благодарность рецензентам: доктору технических наук, профессору С. В. Пономареву, кандидату технических наук, доценту В. И. Пронякину, доктору геолого-минералогических наук, главному научному сотруднику ИКЗ СО РАН Я. Б. Горелику, доктору химических наук, профессору О. В. Андрееву за внимательное прочтение рукописи и сделанные ценные замечания.

Автор будет благодарен читателям за указание возможных неточностей и высказанные пожелания, которые просит направлять по адресу: Yakulin@sibtel.ru или avakulin@utmn.ru.

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Пояснительная записка

Дисциплина «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» входит в учебный план специальности «Управление качеством», в федеральный компонент общепрофессиональных дисциплин (ОПД. Ф). Современная подготовка квалифицированных инженеров-менеджеров должна ориентировать студентов на сопровождение новых конкурентоспособных изделий и технологий на всех этапах их жизненного цикла, поисковое решение различного рода задач в области управления качеством. Решение этих задач невозможно без достаточного уровня знаний в области методов и средств измерений, испытаний и контроля.

Целью изучения дисциплины «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» является формирование знаний современных принципов, методов и средств измерений физических величин, а также особенностей проведения измерений при испытаниях и контроле.

В результате изучения дисциплины студент должен:

— ЗНАТЬ современные методы и средства измерений, испытаний и контроля, отличия измерений от испытаний и контрольных операций, особенности разработки программ и методик испытаний;

— УМЕТЬ подбирать средства измерений, планировать и осуществлять процедуру измерения таким образом, чтобы была обеспечена требуемая точность или, по крайней мере, сведена к минимуму погрешность; оценивать поведение объекта испытаний при воздействии на него различных воздействующих факторов; в результате анализа условий эксплуатации и производства объекта испытаний правильно выбирать испытательное оборудование;

— ИМЕТЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ об автоматизации измерений и испытаний, о виртуальных приборах, о перспективах развития дисциплины как науки.

Дисциплина «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» изучается в 7 и 8-м семестрах.

Для изучения курса необходимы знания и представления, формируемые по естественным дисциплинам, таким, как физика и математика, а также знания, полученные при изучении дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация».

Основной материал изучается студентами самостоятельно. На очной сессии студентам прочитываются лекции по основным разделам дисциплины. Содержание тем обсуждается на практических занятиях. Изучение дисциплины заканчивается сдачей экзамена.

Содержание дисциплины

Тематический план

№	Название темы	Объем				Уровень усвоения
		Всего	Лекции	Семинары	Самост. работа	
1	Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле	22	2	0	20	высокий
2	Измерительные преобразователи	22	2	0	20	высокий
3	Средства измерений	62	4	8	50	креативный
4	Испытания	110	8	4	98	креативный
Итого		216	16	12	188	

Содержание лекционного курса

Глава 1. Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле

Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле. Основные определения. Особенности и различия измерений, испытаний и контроля. Измерение физических величин — основа всех направлений человеческой деятельности. Роль измерений, испытаний и контроля в повышении качества продукции, услуг и производства.

Глава 2. Измерительные преобразователи (ИП)

Структурная схема ИП. Классификация измерительных преобразователей. Измерительные цепи генераторных и параметрических преобразователей.

Глава 3. Средства измерений

Определение и классификация средств измерений электрических величин. Сигналы измерительной информации. Метод вольтметра-амперметра. Метод непосредственной оценки. Электронные омметры. Измерительные мосты постоянного тока. Измерительные мосты переменного тока. Резонансный метод измерения. Метод дискретного счета. Цифровые приборы. Измерение напряжений. Измерение частоты электромагнитных колебаний. Электронно-лучевой осциллограф. Измерение фазового сдвига. Анализ спектра сигналов. Автоматизация измерений.

Глава 4. Испытания

Общие сведения о современных испытаниях и их отличие от технического контроля. Воздействующие факторы. Механические ВВФ. Климатические ВВФ. Биологические ВВФ. ВВФ специальных сред. Термические ВВФ. ВВФ электромагнитных полей. Виды испытаний. Опасные и вредные производственные факторы. Особенности испытаний на функционирование, на безопасность и надежность. Испытания на механические воздействия вибрации, ударов, линейных ускорений и акустических шумов. Средства измерений механических воздействий. Оборудование для механических испытаний. Средства измерения вибрации и шума. Применяемое оборудование для вибродиагностики. Современное состояние технических средств анализа вибрации. Разработка программы и методик испытаний. Программа испытаний. Методика испытаний. Автоматизация испытаний.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТА

Календарно-тематический план работы

№ п/п	Название темы	Время, отводимое на изучение	Виды учебной работы; время, рекомендуемое на выполнение	Форма контроля	Срок выполнения	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле	22	Самост. изучение теории вопроса	19		Согласно учебному плану
			Ответы на вопросы самопроверки	1		
2.	Измерительные преобразователи	22	Самост. изучение теории вопроса	19		Согласно учебному плану
			Ответы на вопросы самопроверки	1		
3.	Средства измерений	62	Самост. изучение теории вопроса	46	Контрольная работа	Согласно учебному плану
			Ответы на вопросы самопроверки	4		
4.	Испытания	110	Самост. изучение теории вопроса	94		Согласно учебному плану
			Ответы на вопросы самопроверки	4		
Экзамен		В форме электронного тестирования				

Методические рекомендации по отдельным видам самостоятельной работы

Всего для изучения дисциплины отводится 216 часов, из них для самостоятельной работы студента — 100 часов. Дисциплина состоит из 4 тем. Каждая глава учебного пособия написана так, что ее содержание может быть изучено как отдельно выделенная тема.

Изучение любой темы следует начинать с прочтения основного текста. После каждой темы имеются вопросы для самопроверки. Ответ на каждый из вопросов имеется в тексте учебного пособия. Нахождение ответов на вопросы самоконтроля — лучший способ усвоения материала. Если книга находится в вашем личном распоряжении, остро отточенным простым карандашом осторожно отмечайте на полях ответы. Попытайтесь решить большую часть тестовых заданий по изучаемой теме.

При изучении дисциплины «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» формируются как знания, так и умения работать с источниками учебной, технической, рекламной и нормативной информации.

Указания по выполнению контрольной работы

Контрольная работа выполняется в виде реферата по выбранной студентом теме. **Написание реферата** является важной составной частью изучения дисциплины. Реферат выполняется каждым студентом самостоятельно и оформляется на электронном носителе. Наиболее удобный вариант — запись на лазерном диске или другом электронном носителе. Форма представления уточняется у преподавателя. Реферат оформляется также на бумажном носителе.

Темы рефератов относятся к третьей главе пособия «Средства измерений». Содержание данной главы крайне важно при изучении курса, а также в профессиональной деятельности выпускника.

Как выбрать тему реферата? Следует выбирать ту тему, которая наиболее близка к настоящей или предполагаемой в будущем профессиональной деятельности.

Что представляет собой реферат? Реферат является обобщением новой информации по теме.

Он состоит из титульного листа, оглавления, краткого введения, содержательной части, выводов, списка использованных источников информации. Объем строго не регламентирован. Главное — качество изложенного материала в содержательной части. В большинстве случаев объем реферата составляет один печатный лист (1 печатный лист равен 16 страницам 14 кегля, с полуторным интервалом). Желательно сделать реферат наглядным и поместить в него иллюстрации (фотографии, рисунки, схемы). При написании необходимо

собрать информацию как из литературных источников, так и из материалов рекламного характера в результате посещения специализированных выставок. Ссылки на источники следует указать в библиографии.

Где собирать информацию для написания реферата? Прежде всего, следует посетить специализированную выставку, где демонстрируются средства измерений. Например, ежегодно в г. Тюмени в сентябре проводится выставка «Нефть и газ. Топливо-энергетический комплекс», а в марте-апреле выставка, посвященная энергетическому и газовому оборудованию. На этих выставках обычно представлено много экспонатов по теме реферата. Можно использовать материал, расположенный в сети Internet.

Многие фирмы размещают в Internet подробные сведения о выпускаемой продукции, в том числе по средствам измерений. В Internet много тематических подборок, можно найти электронные варианты курсов лекций, монографий, журнальных статей по теме реферата.

Можно ли использовать работы по теме реферата, скаченные из Internet?

Использовать соответствующие материалы можно. Но ваша авторская работа должна отличаться от реферата, имеющегося в Сети. Копирование же последнего трактуется как плагиат.

Нужно ли литературно перерабатывать собранную информацию? Нет никакой необходимости заново переписывать кем-то уже написанные тексты, тем более, если это текст из книги или рекламной продукции.

Оригинальным, написанным вами, должно быть введение, которое, как правило, состоит из нескольких предложений и в нем необходимо пояснить, в чем актуальность выбранной темы. В содержательной части необходимо обобщить информацию, представить ее в виде двух или трех выводов и сформулировать предложения по использованию информации, представленной в реферате.

Можно ли изменить формулировку темы реферата, после того как материал уже собран?

Безусловно, можно корректировать тему реферата и назвать ее так, чтобы название наиболее точно отражало содержательную часть собранной информации.

Указания к промежуточной и итоговой аттестации с применением балльно-рейтинговой системы оценки знаний

Программой предусмотрен экзамен по дисциплине «Методы и средства измерений, испытаний и контроля». Вопросы экзамена совпадают с требованиями государственного образовательного стандарта. В данном пособии также представлены 56 тестовых заданий по всем 4 главам и билеты к экзамену. По существу все вопросы, которые будут содержаться в тестовых заданиях экзамена, заранее известны и освещены в книге.

Каждому студенту интересна оценка, которую он получит на экзамене. В настоящее время для оценки знаний студентов активно используется многобалльная система. Максимально набранная сумма равна 100 баллам. Оценка результатов изучения дисциплины в зачетке формируется из оценок трех составляющих: реферата, активного участия в работе сессии, электронного тестирования и (или) экзамена. По значимости реферат оценен в 30 баллов, экзамен — в 40. Работа во время сессии включает посещение лекций и семинарских занятий, сдачу текущих тестовых заданий и максимально оценена в 30 баллов.

На экзамене студентам предлагается ответить на 40 тестов, каждый из которых оценивается в 1 балл. Количество тестов формируется из принципа избыточности заданий. Всегда найдется какое-то количество тестов, правильные ответы на которые вы сможете дать из имеющихся и приобретенных знаний. Продолжительность экзамена — один астрономический час, равный 60 минутам. Для того чтобы прочитать тестовое задание из одного предложения и 4 вариантов ответов, отводится 40-60 секунд; столько же времени требуется, чтобы подумать и поставить галочку напротив того ответа, который на ваш взгляд является правильным.

В зачетную книжку оценка отлично ставится, если по всем видам заданий набрано 80 и более баллов, хорошо — 69-79 баллов, удовлетворительно — 60-69 баллов.

Допустим, за реферат получено 30 баллов. Если на экзамене вы правильно ответите больше чем на половину вопросов, допустим на 23 вопроса из 40, то будет набрано 23 балла. Вы посетили на сессии все лекции и практические занятия, отвечали на текущие вопросы и тесты и набрали за сессию 30 баллов. Общая сумма баллов составит 83, и вы получите оценку отлично.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, ИСПЫТАНИЯХ И КОНТРОЛЕ

§ 1. Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле. Их особенности и различия

В процессе познавательной деятельности человека возникает множество задач, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объектов материального мира. Этим объектом может быть изделие, процесс, явление или вещество. Основным способом получения такой информации являются измерения. Если правильно организовать и выполнить их, то можно получить результат, который с большей или меньшей точностью отражает интересующие нас свойства объекта познания. Что же такое измерение? Согласно ГОСТ 16263-70, *измерение* — это нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью специальных технических средств. Существует техническая наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности — *метрология*. В настоящее время имеется разнообразная учебная литература по этой дисциплине (см. список литературы в конце данной книги).

Наряду с измерением различают понятия «испытание» и «контроль».

В соответствии с ГОСТ 16504-81, *испытанием* называется экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий.

Экспериментальное определение характеристик свойств объекта при испытаниях может проводиться путем использования измерений, анализов, диагностирования, органолептических методов, путем регистрации определенных событий при испытаниях (отказы, повреждения) и т. д.

Характеристики свойств объекта при испытаниях могут оцениваться, если задачей испытаний является получение количественных

или качественных оценок, а могут контролироваться, если задачей испытаний является только установление соответствия характеристик объекта заданным требованиям. В этом случае испытания сводятся к контролю. Поэтому ряд видов испытаний являются контрольными.

Важнейшим признаком любых испытаний является принятие на основе их результатов определенных решений.

Другим признаком испытаний является задание определенных условий испытаний (реальных или моделируемых), под которыми понимается совокупность воздействий на объект и режимов функционирования объекта.

Определение характеристик объекта при испытаниях может производиться как при функционировании объекта, так и при отсутствии функционирования, при наличии воздействий, до или после их приложения.

Дадим определение понятию «контроль». *Контроль* — это процесс определения соответствия значения параметра изделия установленным требованиям или нормам.

Между измерением и испытанием существует большое сходство: во-первых, результаты обеих операций выражаются в виде чисел; во-вторых, погрешности и в том, и в другом случае могут быть выражены как разности между результатами измерений (испытаний) и истинными значениями измеряемой величины (или определяемой характеристики при номинальных условиях эксплуатации). Однако между этими операциями имеется и значительная разница: погрешность измерения является только одной из составляющих погрешности испытания. Поэтому можно сказать, что испытание — это более объемная операция, чем измерение. Измерение можно считать частным случаем испытания, при котором условия испытаний не представляют интереса.

Испытания продукции и ее составных частей занимают важное место в процессе управления качеством продукции на производстве. Развитие системы сертификации продукции, подтверждающей не только показатели ее качества, но и безопасность для окружающей среды, жизни, здоровья потребителя, определяет место испытаниям не только в сфере производства, но и на протяжении всего жизненного цикла изделия, начиная от его проектирования и кончая утилизацией.

Измерения и контроль также тесно связаны друг с другом, близки по своей информационной сущности и содержат ряд общих операций (например, сравнение, измерительное преобразование). В то же время эти процедуры во многом различаются, а именно: результатом измерения является количественная характеристика, а контроля — качественная (логическое заключение типа «годен» — «не годен» и т. п.); измерение осуществляется в широком диапазоне значений измеряемой величины, а контроль — обычно в пределах небольшого числа возможных значений; контрольные приборы, в отличие от измерительных, применимы для проверки состояния изделий, параметры которых заданы и изменяются в узких пределах; основной характеристикой качества процедуры измерения является точность, а процедуры контроля — достоверность.

§ 2. Измерение физических величин — основа всех направлений человеческой деятельности

Прежде чем обсуждать особенности измерения физических величин, определим само понятие «физическая величина».

Бесконечное множество физических объектов обладает бесконечным множеством различных качеств и свойств. Для количественного описания разных свойств вводится понятие величины. Если мы в состоянии установить единицу данного свойства и физически реализовать ее в виде меры или шкалы, то, сопоставив размер интересующего нас свойства объекта с такой мерой или со шкалой, мы получим количественную оценку свойства в виде величины. Величины делятся на два вида — реальные и идеальные. Реальные величины делятся на физические и нефизические, а идеальные относятся к математике и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий. Физическая величина в общем случае может быть определена как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных и технических науках. К нефизическим относятся величины, присущие общественным (нефизическим) наукам — философии, социологии и т. п. Физические величины разделяют на измеряемые и оцениваемые, а нефизические бывают только оцениваемыми. В стандарте на термины и определения в области метрологии ГОСТ 16263-70 *физическая величина* определена как свойство, общее в качественном отноше-

нии для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них.

Качественная сторона понятия «физическая величина» определяет «род» величины (длина, как характеристика протяженности вообще; электрическое сопротивление, как общее свойство проводников электричества и т. п.), а количественная — ее «размер» (длина конкретного предмета, сопротивление конкретного проводника). Размер физической величины существует объективно, независимо от того, знаем мы его или не знаем.

Целью измерения и его конечным результатом является нахождение значения физической величины. Значение физической величины — оценка физической величины в принятых для измерения данной величины единицах. Понятно, что числовое значение результата измерения будет зависеть от выбора единицы физической величины. Например, если напряжение электрической сети измерять в вольтах, то оно будет равно 220 В, а если это же напряжение измерять в киловольтах, то числовое значение напряжения будет равно 0,22 кВ.

Как известно из метрологии, измерять можно только физические величины, т. е. величины, для которых может существовать физически реализуемая и воспроизводимая единица величины. Однако нередко к измерениям неправомерно относят различного рода *оценивания* таких свойств, которые формально хотя и подпадают под приведенное выше определение физической величины, но не позволяют реализовать соответствующую единицу. Так, широко распространенную в психологии оценку умственного развития человека называют измерением интеллекта; оценку качества продукции — измерением качества. И хотя в этих процедурах частично используются метрологические идеи и методы, они не могут квалифицироваться как измерения в том смысле, как это принято в метрологии: невозможно себе представить единицу интеллекта или единицу качества, которые к тому же можно было бы реализовать в виде определенной физической меры. Таким образом, в дополнение к приведенному определению физической величины, подчеркнем, что возможность физической реализации единицы является определяющим признаком понятия «физическая величина».

Приведем еще ряд терминов, относящихся к понятию «физическая величина». В теории измерений вводятся понятия *истинного*, *действительного* и *измеренного* значения физической величины.

Стандарт определяет истинное значение как значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Одним из постулатов метрологии является положение о том, что истинное значение физической величины существует, однако определить его путем измерения невозможно.

В обычном представлении под истинным значением понимается значение физической величины, отражающее свойство объекта абсолютно адекватно. Однако измерение как процесс познания количественных определенностей материального мира не должно абстрагироваться от физической природы изучаемых свойств и обязано учитывать качественные границы, внутри которых те или иные определения имеют смысл. Действительно, рассмотрим пример измерения диаметра круглого стержня. Казалось бы, измерение диаметра можно проводить со все более и более высокой точностью, стоит лишь выбрать соответствующие по точности средства измерений. Но когда погрешность средства измерения станет порядка размеров молекулы, мы обнаружим, что наблюдается как бы размывание края стержня в месте измерения, обусловленное хаотическим движением молекул. То есть, начиная с какого-то предела точности средства измерений, само понятие диаметра теряет свой первоначальный смысл, и дальнейшее повышение точности измерения бесполезно. Очевидно, что понятие «истинного» значения диаметра в этом случае приобретает совсем иной, вероятностный, смысл и можно лишь с определенной вероятностью установить интервал значений, в котором находится искомое значение. Следовательно, приведенное в стандарте определение истинного значения может быть применено лишь для объектов макромира.

Поскольку истинное значение физической величины определить невозможно, в практике измерений оперируют понятием действительного значения. *Действительное значение* — значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него. Под *измеренным* понимается значение величины, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерения.

Измеряемая физическая величина — физическая величина, подлежащая измерению в соответствии с поставленной измерительной задачей.

Влияющая физическая величина — физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или на объект измерения таким образом, что это приводит к искажению результата измерения. Так, например, при измерении сопротивления резистора влияющей величиной может быть температура, если сопротивление резистора зависит от температуры.

Физический параметр — физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины. Например, при измерении напряжения переменного тока в качестве параметров напряжения могут выступать мгновенное значение напряжения, среднее квадратическое значение и др.

Постоянная величина — физическая величина, размер которой по условиям измерительной задачи можно считать не изменяющимся за время, превышающее длительность измерения. Например, барометрическое давление воздуха в комнате при проведении лабораторных работ можно считать постоянной величиной.

Переменная величина — физическая величина, изменяющаяся по размеру в процессе измерения.

Значимость измерений в человеческой деятельности выражается в трех аспектах: философском, научном и техническом. *Философский аспект* состоит в том, что измерения являются важнейшим универсальным методом познания физических явлений и процессов. Возможность измерения обуславливается предварительным изучением заданного свойства объекта измерений, построением абстрактных моделей как самого свойства, так и его носителя — объекта измерения в целом. Поэтому место измерения определяется не среди первичных (теоретических или эмпирических) методов познания, а среди вторичных, обеспечивающих достоверность познания. С помощью вторичных познавательных процедур решаются задачи формирования данных (фиксации результатов познания). Измерение с этой точки зрения представляет собой метод кодирования сведений, получаемых с помощью различных методов познания, т. е. заключительную стадию процесса познания, связанную с регистрацией получаемой информации.

Научный аспект измерений состоит в том, что с их помощью в науке осуществляется связь теории и практики. Без измерений невозможно проверка научных гипотез и, соответственно, развитие науки.

Измерения обеспечивают получение количественной информации об объекте управления или контроля, без которой невозможно точное воспроизведение всех заданных условий технического процесса, обеспечение высокого качества изделий и эффективного управления объектом. Все это составляет *технический аспект* измерений.

Студенты инженерных специальностей высших учебных заведений, начиная уже с первого семестра, работают в лабораториях, выполняя лабораторные работы по профилю общетехнических и специальных кафедр. При этом в основе большинства лабораторных работ лежат измерения. Успешная работа студентов в лабораториях предполагает изучение методов и средств измерений и приобретение навыков измерений. При этом необходимо иметь в виду, что сегодня измерения пронизывают все сферы инженерного труда и являются основой всех направлений человеческой деятельности. Действительно, основой для принятия технических и управленческих решений при испытаниях продукции, оценивании ее технического уровня, аттестации и сертификации качества является именно измерительная информация. При этом нужно помнить, что результат любого измерения заслуживает внимания лишь при условии, что он сопровождается оценкой погрешности измерения либо дополняется сведениями, позволяющими потребителю измерительной информации оценить точность измерения самостоятельно. Важно также не только уметь выполнить измерение и оценить погрешность результата, но и так спланировать и осуществить процедуру измерения, чтобы обеспечить требуемую точность или свести погрешности к минимуму.

Говоря о точности измерений, следует заметить, что уровень точности, к которому надо стремиться, должен определяться критериями технической и экономической целесообразности. Хорошо известно, что, чтобы увеличить точность измерения вдвое, нужно затратить в несколько раз больше ресурсов на само измерение. В то же время снижение точности измерения в производстве ниже определенной нормы приводит к браку продукции. При назначении точности измерений важно также учитывать их значимость. В одних случаях недостаточная точность получаемой измерительной информации

имеет небольшое или локальное значение, в других — играет исключительно важную роль: от точности измерения могут зависеть научное открытие или жизнь и здоровье людей.

С развитием науки, техники и разработкой новых технологий измерения охватывают все новые и новые физические величины, существенно расширяются диапазоны измерений как в сторону измерения сверхмалых значений, так и в сторону очень больших значений физических величин. Непрерывно повышаются требования к точности измерений: так, с высокой точностью необходимо измерять параметры и характеристики процессов в диапазоне от инфранизких до сверхвысоких частот; геометрические размеры объектов измерения могут многократно отличаться друг от друга, например, изделия микроэлектроники, крупного машиностроения и т. д.

§ 3. Роль измерений, испытаний и контроля в повышении качества продукции, услуг и производства

Целью изучения дисциплины «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» является формирование знаний современных принципов, методов и средств измерений физических величин, а также особенностей проведения измерений при испытаниях и контроле. Попадая на производство, специалист, будучи прямо или косвенно связан с измерениями, сталкивается с обилием измерительных задач, нормативных документов общетехнического и метрологического содержания (стандарты, методические указания, инструкции и т. п.), исполнение которых обязательно, если сотрудники предприятия хотят быть конкурентоспособными. Инженеру-менеджеру совершенно необходимо знание современных методов измерений и основных принципов построения средств измерений физических величин. При этом на первое место следует поставить знание методов измерений. Это обусловлено тем, что именно методы измерений и физические принципы работы приборов являются постоянными компонентами, тогда как конкретные, например, схемные решения и элементная база изменяются и постоянно совершенствуются.

Для повышения качества продукции, услуг и производства важную роль, наряду с измерениями, играют их испытания и разнообразный контроль. Приведем некоторые термины, относящиеся к испытаниям и контролю.

Объектом испытаний являются продукция или процессы ее производства и функционирования. Главным признаком объекта является то, что по результатам его испытаний принимается то или другое решение по этому объекту — о его годности или забраковании, о возможности предъявления на следующие испытания, о возможности серийного выпуска и др.

В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектом испытаний может являться единичное изделие или партия изделий, подвергаемая сплошному или выборочному контролю, отдельный образец или партия продукции, от которой берется оговоренная нормативно-технической документацией (НТД) проба.

Объектом испытаний может быть макет или модель изделия и решение по результатам испытаний может относиться непосредственно к макету или модели. Однако, если при испытании какого-либо изделия некоторые элементы его приходится для испытаний заменить моделями или отдельные характеристики изделия определять на моделях, то объектом испытаний остается само изделие, оценку характеристик которого получают на основе испытаний модели.

Важнейшим при проведении любых испытаний является задание требуемых реальных или моделируемых условий испытаний.

Под *условиями испытаний* понимается совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. В нормативно-технических документах на испытания конкретных объектов должны быть определены нормативные условия испытаний.

К условиям испытаний относятся внешние воздействующие факторы как естественные, так и искусственно создаваемые, а также внутренние воздействия, вызываемые функционированием объекта (например, нагрев, вызываемый трением или прохождением электрического тока) и режимы функционирования объекта, способы и место его установки, монтажа, крепления, скорость перемещения и т. п.

Нормативные условия испытаний (значения воздействующих факторов, режимы функционирования) должны быть указаны в НТД на методы испытаний конкретных видов продукции. Так, например, устанавливаются нормальные климатические условия испытаний для различных видов технических изделий, нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений и т. д.

Существует большое число разновидностей испытаний. Они классифицируются по различным признакам.

По назначению испытания делятся на исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные.

По уровню проведения различают государственные, межведомственные и ведомственные испытания.

По виду этапов разработки испытываемой продукции различают предварительные и приемочные испытания.

В зависимости *от вида испытаний готовой продукции* их подразделяют на квалификационные, приемосдаточные, периодические и типовые.

Целью испытаний следует считать оценку истинного значения параметра (характеристики) в заданных номинальных условиях испытания. Реальные условия испытаний практически всегда отличаются от номинальных. Следовательно, результат испытания всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточности установления номинальных условий испытания.

Результатом испытаний называют оценку характеристик свойств объекта, установление соответствия объекта заданным требованиям, данные анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний. Результат испытаний характеризуется точностью — свойством испытаний, показывающим близость их результатов к действительным значениям характеристик объекта в определенных условиях.

Контроль — это процесс определения соответствия значения параметра изделия установленным требованиям или нормам. Сущность всякого контроля состоит в проведении двух основных этапов. На первом этапе получают информацию о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств. Эта информация называется *первичной*. На втором этапе первичная информация сопоставляется с заранее установленными требованиями, нормами, критериями. При этом выявляется соответствие или несоответствие фактических данных требуемым. Информация об их расхождении называется *вторичной*. Она используется для выработки соответствующих решений по поводу объекта контроля. В ряде случаев граница между этапами контроля неразличима. При этом первый этап может быть выражен нечетко или практически не наблюдаться. Характерным примером такого рода является контроль размера детали калибром, сводящийся к операции сопоставления фактического и предельно допустимого значений параметра.

Контроль состоит из ряда элементарных действий: измерительно-го преобразования контролируемой величины; воспроизведения установок контроля; сравнения и получения результата контроля.

Контроль может быть классифицирован по ряду признаков.

В зависимости от *числа контролируемых параметров* он подразделяется на *однопараметрический*, при котором состояние объекта определяется по размеру одного параметра, и *многопараметрический*, при котором состояние объекта определяется размерами многих параметров.

По *форме сравниваемых сигналов* контроль подразделяется на *аналоговый*, при котором сравнению подвергаются аналоговые сигналы, и *цифровой*, при котором сравниваются цифровые сигналы. В зависимости от *вида воздействия на объект* контроль подразделяется на *активный (управляющий)*, при котором воздействие на объект осуществляется посредством специального генератора тестовых сигналов, и *пассивный*, т. е. без такового воздействия. Активные средства контроля при определенном изменении контролируемой величины автоматически изменяют ход технологического процесса и обеспечивают заданную точность обработки. Пассивные средства контроля осуществляют лишь рассортировку деталей на группы в зависимости от результатов контроля.

На практике большое распространение получил так называемый *допусковый* контроль, суть которого состоит в определении путем измерения или испытания значения контролируемого параметра объекта и сравнение полученного результата с заданными граничными допустимыми значениями. Частным случаем допускового контроля является поверка средств измерений, в процессе которой исследуется попадание погрешностей средства измерений в допустимые пределы.

По *расположению зоны контролируемого состояния* различают допусковый контроль состояний:

- ниже допускаемого значения ($X < X_{н}$);
- выше допускаемого значения ($X > X_{в}$);
- между верхним и нижним допускаемыми значениями ($X_{н} < X < X_{в}$).

Результатом контроля является не число, а одно из взаимоисключающих утверждений:

- контролируемая характеристика (параметр) находится в пределах допускаемых значений, т. е. результат контроля — «годен»;

— контролируемая характеристика (параметр) находится за пределами допустимых значений, т. е. результат контроля — «негоден» или «брак».

Технический контроль (ТК) в соответствии с ГОСТ 16504-81 — это проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. Развитие науки и техники, повышение требований к качеству продукции влекут за собой рост затрат на технический контроль. Так, затраты на контроль в некоторых отраслях превышают 50% от себестоимости продукции. В металлообрабатывающей промышленности затраты на контроль составляют 8...15% затрат производства, причем 90...95% этих затрат относятся к контролю линейных размеров.

Согласно определению технического контроля для объекта контроля дается заключение о его соответствии требованиям, предъявляемым технической документацией. Оно может формулироваться либо по результатам измерений, либо без них. В случае, если контроль выполняется по показаниям средств измерения, он называется контролем показаний. Например, определение годности изделия по шкальным приборам, у которых часто предусматриваются предельные флажки (планки, метки), между которыми должен находиться параметр годного изделия.

В зависимости от места расположения элементов средства контроля различают местный и дистанционный контроль. Местный контроль применяется в случае, если все элементы установлены на рабочих местах, где изготавливается или контролируется изделие. Дистанционный контроль предусматривается в случаях, когда невозможно расположить все элементы в одном месте, например контроль показаний испытываемого двигателя на стенде. (Здесь снятие параметров двигателя выполняется датчиками в испытательном боксе, а контроль показаний осуществляется в операторском помещении).

Техническое диагностирование — процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определенной точностью (ГОСТ 20911-75). Результатом технического диагностирования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием при необходимости места, вида и причин дефекта (дефектов). Например, диагностирование двигателя автомобиля на специальных стендах, когда по показаниям преобразователей, установленных в разных узлах двигателя, дается заключение о функционировании всего двигателя с указанием отклонений от нормативных величин контролируемых параметров или их действительное значение.

Технический контроль функционирует как система, основными элементами которой являются объект, средство, метод, вид, исполнитель, условия.

Объект технического контроля — подвергаемая контролю продукция, процессы ее создания, применения, транспортирования, хранения, технического обслуживания и ремонта, а также соответствующая техническая документация. Объектами технического контроля являются предметы труда (например, продукция основного и вспомогательного производства в виде изделий, материалов и т. п.), средства труда (например, оборудование промышленных предприятий: станки, приспособления, приборы и т. п.) и технологические процессы.

Средство технического контроля — техническое устройство, вещество и (или) материал для проведения контроля. В отличие от средства измерения при техническом контроле могут применяться различные вещества или материалы для обеспечения целей контроля.

Метод технического контроля — правила применения определенных принципов и средств контроля. В метод технического контроля входят основные физические, химические, биологические и другие явления и зависимости (законы, принципы), которые применяются для получения первичной информации об объекте контроля. Кроме того, метод контроля при необходимости содержит также определенную последовательность применения этих принципов во время контроля.

Различают методы разрушающего и неразрушающего контроля.

Метод разрушающего контроля — метод, при котором может быть нарушена пригодность объекта к применению (контроль прочности детали, узла).

Метод неразрушающего контроля — метод, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта к применению.

Вид технического контроля — классификационная группировка контроля по определенному признаку (например, контроль механических величин, контроль тепловых величин, контроль качественных характеристик, автоматизированный контроль и т. п.).

Условия технического контроля — совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при техническом контроле.

Условия контроля, которые устанавливаются нормативно-технической документацией на данный вид продукции, называются *нор-*

мативными. Например, нормативные условия выполнения линейных и угловых измерений по ГОСТ 8.050-73:

- температура окружающей среды +20 °С;
- атмосферное давление 101 325 Па (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающего воздуха 58% (нормальное парциальное давление водяных паров 1333 Па);
- ускорение свободного падения (ускорение силы тяжести) -9,8 м/с²;
- направление линии и плоскости измерения линейных размеров — горизонтальное;
- относительная скорость движения внешней среды равна нулю;
- значения внешних сил, кроме силы тяжести, атмосферного давления, действия магнитного поля Земли и сил сцепления элементов измерительной системы (установки), равны нулю.

Понятия «измерение», «технический контроль», «испытание» являются взаимосвязанными. Так, измерение может быть как частью промежуточного преобразования в процессе контроля или испытания, так и окончательным этапом получения информации при контроле или испытании. В то же время испытание может являться этапом получения информации в процессе контроля.

Резюме

Понятия «измерение», «технический контроль», «испытание» являются взаимосвязанными. В то же время эти процедуры во многом различаются. Результатом измерения является количественная характеристика, а контроля — качественная; измерение осуществляется в широком диапазоне значений измеряемой величины, а контроль — обычно в пределах небольшого числа возможных значений; основной характеристикой качества измерения и испытания является точность, а процедуры контроля — достоверность. Результат испытаний всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточности установления номинальных условий испытания.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятиям «измерение», «испытание», «контроль».
2. Перечислите сходства и различия между измерением и испытанием, между измерением и контролем.

3. Дайте определение понятиям «физическая величина», «измеряемая физическая величина», «влияющая физическая величина», «физический параметр», «постоянная величина», «переменная величина».
4. Сформулируйте цель изучения дисциплины «Методы и средства измерений, испытаний и контроля».
5. Что является объектом испытаний?
6. Что понимается под условиями испытаний?
7. По каким признакам классифицируются испытания?
8. Что следует считать целью испытаний, результатом испытаний?
9. В чем заключается сущность контроля?
10. По каким признакам может быть классифицирован контроль?
11. Дайте определения допускового и технического контроля.
12. Приведите основные элементы технического контроля.
13. В чем заключается взаимосвязь понятий «измерение», «технический контроль», «испытание»?

Глава 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ИП)

§ 1. Структурная схема ИП

Среди множества физических величин большая часть относится к неэлектрическим (температура, влажность, скорость, ускорение, перемещение и т. д.). При измерениях таких величин часто возникают задачи дистанционного измерения, передачи, регистрации и обработки измерительной информации. Наилучшим образом эти задачи решаются путем преобразования измеряемой неэлектрической величины $X_{нэ}$ в электрический сигнал $X_э$, связанный с измеряемой величиной однозначной функциональной зависимостью:

$$X_э = f(X_{нэ}).$$

Полученный электрический сигнал измеряется средствами электрических измерений и (или) может быть передан по линии связи на значительное расстояние.

Преобразование неэлектрической величины в электрическую осуществляется с помощью измерительных преобразователей (ИП) — датчиков (рис. 2.1). Датчик — это устройство, которое, подвергаясь воздействию физической измеряемой величины, выдает эквивалент-

ный сигнал, обычно электрической природы (заряд, ток, напряжение и т. п.), являющийся функцией измеряемой величины. Структурная схема любого средства измерения неэлектрических величин электрическими методами содержит такой измерительный преобразователь.



Рис. 2.1. Структурная схема преобразования неэлектрических величин

Измерительный преобразователь — техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи, не подлежащий непосредственному восприятию наблюдателем. По существу ИП преобразуют один вид энергии в другой.

Информативным параметром входного сигнала считают непосредственно измеряемую величину или величину, функционально связанную с измеряемой. Неинформативный параметр не связан функционально с измеряемой величиной, но влияет на метрологические характеристики преобразователя.

Параметры, характеризующие условия, в которых работает преобразователь, и влияющие на его функцию преобразования, называют влияющими величинами. Зависимость изменения метрологических характеристик преобразователя от изменения влияющей величины или информативного параметра входного сигнала в пределах рабочих условий эксплуатации называется функцией влияния. Функция влияния может быть нормирована в виде формулы, графика или таблицы. Следует стараться выбирать датчики, показания которых возможно меньше зависят от внешних условий, поскольку обычно намного выгоднее стабилизировать внешние условия, чем проводить калибровку и дополнительные измерения влияющих величин.

Промышленностью выпускаются как отдельные измерительные преобразователи неэлектрических величин, так и приборы для измерения неэлектрических величин, неотъемлемой частью которых является соответствующий датчик.

Поскольку средства электрических измерений, применяемые при измерениях неэлектрических величин, имеют, как правило, несравненно лучшие метрологические характеристики по сравнению с датчиками неэлектрических величин, то основной вклад в погрешность результата измерения вносится составляющей, обусловленной погрешностью датчика.

Обычно датчики построены или, в худшем случае, используются таким образом, чтобы существовала линейная зависимость между малым приращением $\Delta X_э$ и $\Delta X_{нэ}$:

$$\Delta X_э = S \cdot \Delta X_{нэ},$$

где S — чувствительность датчика, мало зависящая от « $X_{нэ}$ » и от внешних воздействий.

Применяют датчики активного (генераторные), пассивного (параметрические) и комбинированного типов. Все функции активных, пассивных и комбинированных датчиков являются аналоговыми, поэтому в общем случае их сигналы тоже аналоговые.

Активные датчики на выходе выдают заряд, напряжение или ток, пропорциональные входной величине. У пассивных датчиков пропорционально входной величине меняется выходное сопротивление, индуктивность или емкость. Поэтому пассивный датчик требует обязательного включения его в схему с внешним источником питания и измерение производится косвенно, по изменению тока или напряжения. Источником электрического сигнала в этом случае является совокупность электрической схемы и пассивного датчика.

Таким образом, пассивные датчики для того, чтобы преобразовывать неэлектрическую физическую величину в электрическую нуждаются во внешнем источнике энергии, а активные — не нуждаются.

Комбинированные датчики используются для измерения некоторых неэлектрических величин, которые не удастся сразу преобразовать в электрические. В этих случаях преобразование осуществляется поэтапно с помощью двух измерительных преобразователей. На первом этапе исходную измеряемую величину преобразуют в промежуточную неэлектрическую величину, на втором — с помощью второго преобразователя ее преобразуют в выходную электрическую

величину. Совокупность этих двух преобразователей образует комбинированный датчик. Например, давление можно измерить с помощью мембраны, служащей первичным преобразователем, деформация которой преобразуется в электрическую величину датчиком, реагирующим на механические смещения. Типичная схема комбинированного датчика приведена на рис. 2.2.

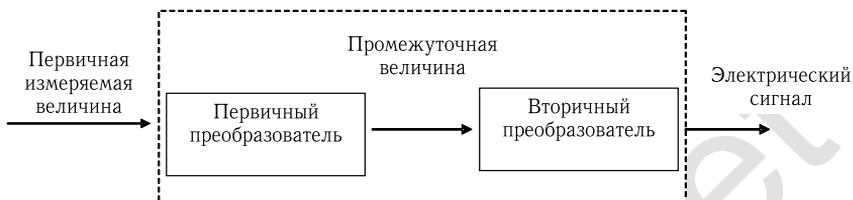


Рис. 2.2. Типичная схема комбинированного датчика

Промышленностью выпускается широкая номенклатура измерительных преобразователей, изготовленных в соответствии со своей структурной схемой. Эти схемы изучались в курсе «Метрология, стандартизация и сертификация» и мы на них подробно останавливаться не будем.

Здесь же в качестве простейшего примера приведем структурную схему индуктивного преобразователя.

Как известно, индуктивные преобразователи применяются для измерения перемещений, размеров, отклонений формы и расположения поверхностей. Преобразователь состоит из неподвижной катушки индуктивности с магнитопроводом и якоря, также являющегося частью магнитопровода, перемещающегося относительно катушки индуктивности. Для получения возможно большей индуктивности магнитопровод катушки и якорь выполняются из ферромагнитных материалов. При перемещении якоря (связанного, например, со щупом измерительного устройства) изменяется индуктивность катушки и, следовательно, — ток, протекающий в обмотке.

На рис. 2.3 приведена схема индуктивного преобразователя с переменным воздушным зазором δ , применяемого для измерения перемещений в пределах 0,01...10 мм.

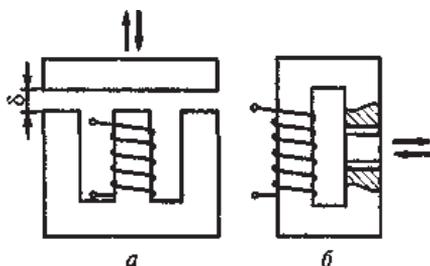


Рис. 2.3. Схема индуктивного преобразователя перемещений

§ 2. Классификация измерительных преобразователей

По назначению измерительные преобразователи делят на первичные преобразователи (датчики), унифицированные и промежуточные.

Первичный преобразователь является первым в измерительной цепи и включает в себя чувствительный элемент (зонд, мембрану) и другие необходимые элементы для преобразования входной неэлектрической величины в выходную электрическую. Датчик может состоять из одного или нескольких измерительных преобразователей, объединенных в единую конструкцию. На датчик непосредственно воздействует измеряемая неэлектрическая величина (сила, давление, уровень, температура и т. д.).

Унифицированный преобразователь состоит из датчика и схемы согласования; измеряемая физическая величина преобразуется с использованием источника энергии в нормированную выходную величину. Нормированные сигналы постоянного тока находятся в диапазоне $0... \pm 5$ мА или $0... +20$ мА. Для устройств со смещенным нулем диапазон тока сужен: $\pm 1... \pm 5$ мА или $\pm 4... \pm 20$ мА.

При необходимости регулирования, границы диапазона токовых сигналов лежат в пределах: нижняя $0... 5$ мА, верхняя $12... 25$ мА. В устройствах с нормированными токовыми сигналами допускается применение различных измерительных приборов с внутренним сопротивлением не более 1 кОм. Нормированные значения диапазонов сигналов напряжения составляют $0... 11$ В и $0... \pm 10$ В.

При использовании в качестве выходной величины частоты рекомендуемый диапазон ее изменения составляет 5...25 Гц. В пневматических системах нормировано давление газа. Оно должно находиться в диапазоне 0,02...0,1 МПа.

Промежуточный преобразователь получает сигнал измерительной информации от предшествующего преобразователя и передает после преобразования этот сигнал последующему преобразователю.

По характеру преобразования входной величины измерительные преобразователи делят на *линейные* и *нелинейные*. У линейных преобразователей функциональная зависимость между входной и выходной величинами линейная; у нелинейных — нелинейная.

По принципу действия датчики делятся на генераторные (активные) и параметрические. Выходным сигналом генераторных датчиков являются ЭДС, напряжение, ток или электрический заряд, функционально связанные с измеряемой величиной (например, ЭДС термопары). В параметрических датчиках измеряемая величина вызывает пропорциональное ей изменение параметра электрической цепи (R, L, C).

К генераторным относятся индукционные, пьезоэлектрические, термоэлектрические и некоторые разновидности электрохимических датчиков. Остальные датчики являются параметрическими.

Наиболее важные из физических эффектов, используемые в активных датчиках, приведены в табл. 2.1, а пассивных — в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Физические эффекты в активных датчиках

Измеряемая величина	Используемый физический эффект	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический эффект	Напряжение
Поток оптического излучения	Пирозлектрический эффект	Заряд Ток
	Внешний фотоэффект	
	Внутренний фотоэффект в полупроводнике с р-п-переходом Фотоэлектромагнитный эффект	Напряжение Напряжение
Сила, давление, ускорение	Пьезоэлектрический эффект	Заряд
Скорость	Электромагнитная индукция	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

Физические эффекты в пассивных датчиках

Измеряемая величина	Электрическая характеристика, изменяющаяся под действием измеряемой величины	Тип используемых материалов
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, медь, никель), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление Магнитная проницаемость	Сплавы никеля, легированный кремний Ферромагнитные сплавы
Перемещение	Сопротивление	Магниторезистивные материалы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление Диэлектрическая проницаемость	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
Уровень	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

По принципу действия измерительные преобразователи подразделяют также на типы:

- *резистивные*, в которых измеряемая величина преобразуется в изменение его сопротивления;
- *электромагнитные*, в которых измеряемая величина преобразуется в изменение индуктивности или взаимоиндуктивности;
- *емкостные*, в которых измеряемая величина преобразуется в изменение емкости;
- *пьезоэлектрические*, в которых динамическое усилие преобразуется в электрический заряд;
- *гальваномагнитные*, основанные на эффекте Холла и преобразующие действующее магнитное поле в ЭДС;
- *тепловые*, в которых измеряемая температура преобразуется в ЭДС или в величину термосопротивления;

— *оптоэлектронные*, в которых оптические сигналы преобразуются в электрические.

Для датчиков основными характеристиками являются: тип, диапазон измеряемой величины, диапазон рабочих температур и погрешность в этом диапазоне, обобщенное входное и выходное сопротивление, частотная характеристика.

Области применения датчиков чрезвычайно разнообразны благодаря внедрению новых технологий изготовления (высоковакуумное напыление, распыление, химическое осаждение из газовой фазы, фотолитография и т. д.) и появлению новых материалов.

В промышленной технике стандартные датчики используют для измерения расхода, объема, давления, температуры, уровня, химического состава.

Из стандартных датчиков все большим спросом пользуются датчики новых типов, например:

- датчики положения, перемещения и изображения;
- оптические и волоконно-оптические датчики;
- биодатчики (биотехнология);
- многокоординатные датчики (распознавание образов).

Для современных производств характерна тенденция применения датчиков в интерактивном режиме, т. е. когда результаты измерений сразу же используются для регулирования процесса. Благодаря этому в любой момент обеспечивается корректировка технологического процесса, что естественно ведет к более рациональному производству. При промышленном применении определяющим фактором является погрешность, которая при регулировании процессов должна быть не более 1...2%, а для задач контроля — 2...3%.

В робототехнике, которая в принципе представляет собой сложную информационную систему, робот обеспечивает получение, обработку и преобразование информации. При получении информации через датчики роботу требуется прежде всего способность «видеть» и «ощупывать», т. е. необходимо использование оптических и многокоординатных датчиков.

При изготовлении датчиков для автомобильной электроники все в большей мере применяют современные технологии, обеспечивающие экономичное изготовление датчиков минимальных размеров

для отдельных систем автомобиля (рулевое управление, двигатель, тормоза, электроника кузова), для обеспечения безопасности и надежности (система блокировки и противоугонная система), информационная система (расход топлива, температура, маршрут движения и т. д.). С помощью этих датчиков измеряются различные физические параметры — температура, давление, скорость вращения, ускорение, влажность, перемещение или угол, расход и т. д. Требования к этим датчикам в отношении воздействия окружающей среды достаточно высокие. В табл. 2.3 приведены области применения некоторых типов датчиков.

Таблица 2.3

Области применения некоторых типов датчиков

Тип преобразователя	Применение								
	Давление (сила)	Смещение	Положение	Скорость	Ускорение	Вибрация	Температура	Магнитный поток	Оптические измерения
Тензодатчик	•	•	•	•	•	•			
Потенциометрический	•	•	•	•	•				
Линейный дифференциальный трансформатор	•	•	•	•	•				
Переменная индуктивность		•	•	•	•	*			
Эффект Холла		•	•					•	
Вихревой ток		•	•	•					
Магнито-резистивный		•	•					•	

Емкостный датчик	•	•	•		•	•			
Пьезоэлектрический*	•	•		•	•	•			
Термометр сопротивления							•		
Термистор							•		
Термопара*							•		
Фотоэлемент									•
Фотосопротивление									•
Фотогальванический элемент*									•

* — Автогенерирующие, или активные, преобразователи.

§ 3. Измерительные цепи генераторных и параметрических преобразователей

Рассмотрим типичные измерительные цепи генераторных преобразователей на примерах измерения температуры с помощью термопары и измерения ускорения с помощью пьезоэлектрического датчика.

Принцип действия термопары приведен на рис. 2.4 а, где изображена термоэлектрическая цепь, составленная из двух разнородных проводников А и В. Точки 1 и 2 соединения проводников называются спаями термопары. Если температуры (t) спаев 1 и 2 одинаковы, то ток в термоэлектрической цепи отсутствует. Если же температура одного из спаев (например, спая 1) выше, чем температура спая 2, то в цепи возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС) E , зависящая от разности температур спаев:

$$E=f(t_1-t_2).$$

Если поддерживать температуру спая 2 постоянной, то $E=f(t_1)$

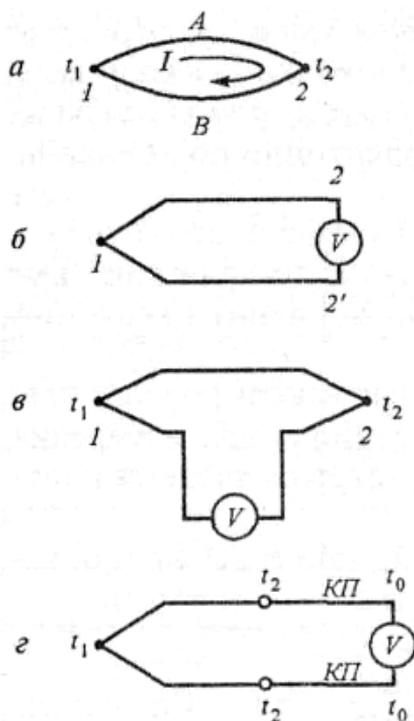


Рис. 2.4. Термоэлектрические цепи

Эту зависимость используют для измерения температуры с помощью термопар. Для измерения ТЭДС электроизмерительный прибор включают в разрыв спая 2 (рис. 2.4 б). Спай 1 называют горячим (рабочим) спаем, а спай 2 — холодным (концы — 2 и 2' называют свободными концами).

Чтобы ТЭДС термопары однозначно определялась температурой горячего спая, необходимо температуру холодного спая поддерживать всегда одинаковой.

Для изготовления электродов термопар используют как чистые металлы, так и специальные сплавы стандартизованного состава. Градуировочные таблицы для стандартных термопар составлены при условии равенства температуры свободных концов $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. На практике

не всегда удается поддерживать эту температуру. В таких случаях в показания термодатчика вводят поправку на температуру свободных концов. Существуют схемы для автоматического введения поправок.

Кроме включения измерительного прибора в спай термодатчика, возможно включение прибора «в электрод», т. е. в разрыв одного из термоэлектродов (рис. 2.4 в). Такое включение позволяет измерять разность температур ($t_1 - t_2$). Например, может быть измерен перегрев обмоток трансформатора над температурой окружающей среды при его испытаниях. Для этого рабочий спай термодатчика заделывают в обмотку, а свободный спай оставляют при температуре окружающей среды.

Требование постоянства температуры свободных концов термодатчика вынуждает по возможности удалять их от места измерения. Для этой цели применяют так называемые удлиняющие или компенсационные провода (КП), подключаемые к свободным концам термодатчика с соблюдением полярности (рис. 2.4 г). Компенсационные провода состоят из разнородных проводников, которые в интервале возможных колебаний температуры свободных концов развивают в паре между собой такую же ТЭДС, как и термодатчик. Поэтому, если места подключения компенсационных проводов находятся при температуре t_2 , а температура в месте подключения термодатчика к прибору t_0 , то ТЭДС термодатчика будет соответствовать ее градуировке при температуре свободных концов t_0 .

Максимальная развиваемая стандартными термодатчиками ТЭДС составляет от единиц до десятков милливольт.

Для измерения ТЭДС могут применяться магнитоэлектрические, электронные (аналоговые и цифровые) милливольтметры и потенциометры постоянного тока. При использовании милливольтметров магнитоэлектрической системы следует иметь в виду, что измеряемое милливольтметром напряжение на его зажимах:

$$U = I \cdot R_B,$$

где I — ток в цепи термодатчика, а R_B — сопротивление милливольтметра. Так как источником тока в цепи является термодатчик, то

$$I = E / (R_B + R_{вн}),$$

где $R_{вн}$ — сопротивление участка цепи внешнего по отношению к милливольтметру (т. е. электродов термодатчика и компенсационных

проводов). Поэтому измеряемое милливольтметром напряжение будет равно:

$$U = E / (1 + R_{вн} / R_{в}).$$

Таким образом, показания милливольтметра тем больше отличаются от ЭДС термопары, чем больше отношение $R_{вн} / R_{в}$. Для уменьшения погрешности от влияния внешнего сопротивления милливольтметры, предназначенные для работы с термопарами (так называемые пирометрические милливольтметры) градуируются для конкретного типа термопар и при определенном номинальном значении $R_{вн}$, указываемом на шкале прибора. Пирометрические милливольтметры серийно выпускаются классов точности от 0,5 до 2,0.

Входное сопротивление электронных милливольтметров очень велико, и влияние сопротивления $R_{вн}$ на показания пренебрежимо мало.

Электродвижущая сила, возникающая на электродах пьезоэлектрического преобразователя, довольно значительна — единицы вольт. Однако, если сила, приложенная к преобразователю постоянна, то измерить ЭДС трудно, поскольку заряд мал и быстро стекает через входное сопротивление вольтметра. Если же сила переменна и при этом период изменения силы много меньше постоянной времени разряда, определяемой емкостью преобразователя и сопротивлением утечки, то процесс утечки почти не влияет на выходное напряжение преобразователя. При изменении силы (F) по закону

$$F = F_m \cdot \sin(\omega t).$$

ЭДС также изменяется синусоидально.

Таким образом, измерение неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в переменную силу, действующую на пьезоэлектрический преобразователь, сводится к измерению переменного напряжения или ЭДС.

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи находят широкое применение для измерения параметров движения: линейного и вибрационного ускорения, удара, акустических сигналов.

Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя представлена на рис. 2.5 а в виде генератора с внутренней емкостью (C).

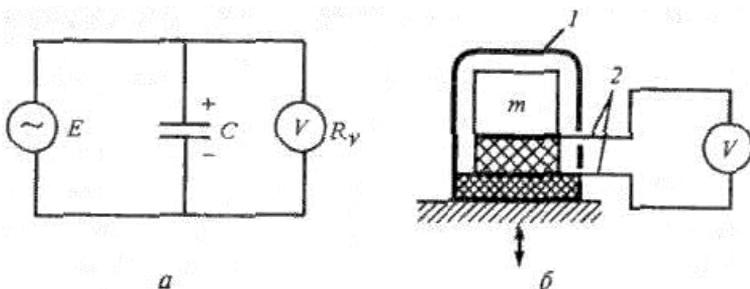


Рис. 2.5. Схема и устройство пьезоэлектрического датчика

Поскольку мощность такого пьезоэлемента чрезвычайно мала, то для измерения выходного напряжения необходимо применять приборы с большим входным сопротивлением ($10^{11} \dots 10^{15}$ Ом).

Для увеличения полезного сигнала пьезодатчики выполняются из нескольких, последовательно соединенных пьезоэлементов.

Устройство пьезоэлектрического датчика для измерения вибрационного ускорения показано на рис. 2.5 б. Пьезоэлемент (обычно из пьезокерамики), нагруженный известной массой (m), помещен в корпус 1 и через выводы 2 включен в цепь электронного милливольтметра (V).

В отличие от рассмотренных выше активных датчиков пассивные датчики включаются в специальную электрическую схему, содержащую источник питания и схему формирования сигнала. Наиболее часто используют потенциметрическую и мостовую измерительные схемы, а также колебательный контур и операционный усилитель. Потенциметрическая схема содержит источник напряжения и датчик — потенциометр, которые соединены параллельно. В мостовой схеме изменение сопротивления датчика под действием измеряемой физической величины характеризуется разбалансом соответствующего моста (Уитстона, Саути, Максвелла, Гэя и т. д.).

Резонансный колебательный контур является частью генератора колебаний и определяет его частоту. Когда индуктивный или емкостной датчик является элементом этого контура, вариации его реактивного сопротивления вызывают соответствующие изменения частоты колебаний. Операционный усилитель используют для обработки вы-

ходного сигнала, представляющего собой разность двух сигналов измерительной схемы. В зависимости от величины этой разницы меняется коэффициент усиления операционного усилителя.

От выбора схемы формирования сигнала зависят основные метрологические характеристики средств измерений — погрешность, чувствительность, линейность и т. п.

Резюме

Большинство физических величин относится к неэлектрическим. Преобразование неэлектрической величины в электрическую осуществляется с помощью измерительных преобразователей — датчиков.

По существу, измерительный преобразователь преобразует один вид энергии в другой, а его выходной сигнал недоступен непосредственному восприятию.

Применяют датчики активного (генераторные), пассивного (параметрические) и комбинированного типов. Все функции активных, пассивных и комбинированных датчиков являются аналоговыми, поэтому, в общем случае, их сигналы тоже аналоговые.

При построении датчиков используются определенные физические эффекты.

Области применения датчиков чрезвычайно разнообразны и непрерывно расширяются благодаря внедрению новых технологий изготовления и использованию новых материалов.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение измерительного преобразователя.
2. Почему стараются выбирать датчики, показания которых возможно меньше зависят от внешних условий?
3. Дайте определения активных и пассивных датчиков.
4. В каком случае используются комбинированные датчики?
5. Приведите классификацию измерительных преобразователей.
6. Какие основные физические эффекты положены в основу работы активных датчиков?
7. На какие типы по принципу действия подразделяются измерительные преобразователи?
8. Перечислите области применения датчиков в промышленной технике, робототехнике, автомобильной электронике.

9. Нарисуйте типичные измерительные цепи измерения температуры термопарой.
10. Для измерения каких физических величин применяют пьезоэлектрические измерительные преобразователи и почему?

Глава 3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

§ 1. Определение и классификация средств измерений электрических величин

Средством измерений (СИ) называют техническое средство, используемое при измерениях, воспроизводящее или хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени, и имеющее нормированные метрологические характеристики, т. е. характеристики, влияющие на результаты и на точность измерений.

По конструктивному исполнению и форме представления измерительной информации средства измерений представляют собой:

- *эталон единицы величины* — техническое средство, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины;
- *измерительный преобразователь (ИП)* — средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в форму, целесообразную для передачи, обработки или хранения. ИП — структурный элемент более сложных средств измерений. Измерительная информация на выходе ИП, как правило, недоступна для непосредственного восприятия наблюдателем;
- *меру* — средство измерений, предназначенное для воспроизведения одного или нескольких фиксированных значений физической величины (мера массы — гиря, мера индуктивности — образцовая катушка индуктивности, многозначная мера индуктивности — магазин индуктивностей);
- *измерительный прибор* — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. В зависимости от формы представления информации различают аналоговые и цифровые измерительные приборы. Аналоговым называют измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией

измеряемой величины, например, стрелочный вольтметр, ртутно-стеклянный термометр. В цифровом приборе осуществляется преобразование аналогового сигнала измерительной информации в цифровой код, и результат измерения отражается на цифровом табло;

- *измерительную установку* — совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем и расположенная в одном месте;

- *измерительную систему* — совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в системах управления, контроля, диагностирования и т. п.

В последнее время получают распространение приборы, состоящие из персонального компьютера, дополненного платой сбора данных, содержащей АЦП и образцовые меры. Плата обеспечивает преобразование аналогового измерительного сигнала в цифровой, функции его обработки выполняет компьютер. Для наглядного отображения информации и удобства управления процессом измерений на экране монитора воспроизводят лицевую панель измерительного прибора со всеми элементами настройки, управление которыми производят при помощи клавиатуры и «мышь». Такие приборы называют «виртуальными». Они являются, по существу, *измерительно-вычислительными комплексами (ИВК)*. ИВК — это функционально объединенная совокупность средств измерений, компьютеров и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения конкретной измерительной задачи. Основными признаками принадлежности средства измерений к ИВК являются наличие процессора или компьютера; программное управление средствами измерений; наличие нормированных метрологических характеристик; блочно-модульная структура, состоящая из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

Средства измерений, используемые в различных областях науки и техники, чрезвычайно многообразны. Однако для этого множества можно выделить некоторые общие признаки, присущие всем СИ независимо от области применения. Эти признаки положены в основу различных классификаций СИ.

По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, СИ делятся:

- на метрологические, предназначенные для метрологических целей — воспроизведения единицы и (или) ее хранения или передачи размера единицы рабочим СИ;
- рабочие, применяемые для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Подавляющее большинство используемых на практике СИ принадлежат ко второй группе. Метрологические средства измерений весьма немногочисленны. Они разрабатываются, производятся и эксплуатируются в специализированных научно-исследовательских центрах.

По уровню автоматизации все СИ делятся на три группы:

- неавтоматические;
- автоматизированные, производящие в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции;
- автоматические, производящие в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей данных или выработкой управляющих сигналов.

В настоящее время все большее распространение получают автоматизированные и автоматические СИ. Это связано с широким использованием в СИ электронной и микропроцессорной техники.

По уровню стандартизации средства измерений подразделяются:

- на стандартизованные, изготовленные в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта;
- нестандартизованные (уникальные), предназначенные для решения специальной измерительной задачи, в стандартизации требований к которым нет необходимости.

В основном СИ являются стандартизованными. Они серийно выпускаются промышленными предприятиями и в обязательном порядке подвергаются государственным испытаниям. Нестандартизованные средства измерений разрабатываются специализированными научно-исследовательскими организациями и выпускаются единичными экземплярами. Они не проходят государственных испытаний, их характеристики определяются при метрологической аттестации.

По отношению к измеряемой физической величине средства измерений делятся:

- на основные — это СИ той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей;

- вспомогательные — это СИ той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерения необходимо учесть для получения результатов измерения требуемой точности.

Основной классификацией является классификация *по роли в процессе измерения и выполняемым функциям*. Она представлена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Классификация средств измерений по их роли в процессе измерения и выполняемым функциям

§ 2. Сигналы измерительной информации

В средствах измерений передача, хранение и отображение информации о значениях измеряемых величин осуществляется с помощью сигналов, которые называются сигналами измерительной информации. Сигнал как материальный носитель информации представляет некоторый физический процесс, один из параметров которого функционально связан с измеряемой величиной. Такой параметр называют информативным.

Остальные параметры сигнала называют неинформативными. В электрических средствах измерений наиболее часто применяют электрические сигналы, информативными параметрами которых могут быть мгновенные значения постоянных токов и напряжений, амплитудные, средневыпрямленные или действующие значения синусоидальных токов и напряжений, а также их частота или фаза и др.

При прохождении сигналов в средствах измерений они могут преобразовываться из одного вида в другой, более удобный для последующей передачи, хранения, обработки или восприятия оператором. Для иллюстрации таких преобразований на рис. 3.2 приведены сигналы измерительной информации и структурная схема прибора, предназначенного для измерения температуры.

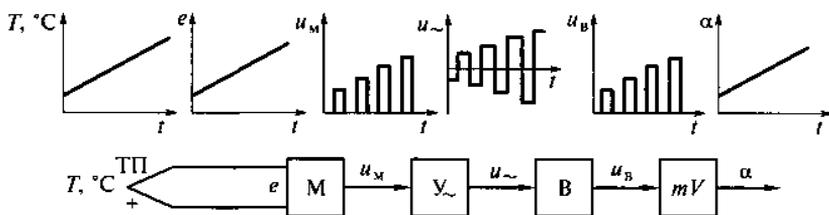


Рис. 3.2. Сигналы измерительной информации в приборе для измерения температуры

На выходе термопары (ТП) возникает сигнал измерительной информации — термоЭДС, обозначенная на рис. 3.2 буквой «е», которая зависит от измеряемой температуры (T , °C). Этот сигнал преобразуется модулятором (M) в прямоугольные импульсы напряжения (u_m), амплитуда которых пропорциональна термоЭДС. Переменная составляющая сигнала u_m усиливается усилителем ($У_{\sim}$) переменного тока и преобразуется в однополярные импульсы (u_B) выпрямителем (B). Выходной сигнал выпрямителя подается на милливольтметр (mV), вызывая отклонение его указателя на некоторый угол α .

В данной схеме (рис. 3.2) сигналы e , u_m , u_{\sim} , u_B — сигналы измерительной информации. Измеряемую величину — в рассматриваемом примере температуру — часто называют входным сигналом для первичного измерительного преобразователя. Необходимым условием любых преобразований сигналов в средствах измерений является реализация определенной (часто функциональной) зависи-

мости между информативными параметрами сигналов y и измеряемой величиной x . В средствах измерений это условие выполняется с некоторой точностью, обусловленной погрешностями преобразования звеньев и действием помех.

Применение того или иного вида сигнала зависит от многих факторов: используемых принципов преобразования измеряемых величин в электрический сигнал для первичных измерительных преобразователей, требуемой точности и помехоустойчивости передачи измерительной информации, скорости изменения измеряемых величин и т. д. Существует множество различных видов сигналов. Важным классификационным признаком сигналов является характер их изменения во времени и по уровню. По этому признаку различают непрерывные (или аналоговые) и дискретные сигналы. Дискретные по уровню сигналы называют также *квантованными*.

Рассмотрим основные виды сигналов, используемых в средствах измерений (рис. 3.3).

Непрерывные (аналоговые) по информативному параметру и времени сигналы. Непрерывные сигналы определены в любой момент времени существования сигнала и могут принимать любые значения в диапазоне его изменения. В качестве таких сигналов нашли применение постоянные и гармонические токи и напряжения. Для постоянных токов (i) и напряжений (u) информативными параметрами являются их мгновенные значения, функционально связанные с измеряемой величиной x (рис. 3.3 а). На рис. 3.3 б изображен непрерывный сигнал y (ток — i или напряжение — u), связанный линейной зависимостью с измеряемой величиной x ,

$$y = k \cdot x,$$

где k — коэффициент преобразования.

В гармонических сигналах информативными параметрами могут быть амплитуда (Y_m), угловая частота (ω) или фаза (φ). Изменение информативного параметра гармонического сигнала в соответствии с изменением измеряемой величины x называют модуляцией этого сигнала. Если с изменением x в гармоническом сигнале меняется один из параметров (Y_m , ω или φ), то говорят, что осуществляется соответственно амплитудная — АМ (рис. 3.3 в), частотная — ЧМ (рис. 3.3 г) или фазовая — ФМ (рис. 3.3 д) модуляция. При фазовой модуляции фаза сигнала определяется относительно второго (опорного) гармонического сигнала y_0 .

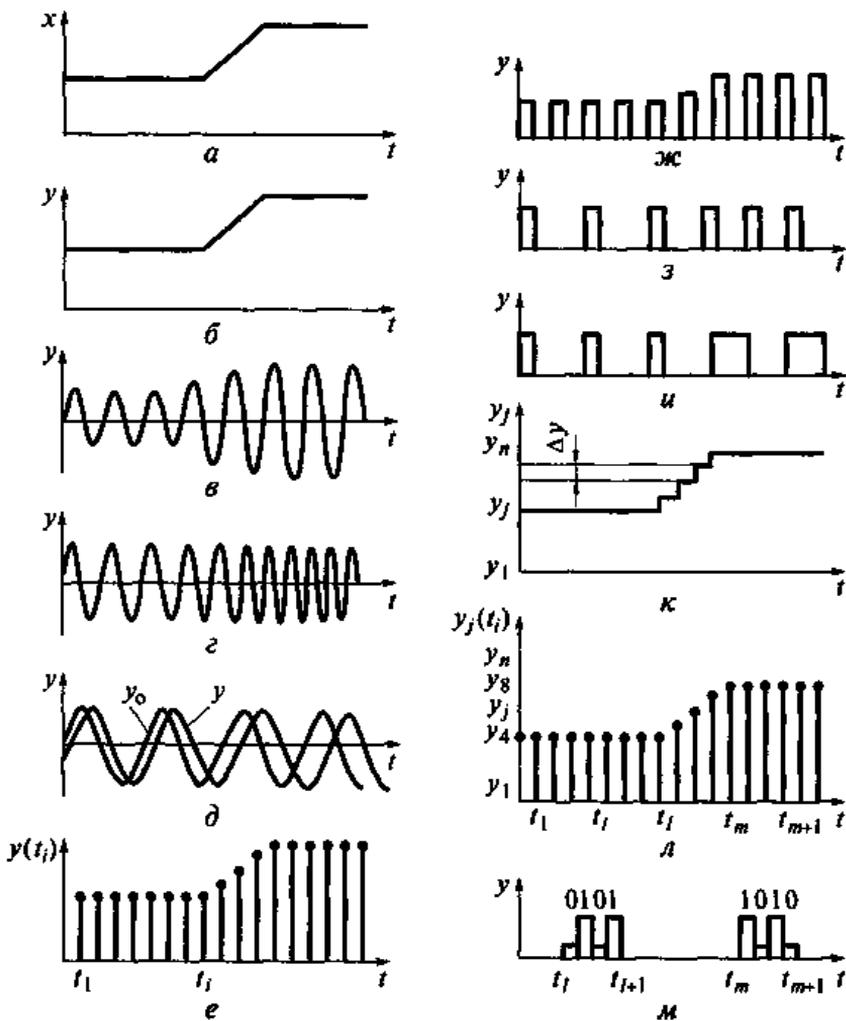


Рис. 3.3. Измеряемая величина x (а) и сигналы измерительной информации y (б-м)

Непрерывные по информативному параметру и дискретные по времени сигналы. Такие сигналы представляют собой последова-

тельность значений сигнала, определенную на счетном множестве моментов времени t_i . Теоретическая модель таких сигналов показана на рис. 3.3 е, где $y(t_i)$ — последовательность значений непрерывного сигнала:

$$y(t) = k \cdot x(t)$$

(см. рис. 3.3 б), определенных в моменты времени t_i . В реальных средствах измерений подобным сигналом является периодическая последовательность импульсов постоянного тока (рис. 3.3 ж), у которых информативными параметрами могут быть не только амплитуда (Y_m), но и частота (f) или длительность (τ) этих импульсов. В зависимости от того, какой из этих параметров функционально связан с x , имеет место соответственно амплитудно-импульсная — АИМ (см. рис. 3.3 ж), частотно-импульсная — ЧИМ (рис. 3.3 з) или широтно-импульсная — ШИМ (рис. 3.3 и) модуляция сигнала.

Сигналы, непрерывные по времени и квантованные (дискретные) по информативному параметру. В таких сигналах (рис. 3.3 к) информативный параметр может принимать только некоторые разрешенные уровни y_i (уровни квантования), отстоящие друг от друга на конечные интервалы (кванты) Δy . Примером является сигнал на выходе цифроаналогового преобразователя.

Сигналы, дискретные по времени и квантованные по информативному параметру. Теоретической моделью такого сигнала является дискретная последовательность $y_i(t_i)$ значений непрерывного сигнала:

$$y(t) = k \cdot x(t)$$

(рис. 3.3 л), принимающая только разрешенные уровни (y_i) и определенная в дискретные моменты времени (t_i). Такому виду сигналов соответствуют, например, сигналы при кодово-импульсной модуляции, при которой в моменты времени (t_i) каждому разрешенному уровню (y) ставится в соответствие определенный код — комбинация условных сигналов, в частности импульсов постоянного тока высокого уровня, обозначаемых 1, и импульсов низкого уровня, обозначаемых 0. Так, на рис. 3.3 м показаны две кодовые комбинации: 0101 и 1010, соответствующие уровням y_4 и y_8 (см. рис. 3.3 л) в моменты времени t_i и t_m .

Приведенные примеры сигналов широко используются в электрических средствах измерений. Однако следует иметь в виду, что находят применение и другие сигналы.

Для описания реальных физических сигналов применяют различные математические модели. Под математической моделью понимают описание сигнала на формальном языке математики, т. е. с помощью формул, неравенств или логических соотношений.

Теория сигналов — весьма обширная и достаточно разработанная область знаний. Существует множество учебной и научной литературы, посвященной этой теории.

§ 3. Измерение параметров элементов электрических цепей (L, C, R)

Электрические цепи представляют собой совокупность соединенных друг с другом элементов — источников электрической энергии и нагрузок в виде резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов. При определенных допущениях эти нагрузки можно рассматривать как линейные пассивные двухполюсники с сосредоточенными постоянными, характеризующиеся некими идеальными параметрами — сопротивлением (R), индуктивностью (L), емкостью (C).

При измерении, однако, не всегда удается определить значение того или иного параметра, соответствующее идеальному, совершенному виду элемента. Несовершенство конструкции и характеристик применяемых материалов является причиной появления так называемых остаточных (паразитных) параметров элементов. Так, наряду с главным параметром катушки индуктивности — индуктивностью, она обладает собственной емкостью и активным сопротивлением; резистор, обладая активным сопротивлением, имеет также определенную индуктивность и т. п.

С учетом остаточных параметров конденсатор, катушку индуктивности или резистор можно характеризовать некоторым эффективным значением емкости, индуктивности, сопротивления, которые зависят от частоты. Поэтому эффективные параметры компонентов необходимо измерять на рабочих частотах, если их влиянием на результат измерения нельзя пренебречь.

В зависимости от объекта измерений, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот и других условий для измерения

параметров двухполюсников применяют различные методы и средства измерений. Наиболее распространенными являются следующие методы измерения: вольтметра-амперметра, непосредственной оценки, мостовой, резонансный и дискретного счета.

3.1. Метод вольтметра-амперметра

Измерение методом вольтметра-амперметра сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым двухполюсником и последующему расчету его параметров по закону Ома. Метод может быть использован для измерения активного и полного сопротивления, индуктивности и емкости.

Измерение активных сопротивлений производится на постоянном токе, при этом включение резистора (R_x) в измерительную цепь возможно по схемам, представленным на рис. 3.4 а и б. Обе схемы включения приводят к методическим погрешностям (ΔR), зависящим от величины сопротивления приборов.

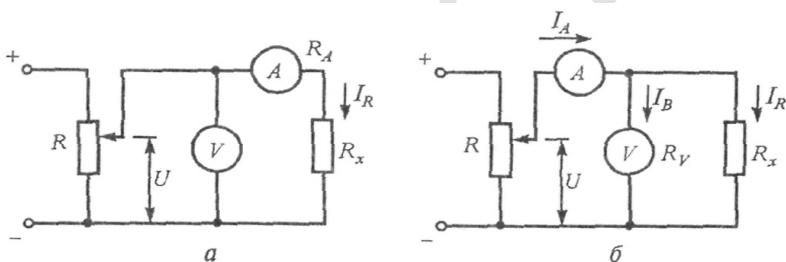


Рис. 3.4. Измерение активных сопротивлений методом вольтметра-амперметра

Очевидно, что в схеме а (рис. 3.4) методическая погрешность тем меньше, чем меньше сопротивление амперметра (при $R_a \rightarrow 0$, $\Delta R \rightarrow 0$), а в схеме б эта погрешность тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра (при $R_v \rightarrow \infty$, $\Delta R \rightarrow 0$). Таким образом, схемой, приведенной на рис. 3.4 а, следует пользоваться для измерения больших сопротивлений, а схемой, приведенной на рис. 3.4 б, — для измерения малых сопротивлений.

Измерение полного сопротивления (Z_x) выполняется на переменном токе частотой f (рис. 3.5).

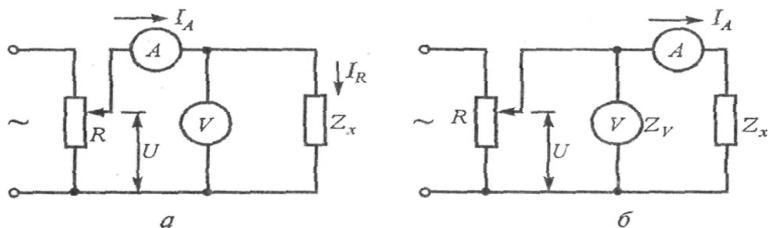


Рис. 3.5. Измерение полного сопротивления двухполюсника

По показаниям вольтметра и амперметра определяют модуль полного сопротивления:

$$|Z_x| = U_v / I_A,$$

где U_v , I_A — показания вольтметра и амперметра.

Выполнив анализ методической погрешности, приходим к выводу, что схему, представленную на рис. 3.5 а, целесообразно применять при $Z_x \ll Z_v$, а на рис. 3.5 б — при $Z_x \gg Z_v$.

Измерение емкости методом вольтметра-амперметра может быть выполнено по схемам, представленным на рис. 3.6.

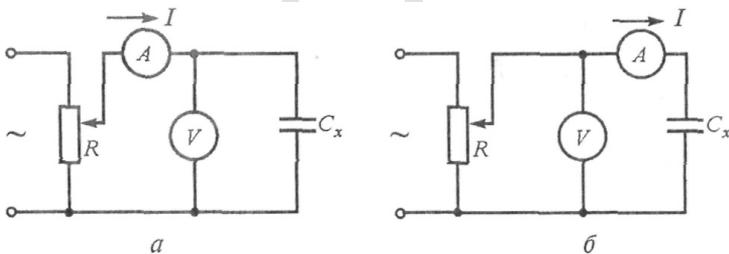


Рис. 3.6. Измерение емкости методом вольтметра-амперметра

Емкостное сопротивление конденсатора

$$X_c = 1/(\omega \cdot C_x) = U_c / I,$$

откуда

$$C_x = I/(\omega \cdot U_c).$$

Следовательно, при измерении емкости этим методом необходимо знать частоту источника питания. Для измерения больших емкостей рекомендуется схема, приведенная на рис. 3.6 а; а малых емкостей — на рис. 3.6 б.

Для измерения очень малых емкостей применяют вариант метода вольтметра-амперметра (метод двух вольтметров), схема которого приведена на рис. 3.7.

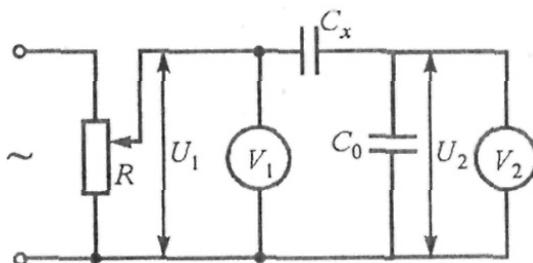


Рис. 3.7. Измерение емкости методом двух вольтметров

Питающее напряжение (U_1) измеряется вольтметром V_1 . Вольтметр V_2 измеряет напряжение на конденсаторе C_0 , емкость которого известна:

$$U_2 = I / (\omega \cdot C_x).$$

Ток (I) определяется выражением $I = U_1 / (1/(\omega \cdot C_x) + 1/(\omega \cdot C_0))$, откуда

$$C_x = C_0 \cdot U_2 / (U_1 - U_2).$$

Для уменьшения погрешности измерения необходимо выполнить условие $C_0 \ll C_x$, тогда можно упростить предыдущее выражение:

$$C_x = C_0 \cdot U_2 / U_1.$$

Метод двух вольтметров позволяет измерять емкости от долей пикофард.

Измерение индуктивности катушки методом вольтметра-амперметра возможно, если ее сопротивление (R_L) значительно меньше реактивного сопротивления (X_L) (рис. 3.8 а, б).

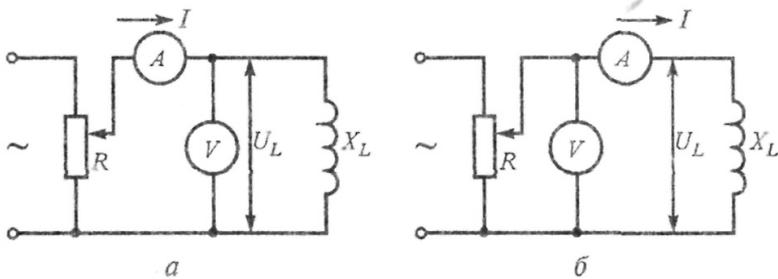


Рис. 3.8. Измерение индуктивности катушки

При этом $I = U_L / (\omega \cdot L)$, откуда $L = U_L / (\omega \cdot I)$.

Если требуется получить более точный результат, то необходимо учесть сопротивление катушки. Так как

$$Z = \frac{U_L}{I} = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2},$$

то

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R_L^2}.$$

Погрешности измерения параметров элементов цепей методом вольтметра-амперметра на низких частотах составляют 0,5... 10% и определяются погрешностью используемых приборов, а также наличием паразитных параметров. Погрешности измерения возрастают с увеличением частоты.

3.2. Метод непосредственной оценки

Метод непосредственной оценки реализуется в приборах для измерения сопротивления постоянному току — электромеханических и электронных омметрах. Электромеханические омметры строятся на основе приборов магнитоэлектрической системы и в зависимости от величины измеряемого сопротивления могут быть выполнены по схеме с последовательным (рис. 3.9 а) либо параллельным (рис. 3.9 б) включением измеряемого сопротивления.

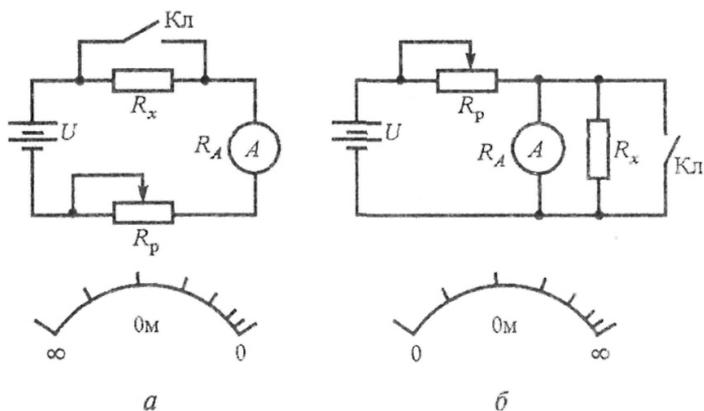


Рис. 3.9. Электромеханический омметр

Источником питания омметра обычно служит гальванический элемент. Ток, протекающий через магнитоэлектрический прибор в омметре с последовательным включением при разомкнутом ключе ($K_{л}$), определяется по формуле:

$$I = U / (R_x + R_A + R_p),$$

где R_A — сопротивление прибора; R_p — регулировочный резистор.

При постоянных значениях R_A , R_p и U отклонение стрелки прибора (α) определяется измеряемым сопротивлением (R_x), т. е. шкала прибора может быть проградуирована в единицах сопротивления. Шкала омметра неравномерна (см. рис. 3.9 а).

Перед проведением измерения сопротивления необходимо установить «размах» шкалы, т. е. отрегулировать омметр так, чтобы при $R_x = \infty$ и $R_x = 0$ стрелка прибора устанавливалась бы на начальную и конечную отметки шкалы. При незамкнутых входных зажимах омметра и разомкнутом ключе ($K_{л}$) (что соответствует $R_x = \infty$) стрелка прибора находится в крайнем левом положении на отметке 0 мА, следовательно, эта отметка шкалы будет соответствовать $R_x = \infty$. Далее, замкнув ключ ($K_{л}$), т. е., моделируя $R_x = 0$, наблюдают отклонение стрелки прибора и, в том случае, если стрелка не доходит до конечной отметки шкалы или переходит за нее, регулируют резистором (R_p) ток через прибор до достижения стрелкой конечной отмет-

ки. После этого, разомкнув ключ, можно выполнить измерение сопротивления (R_x). Характер шкалы подсказывает, что омметр такого типа предпочтительно использовать для измерения сравнительно больших сопротивлений (до нескольких килоом), т. к. при малых значениях R_x этот омметр имеет малую чувствительность.

Для измерения небольших сопротивлений применяются омметры, выполненные по схеме с параллельным включением измеряемого сопротивления, уравнение шкалы для которых имеет вид:

$$I = U/[R_p + R_A \cdot R_x / (R_A + R_x)].$$

Как и в схеме с последовательным включением, здесь отклонение стрелки прибора зависит только от R_x при условии, что остальные члены последнего уравнения постоянны. Перед проведением измерения также необходимо установить размах шкалы, моделируя ситуацию $R_x = 0$ и $R_x = \infty$ и регулируя ток (I) сопротивлением резистора (R_p). Для омметра с параллельным включением нулевое положение указателя совпадает с нулевым значением измеряемого сопротивления, а крайнее правое положение стрелки соответствует $R_x = \infty$. Шкала такого омметра изображена на рис. 3.9 б.

Омметры, выполненные по схемам рис. 3.9 а, б, выпускаются как отдельные приборы, а также входят в состав комбинированных приборов (тестеров, авометров). Класс точности омметров не ниже 2,5.

3.3. Электронные омметры

При построении электронных омметров используются два метода измерения: метод стабилизированного тока в цепи делителя и метод преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение.

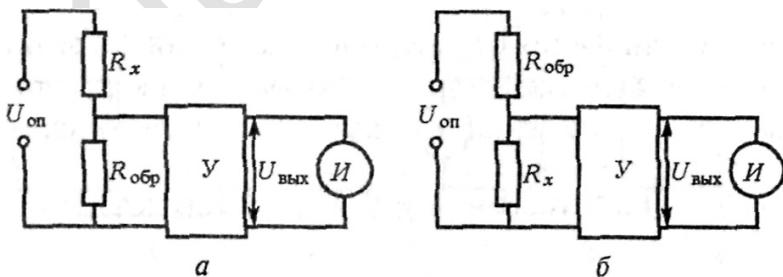


Рис. 3.10. Измерение сопротивления по методу стабилизированного тока

Схема измерения сопротивления по методу стабилизированного тока приведена на рис. 3.10 а.

Делитель напряжения, составленный из известного образцового ($R_{обр}$) и измеряемого (R_x) сопротивлений, питается от источника опорного напряжения ($U_{оп}$). Падение напряжения на образцовом резисторе усиливается усилителем ($У$) с большим входным сопротивлением. Выходное напряжение усилителя ($U_{вых}$) зависит от значения сопротивления (R_x). В качестве индикатора обычно применяется микроамперметр магнитоэлектрической системы, шкала которого градуируется в единицах сопротивления. Если усилитель имеет коэффициент усиления (K) и входное сопротивление $R_{вх} \ll R_{обр}$, то измеряемое сопротивление определяется выражением:

$$R_x = [(K \cdot U_{оп} / U_{вых}) - 1] R_{обр}$$

Этот вариант схемы омметра применяется для измерения достаточно больших сопротивлений, когда $R_x > R_{обр}$.

Для измерения малых сопротивлений ($R_x < R_{обр}$) используется схема, представленная на рис. 3.10 б. Измеряемое сопротивление здесь определяется выражением:

$$R_x = R_{обр} / [(K \cdot U_{оп} / U_{вых}) - 1]$$

Эта схема реализована в ряде выпускаемых промышленностью миллиомметров, обеспечивающих измерение активных сопротивлений в диапазоне $10^{-4} \dots 10^2$ Ом с погрешностью 1,5...2,0%.

Измерение средних и больших (до 10^{18} Ом) сопротивлений осуществляется с использованием преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение. В основу метода положен принцип работы операционного усилителя ($ОУ$) постоянного тока с отрицательной обратной связью (рис. 3.11).

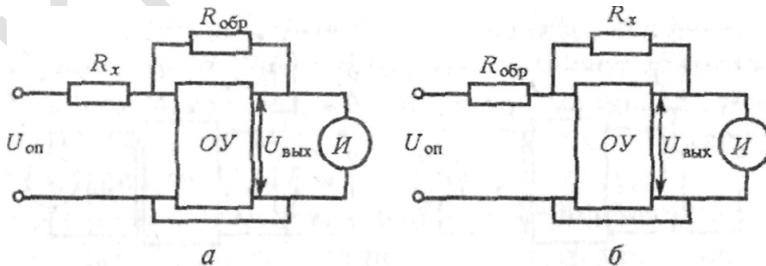


Рис. 3.11. Схемы омметров на основе операционных усилителей

Для схемы, представленной на рис. 3.11 а, измеряемое сопротивление (R_x) определяется выражением:

$$R_x = U_{\text{оп}} \cdot R_{\text{обр}} / U_{\text{вых}},$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение усилителя; $R_{\text{обр}}$ — образцовый резистор.

При постоянных значениях $U_{\text{оп}}$ и $R_{\text{обр}}$ напряжение ($U_{\text{вых}}$) будет зависеть только от R_x и, следовательно, шкала микроамперметра может быть отградуирована в единицах сопротивления. Указанная схема применяется в основном для измерения больших сопротивлений в приборах, называемых тераомметрами.

Поменяв местами R_x и $R_{\text{обр}}$, получим схему (рис. 3.11 б), пригодную для измерения малых сопротивлений (от единиц Ом). Измеряемое сопротивление в такой схеме определяется выражением:

$$R_x = U_{\text{вых}} \cdot R_{\text{обр}} / U_{\text{оп}}.$$

Применение в одном приборе обоих вариантов схем позволяет создать измерители сопротивления с диапазоном измерения от единиц Ом до нескольких десятков мегаом с погрешностью не более 10%.

3.4. Измерительные мосты постоянного тока

Важным классом средств измерения, предназначенных для измерения параметров элементов электрических цепей методом сравнения, являются мосты. Сравнение измеряемой величины (сопротивления, емкости, индуктивности) с образцовой мерой при помощи моста в процессе измерения может осуществляться вручную или автоматически, на постоянном или на переменном токе. Мостовые схемы обладают большой точностью, высокой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых значений параметров. На основе мостовых методов измерения строятся средства измерения, предназначенные как для измерения какой-либо одной величины, так и универсальные аналоговые и цифровые приборы.

Одинарный мост постоянного тока. Такой мост (рис. 3.12) содержит четыре резистора, соединенных в кольцевой замкнутый контур.

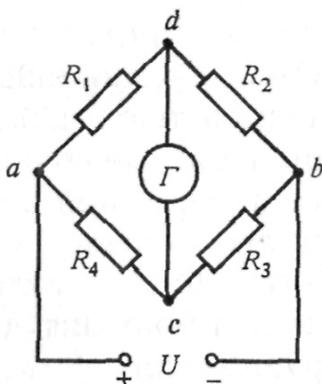


Рис. 3.12. Схема одинарного моста постоянного тока

Резисторы R_1 , R_2 , R_3 и R_4 этого контура называются плечами моста, а точки соединения соседних плеч — вершинами моста. Цепи, соединяющие противоположные вершины, называют диагоналями. Диагональ ab содержит источник питания и называется диагональю питания. Диагональ cd , в которую включен индикатор Γ , называется измерительной диагональю. В мостах постоянного тока в качестве индикатора обычно используется гальванометр. Мосты постоянного тока предназначены для измерения активного сопротивления.

В общем случае зависимость протекающего через гальванометр тока (I_r) от сопротивлений плеч, сопротивления гальванометра (R_r) и напряжения питания (U) имеет вид:

$$I_r = U(R_1R_3 - R_2R_4) / [R_r(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_3R_4(R_1 + R_2)].$$

Измерение сопротивления может производиться в одном из двух режимов работы моста: уравновешенном либо неуравновешенном. Мост называется уравновешенным, если разность потенциалов между вершинами c и d равна нулю, а, следовательно, и ток через гальванометр равен нулю.

Из выражения следует, что $I_r = 0$ при

$$R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4 = 0.$$

Это условие равновесия одинарного моста постоянного тока можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы мост был уравновешен, произведения сопротивлений противолежащих плеч моста должны быть равны. Если сопротивление одного из плеч (например, R_4) неизвестно, то, уравновесив мост путем подбора сопротивлений плеч R_1 , R_2 и R_3 , находим из условия равновесия:

$$R_4 = (R_1/R_2) \cdot R_3.$$

В реальных мостах постоянного тока для уравновешивания регулируются отношение R_1/R_2 и сопротивление плеча R_3 , которые, соответственно, называют плечом отношения и плечом сравнения.

В состоянии равновесия моста ток через гальванометр равен нулю и, следовательно, колебания напряжения питания и сопротивления гальванометра влияния на результат измерения не оказывают (важно лишь, чтобы чувствительность гальванометра была достаточной для надежной фиксации состояния равновесия). Поэтому основная погрешность уравновешенного моста определяется чувствительностью гальванометра, чувствительностью схемы, погрешностью сопротивлений плеч, а также сопротивлениями монтажных проводов и контактов. При измерении малых сопротивлений существенным источником погрешности может явиться сопротивление проводов, с помощью которых измеряемый резистор подключается к входным зажимам моста, т. к. оно полностью входит в результат измерения. Поэтому нижний предел измерения одинарного моста постоянного тока ограничен значениями сопротивления порядка 1 Ом. Верхний же предел измерения — $10^6 \dots 10^8$ Ом — ограничивается чувствительностью гальванометра. При больших значениях измеряемого сопротивления токи в плечах моста очень малы и чувствительности гальванометра недостаточно для четкой фиксации равновесия.

В режиме неуравновешенного моста измерение сопротивления производится по показаниям гальванометра, предварительно в комплекте с мостовой схемой отградуированного в единицах сопротивления. Неуравновешенные мосты часто применяются в устройствах для разбраковки изделий по сопротивлению (резисторов, обмоток реле и т. п.). Так, если при изготовлении резисторов необходимо отобрать из партии резисторы с сопротивлением $R = R_{ном} \pm \Delta R$, то, уравновесив предварительно мост с помощью образцового магазина со-

противления при $R_x = R_{ном}$, изменяют сопротивление магазина на $\pm \Delta R$ и фиксируют соответствующие отклонения стрелки гальванометра $\pm \alpha$ (гальванометр с нулем посередине шкалы). Затем вместо магазина сопротивления ко входу моста подключаются контролируемые резисторы и, если стрелка гальванометра выходит за допустимые пределы, резистор бракуется.

Неуравновешенные мосты по точности значительно уступают уравновешенным, т. к. на результат измерения кроме факторов, указанных для уравновешенных мостов, оказывают влияние колебания напряжения питания и сопротивления гальванометра.

Двойной мост постоянного тока. Для измерения малых сопротивлений (от 1 до 10^{-8} Ом) применяют двойные мосты. Схема двойного моста представлена на рис. 3.13.

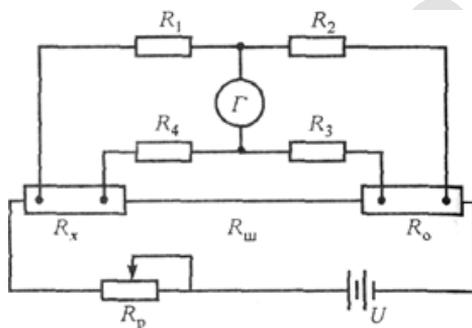


Рис. 3.13. Схема двойного моста постоянного тока

Для исключения влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных сопротивлений контактов измеряемое сопротивление (R_x) присоединяется по четырехзажимной (четырёхпроводной) схеме включения: двумя токовыми зажимами в цепь источника питания моста, а двумя потенциальными — в измерительную цепь. Аналогичные зажимы имеет образцовое сопротивление (R_0). В цепь источника питания моста входят регулировочное сопротивление (R_p), измеряемое сопротивление (R_x), образцовое сопротивление (R_0) (одного порядка по величине с R_x) и сопротивление ($R_{ш}$).

Сопротивление плеч R_1 , R_2 , R_3 , и R_4 , входящих в измерительную цепь, выбирают достаточно большим (сотни и тысячи Ом), поэтому

влияние сопротивлений монтажных проводов и переходных сопротивлений в контактах пренебрежимо мало.

При равновесии моста формула для определения сопротивления имеет вид:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 + \frac{R_3 R_{\text{ш}}}{R_3 + R_4 + R_{\text{ш}}} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_4}{R_3} \right).$$

При соблюдении равенства $R_x/R_2 = R_4/R_3$ и достаточно малом сопротивлении $R_{\text{ш}}$ вторым членом формулы можно пренебречь. Тогда формула упрощается:

$$R_x = (R_1/R_2) \cdot R_0.$$

Равенство должно соблюдаться постоянно, поэтому резисторы R_1 , R_2 и R_3 , R_4 регулируются при помощи спаренных органов управления. Резистор $R_{\text{ш}}$ представляет собой короткий отрезок медной шины большого сечения, сопротивление которого очень мало.

Как указано выше, ограниченная чувствительность гальванометра и мостовой схемы приводит к погрешности от неполного уравнивания мостов.

Чувствительность гальванометра S_r представляет собой отношение приращения отклонения стрелки $\Delta\alpha$ к приращению тока ΔI_r через гальванометр:

$$S_r = \Delta\alpha / \Delta I_r.$$

Чувствительность мостовой схемы ($S_{\text{сх}}$) определяется как отношение изменения выходного сигнала (ΔI_r) к изменению входного сигнала (ΔR_x):

$$S_{\text{сх}} = \Delta I_r / \Delta R_x.$$

Чувствительность моста $S_m = \Delta\alpha / \Delta R_x$ можно представить в виде:

$$S_m = (\Delta\alpha / \Delta I_r) \cdot (\Delta I_r / \Delta R_x) = S_r \cdot S_{\text{сх}}.$$

Отсюда видно, что чувствительность моста тем больше (а, следовательно, погрешность от неполного уравнивания тем меньше), чем больше чувствительность мостовой схемы и гальванометра. Необходимая чувствительность моста достигается выбором гальванометра и правильным расчетом мостовой схемы.

Промышленностью выпускаются одинарные и одинарно-двойные мосты постоянного тока классов от 0,005 до 5.

3.5. Измерительные мосты переменного тока

Для измерения емкости, индуктивности, взаимной индуктивности и тангенса угла потерь конденсаторов применяются мосты переменного тока, схемы которых отличаются большим разнообразием. Кроме простых четырехплечих мостовых схем, существуют и более сложные мостовые схемы. Эти схемы путем последовательных эквивалентных преобразований могут быть приведены к простой четырехплечей схеме, которая является, таким образом, основной.

Схема одинарного четырехплечевого моста переменного тока приведена на рис. 3.14.

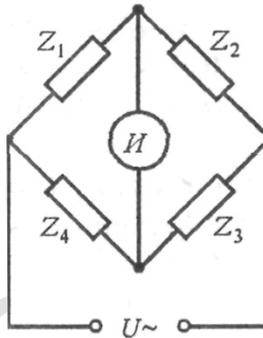


Рис. 3.14. Схема моста переменного тока

Так как мост питается напряжением переменного тока, то в качестве индикатора в нем применяются электронные милливольтметры переменного тока либо осциллографические индикаторы нуля.

В общем случае сопротивления плеч моста переменного тока представляют собой комплексные сопротивления вида:

$$Z_i = R_i + j \cdot X_i.$$

Условие равновесия одинарного моста переменного тока имеет вид:

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4.$$

Записав это выражение в показательной форме, получим:

$$Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} Z_3 \cdot e^{j\varphi_3} = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} Z_4 \cdot e^{j\varphi_4},$$

где Z_i — модуль комплексного сопротивления; φ_i — фазовый сдвиг между током и напряжением в соответствующем плече.

Это соотношение распадается на два скалярных условия равновесия:

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4.$$

Отсюда следует, что в схеме моста переменного тока равновесие наступает только при равенстве произведений модулей комплексных сопротивлений противолежащих плеч и равенстве сумм их фазовых сдвигов. При этом нужно иметь в виду, что при изменении значений активных и реактивных составляющих одновременно изменяются и модуль, и фаза, поэтому мост переменного тока можно привести к состоянию равновесия лишь большим или меньшим числом переходов от регулирования одного параметра к регулированию другого.

Второе уравнение показывает, какими по характеру должны быть сопротивления плеч мостовой схемы, чтобы обеспечить возможность ее уравнивания. Так, например, если в двух смежных плечах включены активные сопротивления ($\varphi = 0$), то в двух других смежных плечах обязательно должны быть сопротивления одного характера — или индуктивности, или емкости.

Для измерения емкости конденсаторов без потерь используется мостовая схема, приведенная на рис. 3.15 а.

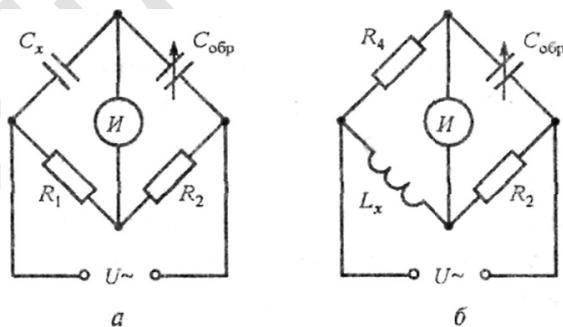


Рис. 3.15. Измерение емкости и индуктивности мостом переменного тока

Условие равновесия для этой схемы имеет вид:

$$R_1/(\omega \cdot C_{обр}) = R_2/(\omega \cdot C_x),$$

где $C_{обр}$ — образцовый конденсатор переменной емкости, откуда

$$C_x = (R_2/ R_1) \cdot C_{обр}.$$

Мостовая схема для измерения индуктивности приведена на рис. 3.15 б. В качестве плеча сравнения здесь также используется конденсатор переменной емкости $C_{обр}$. Полагая, что активное сопротивление катушки пренебрежимо мало ($R_L = 0$), получим условие равновесия:

$$(\omega \cdot L_x)/\omega \cdot C_o = R_2 \cdot R_4,$$

откуда

$$L_x = R_2 \cdot R_4 \cdot C_{обр}.$$

Чувствительность моста переменного тока определяется аналогично чувствительности моста постоянного тока. Погрешность моста переменного тока также определяется погрешностями значений элементов, образующих мост, переходных сопротивлений контактов, чувствительностью схемы и индикатора. Мосты переменного тока больше, чем мосты постоянного тока, подвержены влиянию помех и паразитных связей между плечами, плечами и землей, мостом и оператором. Именно поэтому, даже при тщательном экранировании моста и принятии других мер защиты, погрешности мостов переменного тока больше, чем погрешности мостов постоянного тока. Промышленностью выпускаются мосты переменного тока классов точности от 0,1 до 5,0.

Мосты переменного тока работают обычно на низких частотах 100 Гц и 1000 Гц. При работе на повышенных частотах погрешности измерения резко возрастают.

3.6. Резонансный метод измерения

Резонансный метод измерения основывается на определении резонансной частоты колебательного контура, составленного из образцового и измеряемого элементов (индуктивностей или емкостей). Этот метод применяется для измерения индуктивностей и емкостей только на высокой частоте, т. к. в области низких частот резонанс-

ные явления проявляются недостаточно резко, что не позволяет получить высокую точность измерения.

Известно несколько вариантов резонансного метода, на основе которых построены средства измерения параметров двухполюсников. Рассмотрим принцип действия прибора, называемого измерителем добротности или куметром.

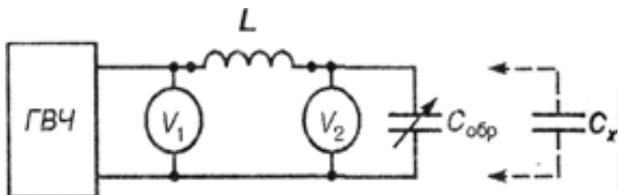


Рис. 3.16. Принцип действия измерителя добротности

Схема измерителя добротности (рис. 3.16) включает источник питания — высокочастотный генератор (ГВЧ), последовательный колебательный контур, образуемый катушкой (L) с активным сопротивлением (R_L) и конденсатором ($C_{обр}$). Напряжение на выходе генератора и на конденсаторе измеряется вольтметрами с высокоомным входом — V_1 и V_2 . Изменением частоты ГВЧ или емкости конденсатора ($C_{обр}$) можно настроить колебательный контур в резонанс. Из теории электрических цепей известно, что при резонансе в последовательной цепи $\omega \cdot L = 1/(\omega \cdot C_{обр})$. Если через Q обозначить добротность контура, то

$$Q = 1/(\omega \cdot C_{обр} \cdot R_L)$$

или

$$Q = \omega \cdot L/R_L.$$

Измерение индуктивности производится следующим образом: катушка, индуктивность (L_x) которой необходимо измерить, подсоединяется к зажимам (L) и при заданной частоте питания (f) контур настраивается в резонанс изменением емкости ($C_{обр}$). При резонансе отклонение стрелки вольтметра V_2 будет максимальным. Из предыдущих соотношений получим:

$$L_x = 1/(\omega^2 \cdot C_{обр}),$$

где значение $C_{обр}$ отсчитывается по шкале конденсатора переменной емкости.

При измерении емкости к зажимам (L) подсоединяется образцовая катушка индуктивности ($L_{обр}$) и измерение выполняется в два этапа. Вначале изменением частоты генератора контур $L_{обр} C_{обр}$ настраивается в резонанс. Резонансная частота в этом случае будет:

$$f_{рез} = 1/(2\pi \sqrt{L_{обр} C_{обр1}}).$$

Далее, конденсатор, емкость которого (C_x) необходимо измерить, подключается параллельно конденсатору $C_{обр}$ и, не меняя частоты генератора, контур снова настраивают в резонанс изменением емкости образцового конденсатора. Так как резонансная частота (частота питающего напряжения) не изменилась, то

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{обр} (C_{обр2} + C_x)}}.$$

Приравняв $f_{рез}$, получим:

$$C_x = C_{обр1} - C_{обр2}.$$

При измерении добротности контура она может быть определена по показаниям вольтметров, поскольку известно, что при резонансе напряжение на конденсаторе и на индуктивности оказывается в Q раз больше, чем напряжение питания (U_1).

$$Q = U_2/U_1.$$

Если поддерживать U_1 постоянным, то очевидно, что шкала вольтметра V_2 может быть проградуирована непосредственно в единицах добротности. Выпускаемые промышленностью измерители добротности обеспечивают проведение измерений на частотах от 1 кГц до 300 МГц с погрешностью в пределах 0,5...5%.

3.7. Метод дискретного счета. Цифровые приборы

В основу работы цифровых средств измерения параметров двухполюсников, реализующих метод дискретного счета, положено преобразование измеряемого параметра в пропорциональный интервал времени и измерение данного интервала путем заполнения его счетными импульсами. Для этого используются закономерности аperiodического про-

цесса, возникающего при подключении заряженного конденсатора или катушки с током (индуктивности) к образцовому резистору. При измерении активного сопротивления используется процесс разряда образцового конденсатора через измеряемый резистор. Наибольшее применение метод дискретного счета нашел при создании цифровых измерителей емкостей и сопротивлений. Структурная схема цифрового измерителя емкости и сопротивления приведена на рис. 3.17.

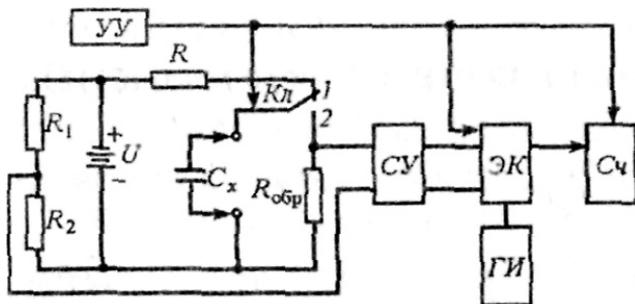


Рис. 3.17. Цифровой прибор для измерения емкости и сопротивления

Прибор работает следующим образом.

Перед началом измерения ключ (Кл) находится в положении 1 и конденсатор (C_x) заряжается через ограничительный резистор (R) до напряжения источника (U). В момент начала измерения (t_1) (рис. 3.18 а) управляющее устройство ($УУ$) вырабатывает импульс, который сбрасывает предыдущее показание счетчика импульсов ($Сч$), открывает электронный ключ ($ЭК$) и переводит ключ (Кл) в положение 2. Конденсатор (C_x) начинает разряжаться через образцовый резистор ($R_{обр}$) по экспоненциальному закону (рис. 3.18 б):

$$U_c = U \cdot e^{-(t-t_1)/\tau},$$

где $\tau = R_{обр} \cdot C_x$ — постоянная времени цепи разряда.

В момент t_1 импульсы генератора импульсов (ГИ), следующие с частотой f_0 , начинают поступать на вход счетчика импульсов ($Сч$). Через интервал времени τ напряжение на конденсаторе принимает значение:

$$U_c = U/e = 0,37 \cdot U.$$

Напряжение U_c подается на один из входов сравнивающего устройства (СУ), ко второму входу устройства подводится напряжение U_R , снимаемое с резистора R_2 делителя, состоящего из резисторов R_1 и R_2 . Если подобрать резисторы R_1 и R_2 так, чтобы напряжение U_R было равно $0,37 \cdot U$, то в момент t_2 равенства U_c и U_R на входе сравнивающего устройства возникает второй импульс, который закрывает электронный ключ, и счетчик прекращает подсчет импульсов (рис. 3.18 в).

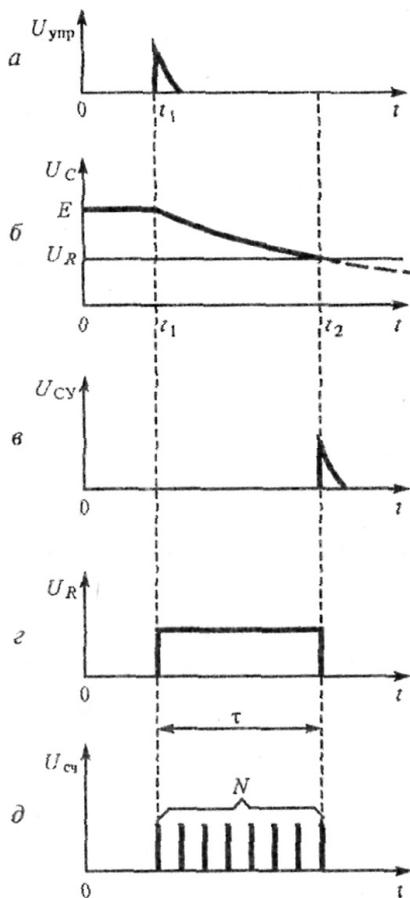


Рис. 3.18. Временные диаграммы прибора при измерении емкости

Если за время $t_2 - t_1 = \tau$ на счетчик поступило N импульсов, то можно записать:

$$N = f_0 \cdot \tau.$$

Так как $\tau = R_{обр} \cdot C_x$, то при фиксированных значениях f_0 и $R_{обр}$

$$C_x = N / (R_{обр} \cdot f_0) = K \cdot N,$$

т. е. измеряемая емкость прямо пропорциональна показанию счетчика, и последний может быть отградуирован в единицах емкости.

При наличии образцового конденсатора ($C_{обр}$) можно аналогичным образом измерить сопротивление резистора:

$$R_x = N / (C_{обр} \cdot f_0) = K \cdot N.$$

Приборы для измерения параметров электрических цепей, использующие метод дискретного счета, обеспечивают сравнительно малую погрешность измерения (0,1...0,2%). К недостаткам таких приборов можно отнести невозможность измерения параметров при рабочей частоте.

3.8. Измерение напряжений

Постоянное и переменное напряжение измеряют с помощью средств измерений, перечисленных в табл. 3.1

Таблица 3.1

Изменяемая величина	Приборы	Характеристики
Постоянное напряжение	Магнитоэлектрические измерители	Диапазон измерения 50 мВ...100 В при использовании добавочных сопротивлений, шкала линейная, точность $\pm 0,1\%$
	Мультиметры (тестеры)	Диапазон измерений обычно 100 мВ...3 кВ, точность $\pm 1\%$
	Электронные измерители	Диапазон измерений 15 мВ...1000 В, точность $\pm 1\%$, входное сопротивление около 10 Мом
	Электронные мультиметры	Диапазон измерений 10 мВ...1000 В, точность $\pm 1\%$. Входное сопротивление около 100 Мом

Продолжение табл. 3.1

Измеряемая величина	Приборы	Характеристики
Постоянное напряжение	Ферродинамические измерители	Диапазон измерений от 50 В измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 100 Гц, низкое входное сопротивление около 50 Ом/В
	Электродинамические измерители	Измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 2 кГц, Нелинейная шкала
	Электростатические приборы	Высокое входное сопротивление, высокая точность, измеряют постоянный и переменный ток, диапазон измерений 100...1000 В
	Цифровые измерители	Точность не ниже $\pm 1\%$ + 1 цифра, входное сопротивление не ниже 10 Мом, диапазон измерений 100 мВ...1000 В
	Потенциометры	Измеряют ЭДС, а также могут быть доработаны для измерения термоэлектрической ЭДС
Переменное напряжение	Магнитоэлектрические измерители	Диапазон измерений 3...3000 В при использовании трансформаторов, шкала линейная, точность $\pm 0.1\%$, частотная полоса 50 Гц..10 кГц
	Мультиметры (тестеры)	Диапазон измерений обычно 3 В...3 кВ, точность $\pm 2\%$
	Электронные измерители	Диапазон измерений 100 мкВ...1000 В, точность $\pm 2...5\%$, частотная полоса 20 Гц...100 МГц, входное сопротивление около 10 Мом
	Электронные мультиметры	Диапазон измерений 10 мВ...1000 В, точность $\pm 2...5\%$, частотная полоса 20 Гц...100 МГц, входное сопротивление около 10 МОм, входная емкость 2 пФ

Измеряемая величина	Приборы	Характеристики
Переменное напряжение	Ферродинамические измерители	Диапазон измерений от 50 В, измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 100 Гц, низкое входное сопротивление около 50 Ом/В
	Термопарные измерители	Частотная полоса 10 Гц...50 МГц, хрупкая конструкция, нелинейная шкала
	Электродинамические измерители	Измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 2 кГц, нелинейная шкала
	Электростатические приборы	Высокое входное сопротивление, высокая точность, измеряют постоянный и переменный ток, диапазон измерений 100...1000 В
	Цифровые измерители	Точность не ниже $\pm 1\%$ + 3 цифры, входное сопротивление 10 Мом, входная емкость 100 пФ, диапазон измерений 100 мВ...1000 В, частотная полоса 10 Гц...10 кГц

Вольтметры для измерения постоянного напряжения

В магнитоэлектрических приборах измеряется ток, протекавший через известное сопротивление, и по его величине определяется значение напряжения. Для самого низкого диапазона измерений известное сопротивление — это просто сопротивление катушки измерителя. Для расширения диапазона измерений могут быть использованы добавочные сопротивления (рис. 3.19). Чувствительность прибора с добавочным сопротивлением можно определить по формуле:

$$\text{Чувствительность} = \frac{S}{R_m + R_g},$$

где R_m — это последовательно включенное добавочное сопротивление, R_g — сопротивление катушки гальванометра, а S — чувствительность измерителя без добавочного сопротивления.

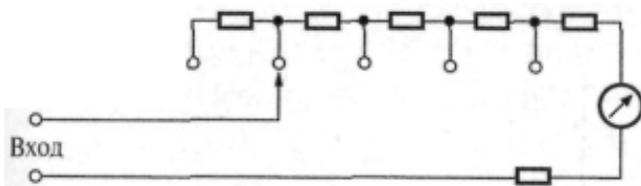


Рис. 3.19. Добавочные сопротивления

Как правило, отклонение на полную шкалу происходит при изменении сигнала в интервале 50 мВ...100 В. Точность составляет $\pm 0,1\%$ от отклонения на всю шкалу. Шкала линейная. При оценке влияния нагрузки необходимо учитывать отношение сопротивления вольтметра (R_m) к сопротивлению эквивалентной цепи (R_{Th}), к которой он подключен. Тогда точность с нагрузкой можно оценить следующим образом:

$$\text{Точность} = \frac{R_m}{R_m + R_{Th}} \times 100\%.$$

Таким образом, для получения точности, равной 99%, сопротивление R_m должно быть, по крайней мере, в 99 раз больше сопротивления R_{Th} . Для того чтобы прибор обладал высоким входным сопротивлением, он должен иметь высокое сопротивление добавочного резистора, соединенного последовательно с гальванометром, у которого отклонение на всю шкалу происходит при низком уровне тока.

Вольтметры для измерения переменного напряжения

Для использования в цепи переменного тока в качестве вольтметра магнитоэлектрический измеритель должен иметь мостовой выпрямитель и последовательно с ним соединенный добавочный резистор. В таких приборах минимальный диапазон измерения для отклонения на всю шкалу равен 3 В. При использовании трансформатора напряжения этот диапазон может быть расширен до 3000 В. У данного типа приборов линейная шкала, но она откалибрована так, чтобы корректно выдавать среднеквадратичные значения синусоидального сигнала.

соидального переменного напряжения. Для других форм сигнала необходимо производить корректировку полученных данных. Точность обычно не превышает уровень $\pm 1\%$ в частотном диапазоне 50 Гц... 10 кГц. У таких вольтметров обычно низкое входное сопротивление, и поэтому возникают проблемы согласования с нагрузкой.

Цифровые вольтметры

Процесс аналого-цифрового преобразования составляет сущность любого цифрового прибора, в том числе и вольтметра.

По виду измеряемой величины цифровые вольтметры подразделяются на вольтметры постоянного тока, переменного тока (средневыпрямленного или среднего квадратического значения), импульсные вольтметры — для измерения параметров видео- и радиоимпульсных сигналов и универсальные вольтметры, предназначенные для измерения напряжения постоянного и переменного тока, а также некоторых других электрических и неэлектрических величин (сопротивления, температуры и др.).

Схемные решения цифровых вольтметров определяются примененным методом аналого-цифрового преобразования. Получили распространение вольтметры с время-импульсным, частотно-импульсным преобразованием, а также с поразрядным уравниванием. В качестве примера рассмотрим принципы построения время-импульсных вольтметров.

Время-импульсный цифровой вольтметр. В основе работы время-импульсного вольтметра лежит преобразование измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, длительность которого измеряется путем заполнения этого интервала импульсами со стабильной частотой следования (счетными импульсами). Преобразование осуществляется посредством сравнения измеряемого напряжения постоянного тока с линейно изменяющимся напряжением (рис. 3.20), следующим образом.

Измеряемое напряжение (U_x) подается на один из входов сравнивающего устройства (СУ). При этом в момент времени t_1 импульсом U_{11} от блока управления (БУ) запускается генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН). В момент равенства напряжений от ГЛИН U_d и U_x вырабатывается импульс U_{12} . Интервал времени $T_x = t_2 - t_1$ оказывается пропорциональным значению измеряемого напряжения.

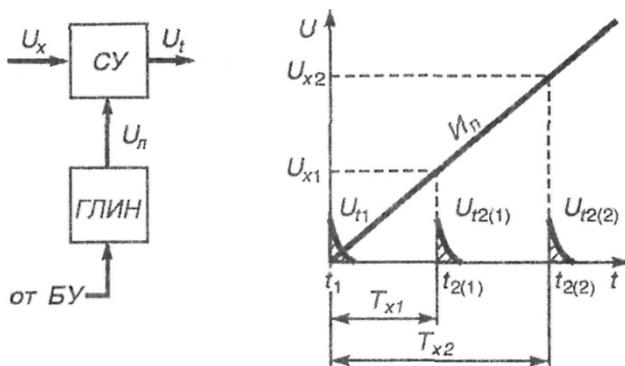


Рис. 3.20. Принцип преобразования напряжения в интервал времени

Упрощенная структурная схема время-импульсного цифрового вольтметра постоянного тока приведена на рис. 3.21. Наряду с блоками СУ, ГЛИН в схему входят блок управления (БУ), блок формирования (БФ), временной селектор (ВС) и генератор счетных импульсов (ГСИ). На БФ с БУ поступает импульс U_{11} . Это приводит к тому, что временной селектор начинает пропускать на выход счетные импульсы, следующие с частотой f_0 . Одновременно запускается ГЛИН, линейно изменяющееся напряжение (U_n) подается на устройство сравнения, которое в момент, когда U_x становится равным U_n вырабатывает импульс U_{t2} . Импульс приводит к закрытию временного селектора и прекращению прохождения через него счетных импульсов.

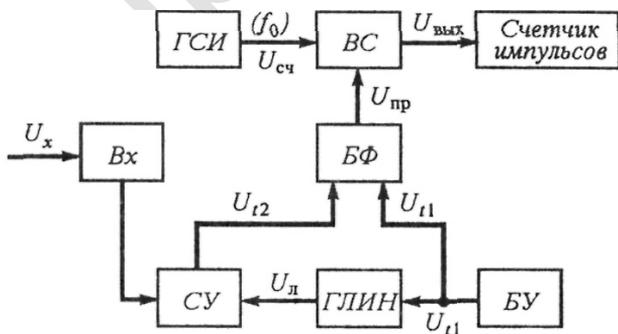


Рис. 3.21. Структурная схема время-импульсного цифрового вольтметра

Временные диаграммы приведены на рис. 3.22.

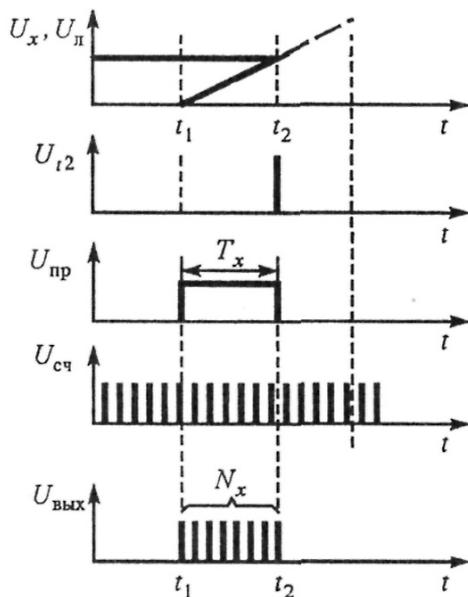


Рис. 3.22. Временные диаграммы время-импульсного вольтметра

Число импульсов N_x , заполняющих временной интервал T_x с точностью до одного импульса, описывается формулой:

$$N_x = T_x f_0.$$

Но $T_x = U_x / K$, где K — известный коэффициент, зависящий от скорости нарастания линейно изменяющегося напряжения. Таким образом,

$$N_x = U_x f_0 / K,$$

откуда

$$U_x = N_x K / f_0.$$

В вольтметре отношение K/f_0 выбирается равным 10^{-m} , где $m = 1, 2, 3, \dots$, поэтому прибор непосредственно показывает значение из-

меряемого напряжения (число m определяет положение запятой в цифровом отсчете). Указанный цикл работы вольтметра периодически повторяется. Возврат генератора линейно изменяющегося напряжения в исходное состояние и подготовка схемы к очередному измерению осуществляется импульсами от БУ после истечения времени t_2 .

По такому же принципу строятся цифровые вольтметры переменного тока. В этих вольтметрах напряжение переменного тока предварительно выпрямляется и далее подается на СУ. Основным недостатком метода время-импульсного преобразования является его невысокая помехоустойчивость. Шумовая помеха, наложенная на измеряемое напряжение U_x , изменяет его и, следовательно, изменяет момент появления импульса U_{i2} , определяющего длительность времени счета. Тем не менее, время-импульсное преобразование постоянных напряжений позволяет создавать сравнительно простые и достаточно точные вольтметры. Погрешности метода определяются нелинейностью и нестабильностью линейно изменяющегося напряжения и погрешностью, обусловленной нестабильностью порога срабатывания сравнивающего устройства. Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием имеют погрешность, не превышающую $0,1...0,05\%$.

3.9. Измерение частоты электромагнитных колебаний

Общие сведения

Частота колебаний является важнейшей характеристикой переменного тока, а измерение частоты — одной из основных задач, решаемых в радиотехнике и электронике. *Частотой колебаний* называют число полных колебаний в единицу времени:

$$f = N / T_{сч},$$

где $T_{сч}$ — интервал времени, за которое совершается N колебаний.

Для гармонических колебаний частота $f = 1/T$, где T — период колебаний.

Спектр частот электромагнитных колебаний, которые используются и которые необходимо измерять, простирается от долей герца до тысяч гигагерц. Весь спектр электромагнитных колебаний условно разделяется на два диапазона — низких и высоких частот. Низ-

кие частоты занимают область частот от инфразвуковых (ниже 20 Гц) до ультразвуковых (20...200 кГц); высокие частоты — от высоких (20 кГц...30 МГц) до сверхвысоких (выше 300 МГц).

Так как измерение частоты, по самому определению частоты, занимает определенный промежуток времени, то результатом измерения является усредненное на интервале времени $T_{сч}$ значение частоты и, следовательно, можно ожидать, что погрешность измерения частоты будет зависеть от времени усреднения.

В зависимости от участка частотного спектра и допустимой погрешности для измерения частоты применяют различные способы и приемы измерения, основанные как на использовании методов непосредственной оценки, так и методов сравнения.

На основе метода сравнения реализуются осциллографические способы измерения частоты и гетеродинные частотомеры. К приборам, работающим по методу непосредственной оценки, относятся резонансные и электронно-счетные (цифровые) частотомеры. В настоящее время гетеродинные частотомеры полностью вытеснены электронно-счетными частотомерами, обладающими лучшими метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Резонансные частотомеры также вытесняются из эксплуатации, однако небольшая номенклатура таких приборов еще встречается в обращении. С учетом сказанного рассмотрим только принципы построения цифровых и резонансных частотомеров и осциллографический вариант измерения частоты методом сравнения.

Измерительные генераторы

Для измерения частоты методом сравнения необходимо иметь меру частоты и сравнивающее устройство, с помощью которого можно зафиксировать равенство измеряемой частоты и частоты воспроизводимой мерой или кратность этих частот.

В качестве образцовой меры частоты при технических измерениях обычно применяются измерительные генераторы.

Измерительный генератор представляет собой источник электрических сигналов определенной формы, параметры которых (частота, напряжение, мощность) могут регулироваться и поддерживаться с требуемой точностью. Измерительные генераторы применяются также для питания измерительных цепей, при настройке и испытаниях измерительной, радиоэлектронной и электронно-вычислительной ап-

паратуры, устройств автоматики и др. Номенклатура измерительных генераторов, выпускаемых промышленностью, охватывает диапазон от инфранизких до сверхвысоких частот, с пределами регулирования напряжения выходного сигнала от долей микровольта до десятков вольт.

В зависимости от *диапазона воспроизводимых частот и формы колебаний* измерительные генераторы подразделяются на генераторы сигналов низкочастотные, генераторы сигналов высокочастотные, генераторы импульсов, генераторы сигналов сложной формы, синтезаторы частоты, генераторы испытательных импульсов.

Основными нормируемыми метрологическими характеристиками измерительных генераторов являются пределы и диапазоны частот и уровней воспроизводимых сигналов, погрешность установки частоты, нестабильность частоты, погрешность установки выходного напряжения, пределы искажения формы сигнала.

При измерениях частоты методом сравнения применяются генераторы синусоидальных сигналов низких и высоких частот.

Генераторы сигналов низких частот являются источниками электрических колебаний синусоидальной формы в диапазоне частот от 20 Гц до 300 кГц. Имеется тенденция к расширению этого диапазона вниз до единиц герц и вверх до единиц мегагерц.

Структурная схема генератора сигналов низких частот представлена на рис. 3.23.

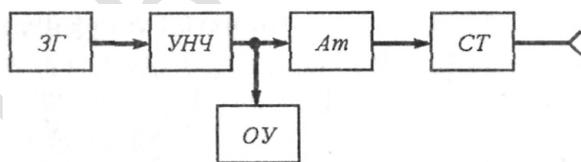


Рис. 3.23. Структурная схема генератора сигналов низких частот

Задающий генератор (*ЗГ*) вырабатывает напряжение синусоидальной формы требуемой частоты. Это напряжение поступает на усилитель (*УНЧ*), где осуществляется его усиление, а также плавная регулировка опорного уровня выходного напряжения, которое контролируется отсчетным устройством (*ОУ*). Атенюатор (*Ат*) позволяет ослаблять опорное выходное напряжение в заданное число

раз. Для передачи максимальной мощности от генератора в нагрузку должно быть выполнено условие согласования их сопротивлений, для чего в некоторых генераторах имеется согласующий трансформатор (*СТ*), имеющий переменный коэффициент трансформации.

Основным узлом генератора, определяющим его тип, является задающий генератор. В зависимости от *схемы задающего генератора* различают три типа измерительных генераторов низкой частоты: RC-генераторы, генераторы на биениях и генераторы с диапазонно-кварцевой стабилизацией частоты. Принципы действия задающих генераторов рассматриваются в специальных дисциплинах. Здесь отметим лишь, что наилучшие метрологические характеристики обеспечиваются генераторами с кварцевой стабилизацией частоты. Относительная погрешность установки частоты в генераторах этого типа составляет $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7}$, нестабильность частоты $3 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^{-9}$; коэффициент гармоник 1-2%.

Генераторы сигналов высоких частот являются источниками незатухающих или модулированных по амплитуде синусоидальных сигналов в диапазоне 0,1...100 МГц. Основным узлом генератора является задающий LC-генератор. Диапазон генерируемых частот разбивается на поддиапазоны. Переход от одного поддиапазона к другому осуществляется путем переключения катушек индуктивности. Плавная перестройка частоты в пределах поддиапазона производится конденсатором переменной емкости. Амплитудная модуляция осуществляется в модуляторе, представляющем собой широкополосный усилитель с нелинейным коэффициентом передачи, изменяемым модулирующим напряжением. Модуляция сигнала может осуществляться как от внутреннего, так и от внешнего источника модулирующего напряжения.

Метрологические характеристики высокочастотных измерительных генераторов с LC-контурами не столь высоки, как у стабилизированных кварцем генераторов низкой частоты. Относительная погрешность установки частоты примерно $1 \cdot 10^{-2}$; нестабильность частоты — $1 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$.

Существенное уменьшение погрешности и улучшение других метрологических характеристик достигается в измерительных генераторах, в которых задающий генератор выполнен на базе синтезатора частоты. Принцип работы синтезатора частоты основан на многократном преобразовании опорной частоты (f_0), получаемой от

генератора с кварцевой стабилизацией, в сетку дискретных выходных частот ($f_{\text{вых}}$). Таким образом, обеспечивается получение сигналов с высокой стабильностью частоты в диапазоне от единиц герц до десятков мегагерц с шагом дискретности установки частоты $0,1 \dots 0,01$ Гц. Диапазон частот выходных сигналов синтезаторов частоты 20 Гц... 50 МГц; погрешность установки опорной частоты — $1 \cdot 10^{-8}$.

Измерение частоты методом сравнения

Измерение частоты на основе сравнения ее с точно известной и высокостабильной мерой частоты получило широкое распространение благодаря своей простоте, пригодности для измерения практически в любом диапазоне частот и сравнительно высокой точности результата измерения.

Для измерения частоты f_x необходимо иметь источник образцовых частот (меру) $f_{\text{обр}}$ и сравнивающее устройство — индикатор равенства или кратности f_x и $f_{\text{обр}}$. При технических измерениях в качестве источников образцовых частот используются измерительные генераторы. Индикатором равенства или кратности частот обычно является электронно-лучевой осциллограф. При этом возможно измерение частоты при линейной либо при синусоидальной развертке в осциллографе.

При линейной развертке период сигнала измеряемой частоты f_x сравнивается либо с периодом напряжения развертки, либо с периодом меток времени от калибратора длительностью T_m , либо с периодом колебаний известной частоты. В первом случае период сигнала неизвестной частоты (T_x) определяется в делениях шкалы на экране осциллографа, а затем частота f_x вычисляется по формуле $f_x = 1/(m_1 T_x)$, где m_1 — коэффициент развертки. Во втором случае период меток (T_m) регулируют до тех пор, пока в пределах одного периода исследуемого напряжения не уложится их целое число n . Тогда измеряемая частота $f_x = 1/(n T_m)$. В третьем варианте на экране двухлучевого осциллографа одновременно наблюдают исследуемые колебания и колебания известной частоты. Изменяя известную частоту, добиваются визуального равенства периодов, что свидетельствует о равенстве частот (см. рис. 3.24 а). Преимуществом этих способов является возможность измерения частоты периодического сигнала любой формы, недостатком — большая погрешность, которая может достигать $\pm (5-10)\%$.

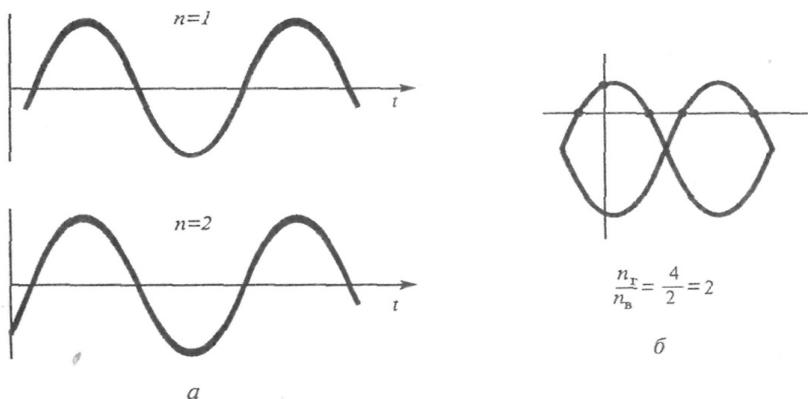


Рис. 3.24. Измерение частоты методом сравнения при линейной (а) и синусоидальной (б) развертке

При синусоидальной развертке (внутренний генератор развертки выключен) напряжение образцовой частоты ($f_{обр}$) подается в канал X осциллографа, а неизвестной (f_x) — в канал Y. Изменяя образцовую частоту, добиваются получения осциллограммы в виде неподвижной фигуры Лиссажу. Форма фигуры Лиссажу зависит от амплитудных и фазовых соотношений между напряжениями образцовой и измеряемой частот.

Определив кратность частот (по осциллограмме) по числу пересечений фигуры Лиссажу горизонтальной (n_r) и вертикальной (n_b) линиями (рис. 3.24 б) получают:

$$f_x = (n_r/n_b) \cdot f_{обр}$$

Напряжение частот f_x и $f_{обр}$ можно подавать и на противоположные входы. В этом случае перед $f_{обр}$ должно стоять обратное отношение. Синусоидальная развертка применяется до кратности 10, т. к. при большей кратности число пересечений трудно сосчитать. При увеличении кратности увеличивается и погрешность измерения. Так, если погрешность установки образцовой частоты равна $\Delta f_{обр}$, то $\Delta f_x = (n_r/n_b) \cdot \Delta f_{обр}$.

При нестабильности частот f_x или $f_{обр}$ получение неподвижной фигуры Лиссажу затрудняется; фигура медленно перемещается и

определение f_x возможно с большей погрешностью. Погрешность может быть уменьшена, если перейти к измерениям с многократными наблюдениями.

Резонансный частотомер

Резонансный частотомер (рис. 3.25) основан на явлении электрического резонанса в колебательном контуре. Колебательный контур LC через катушку связи $L_{св}$ возбуждается сигналом источника, частоту f_x колебаний которого необходимо измерить. С помощью прецизионного механизма настройки колебательный контур настраивают в резонанс с f_x .

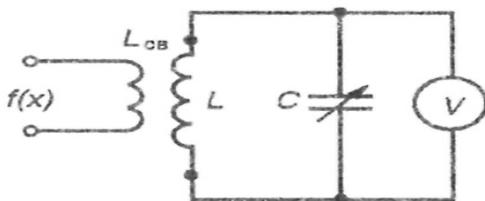


Рис. 3.25. Резонансный частотомер

В момент резонанса, фиксируемого по максимальному показанию индикатора, производится отсчет по шкале настройки колебательного контура.

При измерении высоких частот применяется колебательный контур с сосредоточенными постоянными. В момент наступления резонанса:

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}.$$

Для расширения диапазона измеряемых частот в частотомере применяются сменные катушки индуктивности. Конденсатор переменной емкости градуируется отдельно для каждой катушки. С целью повышения точности отсчета частоты и надежной фиксации резонанса механизм поворота ротора конденсатора делается с большим замедлением, а шкала разделена на большое число делений. В качестве индикатора резонанса используют электронный или детекторный вольтметр.

При измерениях ультравысоких и сверхвысоких частот в качестве резонансной системы применяется колебательный контур с распределенными постоянными. В зависимости от диапазона измеряемых частот он выполняется либо в виде отрезка коаксиальной линии, либо в виде объемного резонатора.

Из самого принципа измерения f_x сравнением ее с резонансной частотой колебательного контура следует, что резонансная кривая колебательного контура должна иметь достаточно четко выраженный максимум. Резонансная кривая тем острее, чем выше добротность (Q) контура. В зависимости от типа колебательного контура добротность составляет от нескольких сотен единиц у контуров с сосредоточенными постоянными, до 10 000...30 000 у контуров, выполненных в виде объемных резонаторов.

Неточность фиксации резонанса является одним из основных источников погрешности измерения. Если истинное значение напряжения при резонансе U_p , а отсчитанное по индикатору показание — $U_{изм}$, то относительная погрешность измерения частоты от неточности фиксации резонанса:

$$\frac{\Delta f}{f_p} = \pm \sqrt{\frac{(U_p / U_{изм})^2 - 1}{2Q}}$$

Другими источниками погрешности являются погрешности градуировки, погрешности механизма настройки, колебания температуры и влажности окружающей среды, недостаточная чувствительность индикатора резонанса. Тем не менее, при тщательном изготовлении резонансные частотомеры обеспечивают погрешность измерения от 0,01 до 0,5%.

Электронно-счетный частотомер

Принцип действия электронно-счетного частотомера основан на измерении частоты в соответствии с ее определением, т. е. на счете числа импульсов за интервал времени. Переменное напряжение, частоту f_x которого необходимо измерить, преобразуют в последовательность коротких импульсов с частотой следования, равной f_x . Если сосчитать число импульсов (N) за интервал времени ($T_{сч}$), то частота $f_x = N / T_{сч}$.

Структурная схема электронно-счетного частотомера изображена на рис. 3.26.

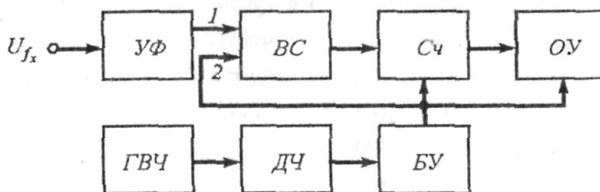


Рис. 3.26. Структурная схема электронно-счетного частотомера

Сигнал частоты f_x поступает на усилитель-формирователь импульсов (УФ), который преобразует синусоидальное напряжение измеряемой частоты в последовательность однополярных импульсов. Частота следования этих импульсов равна измеряемой частоте. Импульсы поступают на вход 1 временного селектора (ВС). На вход 2 селектора поступает импульс строго определенной длительности ($T_{сч}$). Длительность этого импульса задается ГВЧ с кварцевой стабилизацией и делителем частоты (ДЧ) с коэффициентом деления 10^n . Частота генератора с кварцевой стабилизацией $f_{кв}$ обычно равна 1 или 5 МГц, и, следовательно, период колебаний $T_{кв}$ равен 1 или 0,2 мкс. При такой длительности времени счета измерять частоты, равные или меньшие $f_{кв}$, невозможно. Поэтому после кварцевого генератора включают декадные делители частоты, на выходах которых образуются частоты в 10^n ($n = 1, 2, 3, \dots, 7$) раз ниже частоты генератора, т. е. 100, 10 и 1 кГц, 100, 10, 1 и 0,1 Гц. Таким образом, длительность импульса, определяющего время счета, можно устанавливать степенями от 10^{-5} до 10 с. Измеряемая частота при этом определяется по формуле $f_x = N \cdot 10^{-n} f_{кв}$. Импульс длительностью $T_{сч} = 10^n / f_{кв}$ формируется в блоке управления (БУ). Импульсы измеряемой частоты поступают на электронный счетчик импульсов (Сч) лишь тогда, когда ко входу 2 селектора приложен импульс длительностью $T_{сч}$. С выхода счетчика информация о числе импульсов (N), его заполнивших, в виде двоичного кода подается через дешифратор на цифровое отсчетное устройство (табло), на котором в цифровом виде фиксируется результат измерения в единицах частоты. Измерение производится повторяющимися циклами, задаваемыми БУ.

Одновременно с воздействием на временной селектор управляющее устройство выдает импульсы для автоматического сброса показаний цифрового индикатора и освобождения электронного счетчика от накопленной информации, а также для приведения в исходное состояние дешифратора и делителя частоты. Для того чтобы оператор имел возможность произвести отсчет показаний по цифровому табло, в управляющем устройстве предусмотрена блокировка временного селектора на некоторый интервал времени, в течение которого на табло сохраняются показания. Этот интервал времени называется временем индикации и может регулироваться оператором в пределах нескольких секунд. В частотомере предусмотрены автоматический и ручной режимы измерения. В автоматическом режиме счет импульсов повторяется каждый раз по окончании установленного времени индикации. В режиме ручного управления счет выполняется один раз при нажатии на кнопку; время индикации не ограничивается.

Относительная погрешность электронно-счетного частотомера при измерении частоты определяется выражением:

$$\delta = \delta_0 + \delta_{\text{нест}} + 1/(f_x \cdot T_{\text{сч}}),$$

где δ_0 — относительная погрешность установки частоты кварцевого генератора при выпуске из производства или после корректировки частоты после очередной поверки; $\delta_{\text{нест}}$ — относительная погрешность, вызванная нестабильностью частоты кварцевого генератора; $1/(f_x \cdot T_{\text{сч}})$ — относительная погрешность, обусловленная некрatностью периодов T_x и времени счета $T_{\text{сч}}$.

Последняя составляющая погрешности оценивается исходя из того, что при некрatности периодов T_x и $T_{\text{сч}}$ подсчет числа импульсов за время счета может быть произведен с точностью ± 1 импульс.

У современных электронно-счетных частотомеров величины δ_0 и $\delta_{\text{нест}}$ составляют примерно 10^{-8} и менее, и в силу малости при технических измерениях могут не учитываться.

Составляющая погрешности $1/(f_x \cdot T_{\text{сч}})$ зависит от измеряемой частоты и времени счета. В табл. 3.2 приведены значения этой составляющей в зависимости от времени счета для различных частот.

Из этой таблицы видно, что для измерения низких частот применение электронно-счетного частотомера нецелесообразно, т. к. погрешность измерения недопустимо велика.

Таблица 3.2

Время измерения $T_{сч}$, с	Погрешность $1/(f_x \cdot T_{сч})$		
	0,1 Гц	100 Гц	100 кГц
10^{-2}	10^3	1	10^{-3}
10^{-1}	10^2	10^{-1}	10^{-4}
1	10	10^{-2}	10^{-5}

Для того чтобы обеспечить приемлемую погрешность измерения низких частот, переходят к измерению периода с последующим пересчетом в частоту. Принцип измерения периода аналогичен рассмотренному принципу измерения частоты с той разницей, что временной селектор открывается импульсом, формируемым из напряжения, период T_x которого необходимо измерить. Длительность этого периода определяется подсчетом числа импульсов $f_{сч}$, получаемых от высокостабильного генератора. Если на счетчик прошло N импульсов с частотой следования $f_{сч}$, то измеряемый период:

$$T_x = N / f_{сч}$$

и, следовательно, частота:

$$f_x = 1 / T_x.$$

Составляющая относительной погрешности измерения периода при ошибке в подсчете числа импульсов за время счета ± 1 импульс будет равна $T_{кв} / T_x$, где $T_{кв}$ — период колебаний сигнала, поступающего из генератора с кварцевой стабилизацией.

Если период колебаний $T_{кв}$ равен $1 \text{ мкс} = 10^{-6} \text{ с}$, то при косвенном измерении частоты f_x (через период T_x) = 0,1 Гц мы получим относительную погрешность в ее определении, равную $10^{-6} \text{ с} / 10 \text{ с} = 10^{-7} = \pm 0,00001\%$. Прямое же измерение этой частоты, как видно из табл. 3.2, давало погрешность в 1000%.

3.10. Электронно-лучевой осциллограф

Электронно-лучевой осциллограф — универсальный измерительный прибор, применяемый для визуального наблюдения на экране электрических сигналов и измерения их параметров. Основная функция осциллографа заключается в воспроизведении в графическом виде электрических колебаний (осциллограмм) в прямоугольной системе координат. Чаще всего с помощью осциллографа наблюдают зависимость напряжения от времени, причем, как правило, осью времени является ось абсцисс, а по оси ординат откла-

двывается напряжение сигнала. С помощью осциллографа можно наблюдать периодические непрерывные и импульсные сигналы, непериодические и случайные сигналы, одиночные импульсы и оценивать их параметры.

По осциллограммам, получаемым на экране осциллографа, могут быть измерены частота и фазовый сдвиг, параметры модулированных сигналов, временные интервалы. На базе осциллографа созданы приборы для исследования переходных, частотных и амплитудных характеристик различных электро- и радиотехнических устройств. Широкое распространение электронно-лучевых осциллографов обусловлено возможностью их использования в полосе частот от нуля до десятков гигагерц, при напряжениях сигнала от десятков микровольт до сотен вольт.

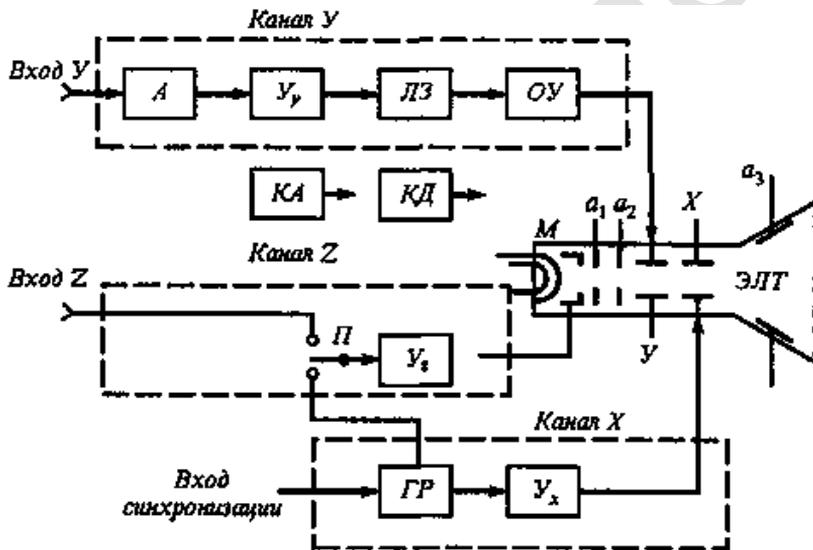


Рис. 3.27. Структурная схема электронно-лучевого осциллографа

В зависимости от назначения электронно-лучевые осциллографы подразделяются на универсальные, скоростные, запоминающие, стробоскопические и специальные. Отличаясь техническими характеристиками, схемными и конструктивными решениями эти осцил-

логграфы используют общий принцип получения осциллограмм. Наибольшее распространение получили универсальные осциллографы. Они позволяют исследовать электрические сигналы в полосе частот до 350 МГц и измерять параметры таких сигналов с приемлемой для практики погрешностью (5...10%). Упрощенная структурная схема универсального электронно-лучевого осциллографа приведена на рис. 3.27.

Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), представляющая собой стеклянную вакуумированную колбу, внутри которой размещена электронная пушка, отклоняющие пластины и люминесцентный экран. Полагая, что читатель знаком с устройством электронной пушки из курса физики, отметим лишь, что назначением ее является формирование узкого электронного пучка, при попадании которого на люминесцентный экран на последнем возникает светящееся пятно. Электронный пучок (луч) проходит между двумя парами взаимно перпендикулярных металлических отклоняющих пластин: вертикально (Y) и горизонтально отклоняющих (X). Если к отклоняющим пластинам приложить электрическое напряжение, то между ними будет существовать электрическое поле, вызывающее отклонение луча в ту или иную сторону. Если электрическое напряжение приложено к горизонтально отклоняющим пластинам, то световое пятно на экране трубки будет отклоняться вдоль оси X; если же напряжение приложено к вертикально отклоняющим пластинам, то пятно будет перемещаться по оси Y. Если теперь сфокусировать электронный луч так, чтобы световое пятно расположилось в точке 0 (рис. 3.28), а затем к пластинам Y приложить исследуемое напряжение, например, синусоидальное, а к пластинам X — пилообразное напряжение, то под совместным воздействием двух напряжений луч трубки вычертит на экране осциллограмму, отражающую такую зависимость:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

После спадания пилообразного напряжения до нуля световое пятно возвратится в точку 0. Пилообразное напряжение формирует так, чтобы время обратного хода развертки ($t_{обр}$) было во много раз меньше времени прямого хода ($t_{пр}$), поэтому обратный ход луча на экране трубки не просматривается. Для того чтобы изображение исследуемого напряжения отражало истинный характер сигнала, не-

обходимо выполнение двух условий. Первое — чтобы отклонения по оси X и оси Y были прямо пропорциональны напряжению, прилагаемому к соответствующей паре пластин, и второе — чтобы длительность прямого хода развертки (t_{np}) была в точности равна периоду исследуемого напряжения (T) либо выполнялось условие $t_{np} = mT$, где m — целое число. В первом случае на экране осциллографа будет наблюдаться один период, а во втором — m периодов исследуемого напряжения.

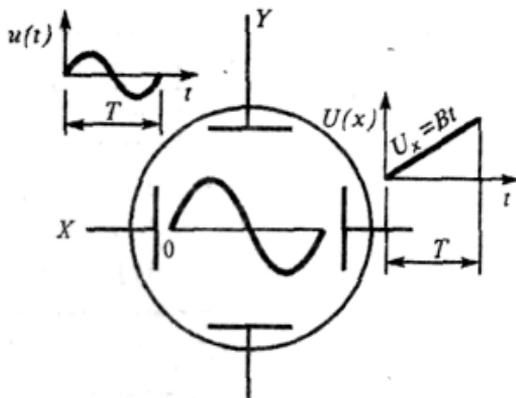


Рис. 3.28. Получение изображения на экране электронно-лучевой трубки

Вернемся к рассмотрению структурной схемы осциллографа (см. рис. 3.27). Кроме электронно-лучевой трубки она содержит канал вертикального отклонения луча (канал Y), канал горизонтального отклонения луча (канал X), канал управления яркостью луча (канал Z), калибраторы амплитуды (КА) и длительности (КД).

По каналу Y поступает исследуемый сигнал $u(t)$, вызывающий вертикальное отклонение луча в электронно-лучевой трубке. В этот канал входят: аттенюатор (A) для ослабления больших сигналов; предварительный усилитель (U_y) для усиления слабых сигналов; линия задержки (ЛЗ) для небольшой временной задержки сигнала; окончательный усилитель (ОУ), на выходе которого вырабатывается симметричный противофазный сигнал, поступающий на вертикально отклоняющие пластины трубки.

По каналу X на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки поступает напряжение развертки. Основным узлом этого канала является генератор развертки (ГР), вырабатывающий напряжение, изменяющееся по закону $U_x(t) = Vt$ (пилообразное напряжение). Напряжение развертки может быть синхронизировано с исследуемым напряжением, либо с напряжением сети, либо с сигналом от внешнего источника. В канале X имеется усилитель горизонтального отклонения (U_x), вход которого подключен к выходу генератора развертки. Выходное (двухфазное) напряжение с выхода усилителя поступает на пластины горизонтального отклонения.

Для того чтобы обеспечить возможность измерения параметров исследуемых сигналов в структуре осциллографа, имеются калибраторы длительности и амплитуды. Калибраторы представляют собой генераторы напряжений с точными значениями амплитуды и частоты. Эти напряжения подаются с выхода калибратора амплитуды на вход Y для установки и контроля масштабов отклонений по оси Y (В/см, В/деление), с выхода калибратора длительности — на вход X для контроля масштаба по оси X (мс/см, с/см).

В схеме осциллографа предусмотрены также устройства и органы регулировки и настройки, обеспечивающие удобство работы с прибором (смещение луча по осям X и Y, регулировка яркости, фокусировка светового пятна и др.).

Электронные осциллографы характеризуются рядом технических и метрологических характеристик. К наиболее важным относятся:

- чувствительность по каналам Y и X (мм/В);
- полоса пропускания, т. е. диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления канала Y уменьшается не более чем на 3 дБ по отношению к некоторой опорной частоте;
- диапазон изменения длительности развертки;
- входное сопротивление и входная емкость канала Y;
- параметры, характеризующие погрешности измерения напряжения и интервалов времени.

3.11. Измерение фазового сдвига

Для измерения фазового сдвига между напряжением и током нагрузки в цепях промышленной частоты применяют электродинамические фазометры классов точности 0,2; 0,5.

В симметричных трехфазных цепях коэффициент мощности может измеряться специальными трехфазными фазометрами, классы точности которых 1,5; 2,5.

В несимметричной трехфазной цепи измеряют фазовые сдвиги между напряжением и током в каждой фазе отдельно. При этом токовые зажимы фазометра включают последовательно в фазу трехфазной цепи, а потенциальные — между фазой и нулевой точкой трехфазной цепи. Если нулевая точка недоступна, то ее создают искусственно.

Большое распространение получили цифровые фазометры, имеющие частотный диапазон входных напряжений до 150 МГц. Приведенная погрешность цифровых фазометров $\pm(0,1... 0,5)\%$.

Для измерения фазового сдвига применяют электронно-лучевые осциллографы. Проще всего измерения фазового сдвига выполняются с помощью двухлучевых, или двухканальных, осциллографов. В этом случае на экране получают изображение двух напряжений, что дает возможность измерить временной сдвиг t_x между напряжениями и период T_x и оценить фазовый сдвиг, $^\circ$, по формуле $\varphi_x = 360 \cdot t_x / T_x$.

Погрешность измерения φ_x определяется погрешностью измерения (t_x и T_x) и может достигать $\pm(5...10)\%$.

Фазовый сдвиг может быть измерен также с использованием фигур Лиссажу. На рис. 3.29 показаны фигуры Лиссажу, получающиеся при подаче на два входа X и Y осциллографа двух синусоидальных напряжений U_x и U_y одинаковой частоты при разных фазовых сдвигах.

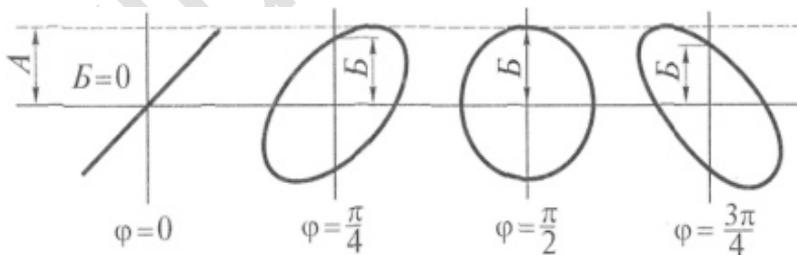


Рис. 3.29. Фигуры Лиссажу, используемые для измерения фазовых сдвигов

Значение фазового сдвига $\varphi = \arcsin(B/A)$, где A и B — отрезки осей координат, определяемые по изображению. Погрешность определения фазового сдвига составляет $\pm(5...10)\%$.

Более высокую точность измерения можно получить, используя электронно-лучевой осциллограф как нуль-индикатор. В этом случае между источником одного напряжения (положим U_x) и соответствующим входом осциллографа (X) включается фазовращающее устройство. Фазовый сдвиг регулируется фазовращающим устройством до тех пор, пока фигура Лиссажу на экране осциллографа не превратится в прямую линию. Измеряемый фазовый сдвиг в этом случае отсчитывается по шкале фазовращателя.

Для измерения фазового сдвига и коэффициента мощности (или косинуса угла сдвига) можно воспользоваться косвенным методом с помощью трех приборов: амперметра, вольтметра и ваттметра. Недостатками этого метода являются суммирование погрешностей отдельных средств измерений и необходимость одновременного отсчета показаний трех приборов и вычисления значения искомой величины.

3.12. Анализ спектра сигналов

В радиотехнических устройствах протекают электрические процессы, имеющие специфический характер. Реальный радиотехнический сигнал как физический объект аналитического и практического исследований достаточно сложен. Чтобы произвести анализ прохождения сигнала через радиотехнические цепи, необходимо его представить в удобной математической форме. В теории сигналов широкое применение нашли два способа математического и физического представления электрических сигналов: временной и спектральный. Такое представление возможно вследствие принципа дуальности (двойственности, взаимосвязи) частоты и времени, поскольку $f = 1/T$. При временном способе анализа сигнал отражается непрерывной функцией времени или совокупностью элементарных импульсов, следующих друг за другом через определенные интервалы времени. Спектральный способ основан на представлении (аппроксимации, декомпозиции) сигнала в виде суммы гармонических составляющих разных, обычно кратных друг другу частот.

Процессы в электрических цепях получаются тем сложнее, чем более сложной является форма сигналов. В этих случаях часто становится эффективным и полезным спектральное представление сигналов.

Общие сведения

Фундаментальная идея спектрального представления сигналов восходит к временам более чем 200-летней давности и принадлежит знаменитому французскому физику и математику Фурье. В начале XIX в. Фурье удалось доказать оригинальную теорему, в которой он показал, что любое изменение во времени некоторой периодической функции можно представить в виде конечной или бесконечной суммы ряда гармонических колебаний с разными амплитудами, частотами и начальными фазами. В радиотехнике этой функцией может быть, в частности, ток или напряжение в некоторой электрической цепи.

Столь простое представление сложного изменения во времени какой-либо физической величины (в данном случае электрического сигнала) в виде суммы ряда простейших гармонических колебаний могло показаться на первый взгляд математическим трюком. Но это не трюк. Несложный пример доказательства рассуждений Фурье показан на рис. 3.30.

Здесь периодическая, достаточно сложная по форме кривая напряжения $u(t)$ (рис. 3.30 а) — это сумма двух синусоид равной амплитуды, но разных частот и начальных фаз (рис. 3.30 б, в): основной $u_1(t)$ (первой гармоники) и удвоенной $u_2(t)$ по отношению к ней частоты (рис. 3.30 б, в).

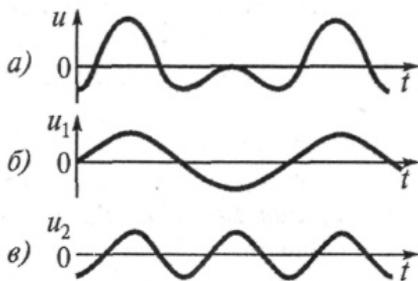


Рис. 3.30. К анализу Фурье: а — сложное колебание; б, в — первый и второй суммируемые сигналы

Для периодических сигналов Фурье ввел разложение по различным видам рядов — тригонометрическим, комплексным и т. д. Фурье также

доказал, что непериодические (импульсные) сигналы можно описать с помощью двух его преобразований — прямого и обратного.

Итак, практически любой сигнал можно представить в виде суммы гармонических составляющих, амплитуды и частоты которых могут быть определены с помощью прямого преобразования Фурье. Этот спектр гармонических составляющих можно изобразить графически, если по оси абсцисс откладывать обозначение частот, а по оси ординат — величины амплитуд гармоник. На рис. 3.31 наглядно показано временное и спектральное представление достаточно сложного по форме сигнала.

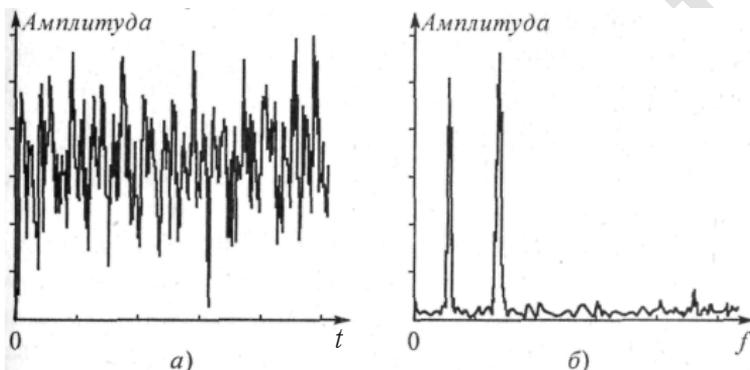


Рис. 3.31. Представление сигнала:
а — временная диаграмма; б — спектр

Анализ спектра включает измерение как амплитуд гармоник — спектр амплитуд, так и их начальных фаз — спектр фаз. Однако для многих практических задач достаточно знать лишь спектр амплитуд. Поэтому под анализом спектров обычно понимают нахождение спектра амплитуд исследуемого сигнала.

Автоматическое представление спектра сигналов осуществляется специальными приборами — анализаторами спектра.

Анализаторы спектра

Анализаторы спектра электрических сигналов можно классифицировать по ряду специфических признаков:

- по способу анализа — последовательные, параллельные (одновременные) и смешанные;

- по типу индикаторного устройства — осциллографические, с самописцем;
- по диапазону частот — низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные, широкодиапазонные.

Основными метрологическими характеристиками анализаторов являются: разрешающая способность, время анализа и погрешности измерения частоты и амплитуды. Метрологические характеристики анализатора определяются его схемой.

Для спектрального анализа непериодических сигналов (функций) используют аппарат интегрального преобразования Фурье. При этом применяется известная формула прямого преобразования Фурье, характеризующая спектральную плотность непериодического (импульсного) сигнала:

$$S(j\omega) = S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt.$$

Однако есть одно обстоятельство, общее для всех схем анализаторов, ограничивающее точность анализа спектра сигнала. Преобразование Фурье широко применяют при аналитических исследованиях физических процессов, если выполняются условия Дирихле и абсолютной интегрируемости. Для реальных физических процессов эти условия обычно выполняются.

Преобразования Фурье предполагают, что процесс $u(t)$ задан на всей оси времени от $-\infty$ до $+\infty$. Спектр $S(\omega)$ определяется всем закончившимся процессом, является функционалом всего процесса. Однако при измерениях наблюдают процессы на конечном интервале времени T_a (времени анализа, наблюдения), т. е. не закончившиеся во времени. В этом случае выражение для спектральной функции преобразуется в следующую формулу для текущего частотного спектра:

$$S(j\omega, T_a) = S(\omega, T_a) = \int_0^{T_a} u(t)e^{-j\omega t} dt.$$

Иными словами, текущая спектральная плотность зависит от времени анализа и форма текущего спектра в общем случае отличается от истинного тем больше, чем меньше T_a .

Отличие текущего спектра от спектра закончившегося процесса зависит от того, проявились ли за время анализа T_a все характерные особенности сигнала. Если исследуемый анализатором сигнал периодический с периодом следования T , то необходимо, чтобы $T_a \ll T$.

При измерении спектра нижний предел является конечным, т. е. интегрирование (усреднение) производится в интервале от 0 до T_a . За счет этого возникает погрешность определения составляющих спектра, связанная с методом измерений, т. е. методическая погрешность. Эта погрешность для ряда технических применений не играет особой роли, в других случаях ее необходимо учитывать и исследовать.

Практически все приборы, применяемые для анализа спектра сигналов, можно условно разделить на аналоговые и цифровые. Несмотря на многие достоинства и возможности цифровых анализаторов, аналоговые анализаторы еще широко применяются, особенно в верхней части высокочастотного и СВЧ диапазонов. Вместе с тем современные аналоговые анализаторы спектров содержат и цифровые устройства.

Анализ спектра электрических сигналов используется для количественной оценки искажений импульсных и периодических сигналов, нелинейности различных объектов в задачах распознавания образов и производится с помощью анализаторов спектра и так называемых селективных вольтметров.

Текущий спектр, являясь функцией частоты и времени измерения, приближается к истинному спектру при увеличении времени измерения.

Практически во всех аналоговых анализаторах выделение гармонических составляющих сигнала производится узкополосными фильтрами. Этот метод реализуется двумя способами: параллельного и последовательного анализа сигнала. Основным элементом таких приборов — полосовой фильтр (высокодобротный резонатор) с узкой полосой пропускания, служащий для выделения отдельных составляющих или узких диапазонов исследуемого спектра.

Для определения спектра периодического несинусоидального сигнала измеряют амплитуды и частоты его гармонических составляющих. При этом применяют два способа анализа спектра: последовательный и параллельный. Последовательный способ анализа предполагает поочередное определение спектральных составляющих, параллельный способ — одновременное определение составляющих

спектра сигнала. Преимущественное распространение получил последовательный способ анализа спектра как более простой.

Для высокочастотных колебаний и одиночных импульсов применяются анализаторы спектра, использующие параллельный способ анализа.

Выпускаются анализаторы спектра в диапазоне частот 10 Гц... 40 ГГц с полосой пропускания фильтров от единиц герц в низкочастотных анализаторах до 300 кГц и более в анализаторах сверхвысоких частот. Время анализа 0,01...20 с, погрешность измерения частоты 1...2%, амплитуды — 5...15%,

Анализ спектра электрических сигналов производят также с помощью селективных вольтметров, которые в отличие от анализаторов спектра измеряют только напряжение отдельных гармонических составляющих сигнала на установленной частоте. Частотный диапазон таких вольтметров — 20 Гц...30 МГц. Погрешность измерения — 5...15%.

Иногда определяют не отдельные гармонические составляющие сигнала, а коэффициент гармоник:

$$k_r = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} / U_1$$

либо коэффициент нелинейных искажений:

$$k = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} / \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2},$$

где U_1, U_2, \dots, U_n — действующие значения напряжений всех гармоник соответственно; коэффициенты k_r и k связаны соотношением $k_r = k / (1 - k^2)^{1/2}$. При малых искажениях ($k < 0,1$) $k_r \approx k$.

Измерители нелинейных искажений выпускаются для работы в диапазоне частот исследуемого сигнала 20 Гц...200 кГц. Коэффициент нелинейных искажений измеряется в пределах 0,03... 100% при входных напряжениях от 0,1 до 100 В. Погрешность измерения — 4... 10%.

3.13. Автоматизация измерений

Развитие научных исследований, разработка новых устройств и систем с использованием современных технологий, усложнение их производства, а также повышение требований к точности измерений и их быстрдействию привели к необходимости измерять и контро-

лизовать одновременно от сотен до нескольких тысяч различных физических величин. Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке таких больших объемов измерительной информации стала главной причиной появления автоматизированных средств измерений и контроля.

Автоматизация процесса измерений дает значительный выигрыш во времени и в большинстве случаев значительно повышает точность измерений.

Общие сведения

Современные средства измерений в основном являются цифровыми и поэтому достигли достаточно высокого уровня развития и имеют наивысшую точность. Именно переход к построению цифровых средств измерений привел к созданию автоматизированных средств измерения.

Как уже отмечалось в начале главы, по уровню автоматизации все средства измерений делятся на три основные группы: неавтоматические, позволяющие непосредственно оператору провести измерения; автоматизированные, способные провести в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции; автоматические, производящие в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей, хранением данных и выработкой управляющих сигналов.

В настоящее время все большее распространение получают автоматизированные и автоматические средства измерений. Это связано с широким использованием в средствах измерений электронной, микропроцессорной и компьютерной техники. Все эти средства часто называют обобщенным термином «автоматизированные средства измерений».

К автоматизированным средствам измерений относят автономные многофункциональные цифровые приборы на основе микропроцессоров и измерительные системы.

Автономные многофункциональные цифровые приборы

Автономные многофункциональные цифровые приборы содержат микропроцессор, работают по жесткой программе и предназначены для измерений заданных физических величин, а также параметров сигналов или цепей. Это цифровые приборы, в которых часть операций осуществляется автоматически.

В автономных микропроцессорных приборах отдельной магистрали нет и все элементы подключают к магистрали микропроцессора. В них может быть не предусмотрено программирование или перепрограммирование микропроцессора в процессе работы. Необходимые программы обработки хранятся в ПЗУ, по мере надобности оператор вызывает их с помощью клавиатуры.

Микропроцессор может выполнять сервисные и вычислительные функции, а также самодиагностику прибора в целом. К сервисным функциям относят выбор диапазона измерений, переключение диапазонов, определение полярности входного напряжения, коммутацию входных цепей. В частности, в осциллографах автоматически устанавливается длительность развертки, осуществляется ее синхронизация, выбор масштаба по оси ординат. К сервисным функциям можно отнести и некоторые операции по коррекции погрешностей: калибровку прибора, коррекцию смещения нулевого уровня (так называемого «дрейфа нуля») в УПТ.

Вычислительные функции микропроцессора заключаются в статистической обработке результатов измерений: определении среднего значения и СКО. Возможно получение математических функций измеряемой величины: ее умножение и деление на константу, вычитание констант, что удобно при введении поправок, представлении измеряемой величины в логарифмическом масштабе. Часть сервисных функций можно реализовать и без микропроцессора на жесткой логике, однако вычислительные функции могут быть выполнены только с помощью микропроцессоров.

Автономные микропроцессорные приборы позволяют решать программным методом часть задач, решаемых в обычных приборах аппаратными средствами. В частности, для измерений амплитудного, средневыврямленного и среднего квадратического значений напряжения аппаратными методами необходимы соответствующие преобразователи. Микропроцессорным прибором ту же задачу можно решить, преобразовав аналоговый измеряемый сигнал в цифровой с помощью АЦП, и затем по соответствующим программам вычислить требуемые параметры сигнала. Возможности прибора можно расширить, нарастив программное обеспечение, например, введя программы для спектрального анализа и статистической обработки. При этом аппаратная часть, содержащая АЦП, не усложняется, а меняется только программное обеспечение. Поэтому в ряде случаев ми-

кропроцессорные приборы можно делать многофункциональными, что позволит сократить парк средств измерений, необходимых для научных и производственных целей.

Измерительные системы

Измерительные системы (ИС) — это совокупность функционально объединенных средств измерений, компьютерной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления.

Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для измерения большого количества параметров и контроля технологического процесса производства какого-либо изделия, например изделий микроэлектроники.

Назначение любой измерительной системы, необходимые функциональные возможности, технические параметры и характеристики в решающей степени определяются объектом исследования, для которого данная система создается. Структура современных ИС довольно разнообразна и быстро развивается, существенно зависит от решаемых задач, и их деление в настоящее время не имеет достаточно полного и четкого толкования. Приведем одну из возможных на данный момент упрощенных классификаций (рис. 3.32).

Возможны и другие классификации.

Так, в зависимости от выполняемых функций измерительные системы можно разделить на три основных вида: измерительные системы измерения и хранения информации (условно назовем их прямыми измерительными системами), контрольно-измерительные (автоматического контроля) и телеизмерительные системы. К ИС относятся также системы распознавания образов и системы технической диагностики. По числу измерительных каналов измерительные системы подразделяются на одно-, двух-, трех- и многоканальные (многомерные).

Наиболее бурно в настоящее время разрабатываются и внедряются прямые измерительные системы. Иногда эти системы называют гибкими измерительными системами (ГИС).

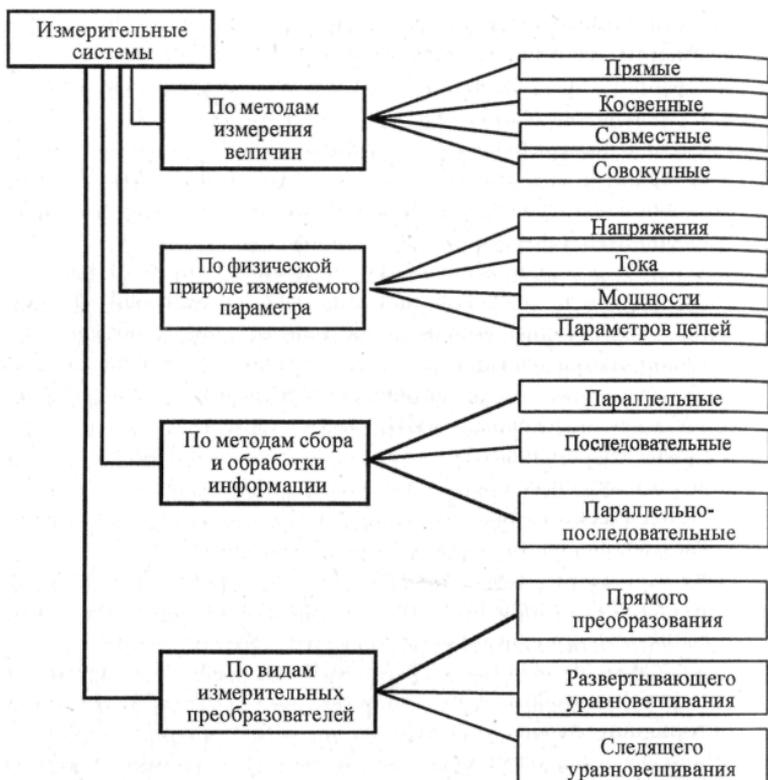


Рис. 3.32. Упрощенная классификация измерительных систем

Основная особенность прямых измерительных систем — возможность программным способом перестраивать систему для измерений различных физических величин и менять режим измерений. Никаких изменений в аппаратной части при этом не требуется.

Прямые измерительные системы можно условно классифицировать на информационно-измерительные (ИИС); измерительно-вычислительные комплексы (ИВК); компьютерно-измерительные (КИС).

КИС представляет собой микроЭВМ со встроенной в нее измерительной платой. В отличие от микропроцессорных приборов в КИС пользователь получает доступ к обширным фондам прикладных про-

грамм, может использовать внешнюю память большой емкости и различные устройства документирования результатов измерений.

Самым широким классом прямых измерительных систем являются информационно-измерительные системы (иногда их обозначают термином «измерительные информационные системы», аббревиатура одинакова — ИИС).

Назначение ИИС определяют как целенаправленное оптимальное ведение измерительного процесса и обеспечение смежных систем высшего уровня достоверной информации. Основные функции ИИС — получение измерительной информации от объекта исследования, ее обработка, передача, представление информации оператору или (и) компьютеру, запоминание, отображение и формирование управляющих воздействий.

Информационно-измерительная система должна управлять измерительным процессом или экспериментом в соответствии с принятым критерием функционирования; выполнять возложенные на нее функции в соответствии с назначением и целью; обладать требуемыми показателями и характеристиками точности, помехоустойчивости, быстродействия, надежности, пропускной способности, адаптивности, сложности и пр.; отвечать экономическим требованиям, предъявляемым к способам и форме представления информации, размещения технических средств; быть приспособленной к функционированию с измерительными информационными системами смежных уровней иерархии и другими ИИС, т. е. обладать свойствами технической, информационной и метрологической совместимости, а также допускать возможность дальнейшей модернизации и развития.

Процессом функционирования информационно-измерительной системы, как и любой другой технической системы, является целенаправленное преобразование входной информации в выходную. Это преобразование выполняется либо автоматически с помощью аппаратуры технического обеспечения, либо совместно — оперативным персоналом и аппаратурой технического обеспечения в сложных ИИС, ИВК и КИС.

Применение современных средств схемотехники (микросхем, микропроцессоров и т. д.) коренным образом меняет принципы построения ИИС. Кроме того, методы достаточно обоснованного определения информационных потоков дают возможность уменьшить их избыточность. Это позволяет ставить задачу о возможно максималь-

ном переносе обработки измерительной информации к месту ее формирования, т. е. перейти к конвейерной обработке измерительной информации в распределенной ИИС. В целом такая система состоит из следующих основных частей: системы первичных преобразователей (датчиков), устройств сбора и первичной обработки информации, средств вторичной обработки информации, устройств управления и контроля, устройств связи с другими системами объекта, накопителей информации.

По организации алгоритма функционирования различают следующие виды информационно-измерительных систем:

- с заранее заданным алгоритмом работы, правила функционирования которых не меняются, поэтому их можно использовать только для исследования объектов, работающих в постоянном режиме;
- программируемые, меняющие алгоритм работы по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;
- адаптивные, чей алгоритм работы, а часто и структура, изменяются, приспособляясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта;
- интеллектуальные, обладающие способностью к перенастройке в соответствии с изменяющимися условиями функционирования и способные выполнять все функции измерения и контроля в реальном масштабе времени.

Математическое, программное и информационное обеспечение входит в состав только ИИС с цифровыми вычислительными комплексами.

Резюме

При измерениях, испытаниях и контроле всегда используются средства измерений. Средства измерений чрезвычайно многообразны. По конструктивному исполнению и форме представления измерительной информации средства измерений подразделяются на эталоны единиц величин, измерительные преобразователи, меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы. По уровню автоматизации все средства измерений делятся на три основные группы: неавтоматические; автоматизированные и автоматические. В настоящее время все большее распространение

получают автоматизированные и автоматические средства измерений, что связано с широким использованием в средствах измерений электронной, микропроцессорной и компьютерной техники.

В последнее время получают распространения приборы, называемые «виртуальными». Они состоят из персонального компьютера, платы сбора данных и программного обеспечения. Плата обеспечивает преобразование аналогового измерительного сигнала в цифровой, функции его обработки выполняет компьютер. Для наглядного отображения информации и удобства управления процессом измерений на экране монитора воспроизводится лицевая панель измерительного прибора со всеми элементами настройки, управление которыми производится при помощи клавиатуры и «мыши».

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятия «средство измерений».
2. Завершите предложение: «По конструктивному исполнению и форме представления измерительной информации средства измерений подразделяются на _____».
3. Что объединяет многочисленные измерительные преобразователи?
4. Какие приборы называют «виртуальными»?
5. На какие группы по уровню автоматизации делятся все средства измерений?
6. Приведите классификацию средств измерений по их роли в процессе измерений и выполняемым функциям.
7. Перечислите основные виды сигналов, используемых в средствах измерений.
8. Для измерения каких физических величин используют метод вольтметра-амперметра?
9. Поясните применение метода непосредственной оценки при измерении сопротивления постоянному току.
10. Назовите причины появления систематических погрешностей.
11. Какие методы измерений используются при построении электронных омметров?
12. Поясните работу моста постоянного тока.
13. Для измерения каких величин применяют мосты переменного тока?
14. Поясните принцип работы цифрового средства измерений, в котором реализован метод дискретного счета.

15. Приведите структурную схему генератора низких частот и объясните работу генератора.
16. Поясните принцип работы электронно-счетного частотомера.
17. Поясните работу универсального электронно-лучевого осциллографа.
18. По каким специфическим признакам можно классифицировать анализаторы спектра электрических сигналов?
19. Приведите упрощенную классификацию измерительных систем.

Глава 4. ИСПЫТАНИЯ

§ 1. Общие сведения о современных испытаниях и их отличие от технического контроля

Основные термины и определения в области испытаний и контроля были представлены в первой главе. Здесь мы приведем некоторые дополнительные сведения о современных испытаниях и контроле на примере сложной техники, например, летательного аппарата (ЛА).

Очевидно, что процессы испытания и контроля в этом случае занимают особо важное место, поскольку должны обеспечить высокую надежность ЛА — это напрямую связано с жизнью людей. Поэтому в настоящее время трудоемкость испытательных и контрольных процессов составляет 20-40% общей трудоемкости изготовления ЛА и постоянно возрастает. Контроль и испытания проводятся на всех этапах жизненного цикла ЛА, начиная с проверки исходных свойств материалов и кончая запуском и эксплуатацией.

Под *испытаниями* понимается экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта: а) в процессе различного вида воздействий на него; б) при его функционировании; в) при моделировании объекта и (или) воздействий. Таким образом, при любых испытаниях должны быть установлены характеристики свойств продукции (объекта испытаний), т. е. параметры или (и) показатели качества: назначения, надежности, эргономические, технологические, экологические, безопасности и др. Номенклатура показателей качества продукции детально представлена в ГОСТ 22851. При этом различают два вида параметров и показателей качества объекта испытаний (ОИ):

- *измеряемые* — физические величины и производные от них;

- *неизмеряемые* (например, плотность компоновки, удобство пользования, рациональность формы и др.).

Измеряемыми, контролируруемыми и управляемыми являются параметры следующих видов: температура и тепло, давление и вакуум, влажность, линейные и угловые, световые и оптические, акустические, электрические и магнитные, электромагнитные и радиотехнические; уровень, объем, расход, состав и концентрация физико-химических свойств вещества; сила, масса, скорость и ускорение; ионизирующее излучение; аэродинамические и комбинированные параметры и др.

Параметры объекта испытаний могут быть: постоянной или случайной величиной; детерминированной или случайной функцией.

Характеристики свойств объекта при испытаниях могут *оцениваться*, если задачей испытаний является получение количественных или качественных оценок, или *контролироваться*, если задача испытаний заключается только в установлении соответствия характеристик объекта заданным требованиям. В последнем случае испытания сводятся к контролю. Поэтому ряд видов испытаний являются контрольными.

Для контроля характеристик необходимо задать их требуемые значения. Последние указывает разработчик объекта в документации (чертежах, технологии, технических условиях и т. п.). Проверка соответствия объекта (продукции или процесса) установленным техническим требованиям называется *техническим контролем*. Анализируя данное определение технического контроля, можно заключить, что для всякого контроля характерно осуществление двух основных этапов:

- 1) получение информации о фактическом состоянии объекта, о признаках и показателях его свойств;
- 2) сопоставление этой информации с заданными требованиями и установление соответствия фактических данных требуемым значениям.

В основном эти этапы разграничены. Однако в ряде случаев граница неразличима во времени. В таких случаях первый этап может быть выражен нечетко или вообще не наблюдаться. Характерным примером является контроль размера калибром, заключающийся в сопоставлении фактического значения размера с предельно допустимым.

Информация второго этапа используется для выработки соответствующих управляющих воздействий на контролируемый объект. В этом смысле всякий контроль всегда активен. Первичная информация сопоставляется с техническими требованиями, записанными в нормативной документации, с признаками контрольного образца, с данными, зафиксированными при помощи калибров, и т. д.

На стадии разработки продукции технический контроль заключается, например, в проверке соответствия опытного образца и (или) разработанной технической документации правилам оформления и техническому заданию.

На стадии изготовления техническому контролю подвергаются качество, комплектность, упаковка, маркировка и количество предъявляемой продукции, ход (состояние) производственных процессов.

На стадии эксплуатации продукции технический контроль заключается, например, в проверке соблюдения требований эксплуатационной и ремонтной документации.

Объектами технического контроля являются предметы труда (изделия, материалы, техническая документация и т. п.), средства труда (например, оборудование предприятий) и трудовые (например, производственные) процессы. Контроль осуществляется различными методами. Последние основаны на физических, химических, биологических и других явлениях и зависимостях (законах, принципах), применяемых при получении первичной информации об объекте контроля.

Как правило, кроме объекта контроля и исполнителя (контролера) для первого этапа контроля, т. е. получения первичной информации об объекте контроля, необходимо привлечение дополнительных изделий и (или) материалов, главным образом для преобразования информации, поступающей от объекта контроля. Эти дополнительные изделия и материалы называются *средствами контроля*. К ним относятся соответствующее оборудование, измерительные приборы, приспособления, инструмент, реактивы и т. д.

Для контроля должна быть определена *контрольная точка*, которая может быть частью (элементом) контролируемого объекта или находиться на некотором удалении от него (например, при контроле суммарной герметичности). В контрольной точке обычно размещают датчик или производят отбор пробы вещества.

Для получения результата контроля, т. е. оценки качества изделий, их годности или негодности, сортности и т. д., требуется опреде-

ление параметров отдельных показателей качества продукции (ПКП). При этом возможны два вида контроля. В первом из них предполагается необходимым контролировать соответствие значений ПКП (физических величин) установленным требованиям. Иначе говоря, в процессе такого контроля можно (нужно) использовать измерительные процедуры. Такой контроль называют *измерительным (количественным)*. При втором виде контроля требуется лишь фиксировать наличие отдельных ПКП в определенном поле допуска, ограниченном его верхней и нижней границами, т. е. по существу, осуществлять качественную оценку продукции. Подобный контроль называют *качественным*. В процессе измерительного (количественного) контроля используются средства измерений (СИ), а при качественном контроле — индикаторные средства.

К объектам испытаний (ОИ) помимо изделий (отдельных деталей, соединений, агрегатов, изделий в целом, их моделей) относятся также материалы и процессы. Главная цель испытаний объекта состоит в том, что по их результатам принимается то или другое решение относительно объекта: о его годности или браковке, о предъявлении на следующие испытания, о возможности серийного выпуска и пр.

В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектами последних могут быть единичное изделие или партия изделий, подвергаемая сплошному или выборочному контролю, отдельный образец или партия продукции. Объектом испытаний может также быть макет, или модель изделия. Решение по полученным результатам будет относиться в данном случае непосредственно к макету (модели). Однако если при испытании какого-либо изделия приходится некоторые его элементы заменять моделями или отдельные характеристики изделия определять на моделях, то ОИ остается само изделие, хотя оценку его характеристик получают на основе испытаний модели.

По определению испытания предполагают наличие двух основных элементов: воздействия на объект и определения характеристик, которое может производиться как при функционировании объекта, так и при отсутствии такового.

Условия испытаний — совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при их проведении. К условиям испытаний относятся внешние воздействующие

факторы (ВВФ) как естественные, так и искусственно создаваемые, а также внутренние воздействия, возникающие при функционировании объекта (например, нагрев, вызываемый трением или прохождением электрического тока), режимы функционирования объекта, способы и место его установки, монтажа, крепления, скорость перемещения и т. п.

Нормальные условия испытаний — условия, указанные в нормативной документации (НД) на данный вид продукции. Нормальные условия испытаний (значения воздействующих факторов, режимы функционирования) должны быть указаны в НД на методы испытаний конкретных видов продукции. Так, например, устанавливаются нормальные климатические условия испытаний для различных видов технических изделий.

Если рассматривать взаимосвязь понятий «измерения», «контроль» и «испытания», то здесь можно выделить две позиции:

1. Указанные понятия характеризуют формально автономные процедуры, предназначенные для решения разных задач. Действительно, из определения понятия «измерение» видно, что это некоторая техническая операция, имеющая своей целью количественное определение физической величины. По своей сути измерение — это экспериментальный процесс, при котором с помощью вспомогательных средств сравнивают неизвестное значение измеряемой величины с принятой единицей измерения — с мерой — и определяют, какое число раз эта единица содержится в измеряемой величине. Понятие «контроль» не ограничивается приведенными соображениями. Контроль (технический контроль) определяется как проверка соответствия показателей изделия установленным техническим требованиям. Это относится к контролю как по количественному признаку (измерительный контроль), так и качественному или альтернативному признаку. Особо отметим, что в последнем случае также требуется применение процедуры сравнения с мерой, т. е. проведение измерений. Действительно, в конечном счете, индикаторы, используемые в процессе качественного или альтернативного контроля, являются и измерительными средствами, в них также заложен процесс сравнения с мерой (на этапе градуировки). Из данных положений следует, что контроль сводится к процедуре разбраковки изделий по сортности, группам, номиналам, качеству и т. д. с обязательным использованием измерительных процедур. Однако измерительный контроль

отличается от собственно измерений тем, что вместо численного значения величины его результатом является заключение вида «да» либо «нет», т. е. «годен» или «не годен».

При неизмерительном контроле, в отличие от измерительного, отсутствуют количественные оценки. Один из наиболее распространенных видов неизмерительного контроля — визуальный (часто при помощи средств так называемого технического зрения). Целью неизмерительного контроля является проверка соответствия определенных качественных свойств контролируемого объекта (например, формы, цвета, герметичности, емкости и др.) заданным требованиям.

И, наконец, из приведенного выше определения понятия «испытание» видно, что основная цель испытаний заключается в оценке качества изделия при его функционировании в тех или иных условиях, как правило, отличающихся от нормальных.

Таким образом, исходя из данных определений, можно рассматривать процедуры измерений, контроля и испытаний как автономные, выполняющие самостоятельные задачи.

2. Указанные процедуры функционально связаны. Действительно, достаточно очевидно, что основным источником сведений о качестве продукции, характере производства и других показателях являются измерения. Именно в процессе их проведения и возникает та информация, которая обеспечивает решение задач по оценке показателей качества продукции (ПКП). Отсюда следует, что *измерения входят как составной элемент в процедуры и контроля, и испытаний.*

Сравнивая приведенные выше определения испытаний и контроля, выявим их сходство и различие. Сходство состоит в том, что и то и другое позволяет определять характеристики объекта и его свойства. Это сходство объясняется тем, что процесс испытания, состоящий из ряда операций, включает в себя операцию контроля, которая, как правило, является заключительной операцией испытаний. *Контроль всегда является частью испытаний*, при этом может быть даже упрощенным, например визуальным (только органами зрения), но испытания обязательно заканчиваются им. Различие состоит в том, что испытание всегда предполагает воздействие на объект, контроль же может проводиться без воздействия. Это имеет место при самостоятельном автономном контроле, не предусматривающем экспериментальное определение характери-

стик, а предполагающем только качественную оценку. Таким образом, *испытания всегда включают в себя контроль, который может осуществляться также самостоятельно, автономно, без испытаний.*

Различие процедур измерения, контроля и испытаний заключается и в том, что качество измерений характеризуется погрешностью получаемого результата, качество контроля — достоверностью его результата, а качество испытаний — погрешностью и достоверностью результата испытаний.

В заключение рассмотрим суть и содержание обобщенной процедуры «сертификационные испытания», которая сводится, во-первых, к получению информации о некотором процессе или изделии при проведении измерений в определенных, заранее установленных условиях (при конкретных внешних воздействующих факторах) и, во-вторых, к математической обработке получаемой информации по определенному алгоритму с целью установления реальных показателей качества продукции.

В зависимости от определяемых групп показателей качества продукции различают три вида испытаний: на функционирование, на безопасность и на надежность. Сертификационные испытания, как видим, не входят в этот перечень. Определение данным испытаниям можно дать исходя из сущности понятия «сертификация» как процедуры, обеспечивающей подтверждение сертифицируемой продукции установленным требованиям. Из данного положения следует, что под *сертификационными испытаниями* можно понимать процесс экспериментального нахождения ПКП при конкретных, заранее установленных внешних воздействующих факторах (ВВФ) с целью определения соответствия продукции установленным требованиям. Как видим, понятие «сертификационные испытания» является обобщающим, что и позволяет говорить о данной процедуре как обобщающей, т. е. включающей не только контроль, но и различные виды испытаний.

Таким образом, с одной стороны, можно говорить о различном содержании, задачах и подходах при проведении измерений, контроля и испытаний, а с другой — эти процедуры можно оценивать с единых, общих понятий (применительно, в частности, к задачам оценки качества изделий при сертификационных испытаниях).

В литературе в ряде случаев обращается внимание на отличие различных видов испытаний от контроля. В частности, указывается, что испытания на функционирование осуществляются при условии воздействия на продукцию определенных ВВФ (реальных или моделируемых), а контроль — при нормальных климатических условиях. Тут же отмечается, что испытания на безопасность и надежность могут проводиться как при нормальных условиях, так и при воздействии ВВФ. Поскольку нормальные условия входят в интервал изменения ВВФ, т. е. являются их частным случаем, то отличие носит не принципиальный характер, а лишь позволяет определять ПКП в тех условиях, которые оговариваются в технических условиях на изделие.

Далее указывается, что испытаниям подвергается выборка продукции, а контролю, чаще всего, — вся продукция, что также не принципиально. Обычно объем контролируемой выборки определяется видом продукции, ее назначением, стоимостью, характером уменьшения ресурса и т. д. Массовая дешевая продукция, для которой стоимость браковки годной продукции примерно одинакова со стоимостью пропуска негодной продукции, как правило, подвергается выборочному контролю. В то же время дорогая, ответственная продукция, для которой пропуск брака недопустим (точнее, не должен превышать допустимого уровня), почти всегда подвергается сплошному контролю.

Приводятся и другие соображения, но они также не имеют принципиального значения, а определяют лишь техническую сторону проведения процедур контроля и испытаний. Главное же, и это признается в большинстве технических источников, для доказательства соответствия продукции конкретному стандарту необходимо осуществление количественных контроля и испытаний, сопровождающихся измерениями. Таким образом, процессы контроля и испытаний должны сопровождаться измерениями. Соответственно, имеет место внутреннее единство в понятиях «измерение», «контроль», «испытания».

§ 2. Воздействующие факторы

При испытаниях технических изделий и материалов предполагается наличие двух основных элементов: воздействие на объект и определение характеристик, которое может производиться как при

функционировании объекта, так и без такового. При этом существуют определенные условия испытаний. К условиям испытаний относятся внешние воздействующие факторы (ВВФ) как естественные, так и искусственно создаваемые, и внутренние воздействия, возникающие при функционировании объекта (например, нагрев, вызываемый трением или прохождением электрического тока). К условиям испытаний относятся также режимы функционирования объекта, способы и место его установки, монтажа, крепления, скорость перемещения и т. п.

2.1. Внешние воздействующие факторы (ВВФ)

Термины и определения понятий в области ВВФ установлены в ГОСТ 26883-86. В соответствии с этим документом приведем определения с пояснениями:

1. Внешний воздействующий фактор (ВВФ) — явление, процесс или среда, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации. В нормативно-технических документах (НТД) рассматривают внешние воздействующие факторы, вызывающие ограничение или потерю работоспособного состояния изделий, т. е. оказывающие на них вредное воздействие, хотя в ряде случаев они могут повышать работоспособное состояние, например, низкие температуры повышают работоспособность холодильных установок.

2. Нормальное значение ВВФ — значение ВВФ, статистически обработанное и усредненное на основе многократных наблюдений для определенной области эксплуатации изделия или группы изделий.

3. Номинальное значение ВВФ — нормируемое изменяющееся или неизменное верхнее и нижнее значения ВВФ, в пределах которых обеспечивается заданное работоспособное состояние конкретных видов изделий. За номинальные значения ВВФ принимают нормируемые изменяющиеся или неизменные верхние и нижние значения ВВФ.

В НТД в числе номинальных значений ВВФ можно задавать также рабочие и предельные рабочие значения.

Предельные рабочие значения ВВФ — значения ВВФ, в пределах которых изделия могут редко оказываться в эксплуатации и должны при этом:

а) сохранять работоспособное состояние, но могут не сохранять требуемой точности и номинальных параметров (при этом в стандарте или технических условиях на изделия указывают допустимые отклонения точности и номинальных параметров, если эти отклонения имеют место);

б) восстанавливать требуемую точность и номинальные параметры после прекращения действия этих предельных рабочих значений.

4. Номинальные условия эксплуатации — совокупность номинальных значений ВВФ.

5. Эффективное значение ВВФ — условное постоянное значение ВВФ, принимаемое при расчетах номинальных параметров изделия, влияющих на срок службы и (или) сохраняемости, существенно зависящих от данного ВВФ и нормированных для работы в течение срока службы и (или) сохраняемости.

Воздействие эффективного значения ВВФ, как правило, эквивалентно воздействию переменного значения данного фактора в процессе эксплуатации.

6. Стойкость изделия к ВВФ — свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время и после воздействия на изделие определенного ВВФ в течение всего срока службы в пределах заданных значений.

7. Устойчивость изделия к ВВФ — свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время действия на него определенного ВВФ в пределах заданных значений.

8. Прочность изделия к ВВФ — свойство изделия сохранять работоспособное состояние после воздействия на него определенного ВВФ в пределах заданных значений.

Имеют место следующие виды ВВФ:

2.1.1. Механические ВВФ

1. Шум — нерегулярное или статистически случайное колебание.

2. Механический удар — кратковременное механическое воздействие твердых тел при их столкновении между собой и сопутствующие этому процессу явления.

Механический удар может быть однократного и многократного действия.

Разновидностью механического удара является баллистический удар.

Баллистический удар — удар тела при его встрече с преградой в процессе баллистического полета.

Баллистический полет — полет тела, происходящий при отсутствии аэродинамической подъемной силы.

3. Гидравлический удар — резкое повышение или понижение давления движущейся жидкости при внезапном уменьшении или увеличении скорости потока.

4. Аэродинамический удар — механическое воздействие ударной волны, образующейся при движении летательного аппарата в атмосфере в момент достижения им сверхзвуковой скорости.

5. Звуковой удар — по ГОСТ 23281-78.

6. Ударная волна — распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью переходная область в газе, жидкости или в твердом теле, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости среды.

7. Сейсмическое воздействие — подземные удары и колебания поверхности, вызванные естественными и искусственными причинами.

8. Воздействие землетрясения — сейсмическое воздействие, вызванное естественными причинами.

9. Сейсмический удар — сейсмическое воздействие, вызванное искусственными взрывами.

10. Качка — колебание изделия, при котором его вертикальная ось отклоняется от вертикали к земной поверхности.

Различают качку бортовую (угол наклона) и вертикальную (периодическое перемещение по вертикали к земной поверхности).

11. Крен — положение изделия, при котором его вертикальная ось отклонена в поперечной плоскости симметрии от вертикали к земной поверхности.

Термин «крен» более всего употребляется в отношении судов и летательных аппаратов.

12. Дифферент — наклон изделия, при котором его вертикальная ось отклонена в продольной плоскости симметрии от вертикали к земной поверхности.

Дифферент устраняется перераспределением грузов по длине изделия (в судах перераспределением водяного балласта).

13 а. Механические колебания — по ГОСТ 24346-80.

13 б. Вибрация — по ГОСТ 24346-80.

13 в. Случайные колебания (вибрация) — по ГОСТ 24346-80.

13 г. Гармонические колебания (вибрация) — по ГОСТ 24346-80.

13 д. Механическое давление — давление, характеризующееся интенсивностью нормальных сил, с которой одно тело или среда действует на поверхность другого тела или среды.

Механическое давление может быть следующих видов: гидравлическое, пневматическое, давление света, давление газовой среды.

13 е. Статическое давление — механическое давление, интенсивность, точка приложения и направление которого изменяются во времени настолько медленно, что силы инерции не учитываются

13 ж. Динамическое давление — механическое давление, интенсивность, точка приложения и направление которого изменяются во времени настолько быстро, что силы инерции учитываются.

2.1.2. Климатические ВВФ

1. Атмосферные осадки — выпадающие или конденсированные осадки.

2. Атмосферные выпадающие осадки — вода в жидком и твердом состоянии, выпадающая из облаков.

3. Атмосферные конденсированные осадки — вода в жидком и твердом состоянии, образующаяся на земной поверхности и на предметах, находящихся вблизи от нее, в результате конденсации водяного пара, находящегося в воздухе.

4. Морской туман — конденсационные аэрозоли с жидкой дисперсной фазой морской воды, характеризующейся сложившимся постоянством солевого состава, в котором массовая доля ионов Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br^- , CO_3^{2-} , F^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} составляет 99,99%.

5. Статическая(ий) пыль (песок) — аэрозоль с твердой дисперсной фазой — пылью (песком), находящийся в статическом состоянии.

6. Динамическая(ий) пыль (песок) — аэрозоль с твердой дисперсной фазой — пылью (песком), находящийся в динамическом состоянии.

Динамическая(ий) пыль (песок) оказывает абразивное воздействие на изделия и материалы.

7. Ветер — поток воздуха, движущийся со скоростью свыше 0,6 м/с.

8. Коррозионно-активный агент морской воды — вещество, находящееся в морской воде и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счет коррозии.

Примечание. К таким веществам относятся, например, хлориды, сульфаты, карбонаты щелочных и щелочно-земельных металлов и другие.

9. Коррозионно-активный агент почвенно-грунтовой среды — вещество, находящееся в почве и грунте и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счет коррозии.

Примечание. К таким веществам относятся, например, хлориды, нитриды, сульфаты, карбонаты, гумус, продукты метаболизма и другие.

Грунт — породы Земли, являющиеся объектом инженерно-строительной деятельности человека.

10. Коррозионно-активный агент окружающей среды — вещество, находящееся в атмосфере и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счет коррозии.

Примечание. К таким веществам относятся, например, сернистый газ, хлориды, нитраты, сульфаты и т. д.

11. Тепловой удар — воздействие резкого изменения температуры окружающей среды.

11 а. Атмосферное давление — абсолютное давление околоземной атмосферы.

11 б. Интегральное солнечное излучение — электромагнитное излучение, равное селективно фильтрованному спектру частот.

2.1.3. Биологические ВВФ

1. Биологический ВВФ — организмы или их сообщества, оказывающие внешние воздействия и вызывающие нарушение исправного и работоспособного состояния изделия.

2. Бактерия — микроорганизм, обладающий клеточной оболочкой, но не имеющий клеточного ядра, размножающийся простым делением и способствующий разрушению изделий.

3. Плесневый грибок — микроорганизм, развивающийся на металлах, оптических стеклах и других материалах в виде бархатистого налета, выделяющий органические кислоты, способствующие разрушению изделий.

4. Обрастатель — по ГОСТ 9.102-78.

Обрастатели — это водные организмы (животные и растения морских и пресных вод), поселяющиеся на каменных сооружениях, подводных частях судов, буев, портопых и других гидротехнических сооружениях, внутри поверхности водяных систем, водозаборных

труб, на подводных кабелях и т. п., снижающие скорость хода судов, уменьшающие ток воды в водопроводах, снижающие эффективность охлаждающих устройств и способствующие коррозии металлических и бетонных подводных сооружений.

2.1.4. ВВФ специальных сред

1. Специальная среда — Среды — неорганические и органические соединения, масла, смазки, растворители, топлива, рабочие растворы, рабочие тела, внешние по отношению к изделию, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации или хранения.

2. Среда заполнения — среда, используемая для заполнения объема, в котором эксплуатируется изделие.

3. Рабочее тело — газообразное или жидкое вещество, с помощью которого осуществляется преобразование какой-либо энергии при получении холода, тепла или механической работы.

4. Испытательная среда — специальная среда, воздействующая на изделие при проведении контрольных испытаний в процессе его изготовления и приемки.

5. Рабочий раствор — специальная среда, представляющая собой раствор органических и (или) неорганических веществ, применяемый для дезинфекции, дезактивации, стерилизации и дегазации.

6. Радиоактивный аэрозоль — аэрозоль, в состав дисперсной фазы которого входят радионуклиды.

2.1.5. Термические ВВФ

1. Тепловой удар — воздействие резкого изменения температуры окружающей среды на изделие.

2. Радиационное разогревание — повышение температуры конструктивных элементов изделий, облучаемых ионизирующим излучением, в результате превращения поглощенной материалами этих изделий энергии излучения в тепловую энергию.

3. Электрическое разогревание — повышение температуры конструктивных элементов изделия под воздействием электрического поля, в результате превращения электрической энергии в тепловую энергию.

4. Ультразвуковое разогревание — повышение температуры конструктивных элементов изделия под воздействием ультразвука, в результате превращения энергии ультразвуковых колебаний в тепловую энергию.

5. Аэродинамический нагрев — нагревание обтекаемой газом поверхности тела, движущегося в газообразной среде с большой скоростью при наличии конвективного, а при гиперзвуковых скоростях и радиационного теплообмена с газовой средой в пограничном или ударном слое.

2.1.6. ВВФ электромагнитных полей

1. Лазерное излучение — электромагнитное хроматическое излучение видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазона, основанное на вынужденной эмиссии излучения атомов и молекул.

2. Вынужденное излучение — когерентное электромагнитное излучение, возникающее при вынужденных переходах (совпадающее по направлению, частоте, фазе и поляризации с вынужденным излучением).

2.2. Внутренние воздействующие факторы

Внутренние воздействующие факторы вызываются функционированием объекта (например, нагрев, вызываемый трением или прохождением электрического тока).

§ 3. Виды испытаний

Для оценки качественных свойств и количественных значений параметров изделий на стадиях разработки, производства и эксплуатации широко используются различные виды испытаний. В ГОСТ16504-81 «Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения» испытания классифицируются по следующим признакам: уровню проведения; цели проведения; месту проведения; характеру внешних воздействий; продолжительности испытаний; влиянию на объект испытаний; определяемым характеристикам; стадиям жизненного цикла изделия (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Классификация испытаний продукции

Классификационный признак	Вид испытаний
Уровень проведения	Государственные Межведомственные Ведомственные Заводские

Продолжение табл. 4.1

Классификационный признак	Вид испытаний
Цель проведения	Исследовательские Определительные Оценочные Доводочные Сравнительные Предъявительские Приемочные Квалификационные Контрольные Приемосдаточные Периодические Типовые (проверочные) Аттестационные Сертификационные Специальные Дополнительные
Место проведения	Лабораторные Стендовые Эксплуатационные Подконтрольная эксплуатация Опытная эксплуатация Натурные Полигонные
Характер внешних воздействий	Механические Климатические Биологические Радиолокационные Электромагнитные Специальных сред Термические Испытания при комплексном воздействии
Продолжительность испытаний	Нормальные Ускоренные Форсированные Сокращенные
Влияние на объект испытаний	Неразрушающие Разрушающие Испытания на прочность Испытания на устойчивость Испытания на стойкость

Классификационный признак	Вид испытаний
Определяемые характеристики	Функциональные Испытания на надежность Испытания на безопасность Граничные Технологические
Стадии жизненного цикла	Испытания на этапе разработки Испытания готовой продукции

К *испытаниям изделий на воздействие механических факторов* в основном относятся испытания на воздействие синусоидальной и случайной широкополосной вибрации, механического удара многократного и одиночного действия, удара при падении, линейного ускорения и акустического шума.

К *испытаниям изделий на воздействие климатических факторов* относятся испытания на воздействие пониженного (повышенного) атмосферного давления, изменения атмосферного давления, повышенной (пониженной) температуры внешней среды, изменения температуры внешней среды, повышенной (пониженной) влажности, атмосферных выпадаемых осадков (дождя, снега, измороси, града), атмосферных конденсированных осадков (росы, инея и т. д.), соляного (морского) тумана, солнечного излучения, статического (или динамического) воздействия пыли (песка), атмосферы с коррозионно-активными агентами. Некоторые изделия, предназначенные для работы в тропических условиях или подвергающиеся внешним воздействиям при хранении, *испытываются на воздействие биологических факторов*, в частности плесневых грибов. Конкретные изделия могут проходить и другие виды испытаний, необходимость проведения которых вызывается спецификой их назначения.

Значительное число видов испытаний изделий на воздействие механических, климатических, биологических, радиационных и других внешних факторов в лабораторных условиях приводит к необходимости установления способов (последовательности) их выполнения. Стандартизировать единую последовательность испытаний для всех изделий практически невозможно. В общем случае последовательность проведения испытаний зависит от стадии жизненного цикла изделия и определяется целью испытаний, назначением изделия,

местом его установки и условиями эксплуатации. Действительно, например, изделия авиационной и ракетно-космической техники должны проходить большее количество видов испытаний на воздействие внешних факторов, чем бытовая техника, поэтому помимо установления конкретных видов испытаний для изделия, нужно решить, каким способом это осуществлять.

Введением понятия «способ проведения испытаний» подчеркивается, что не все изделия выборки подвергаются последовательно различным видам испытаний. Наряду с последовательным способом может быть и параллельный, когда изделия выборки подвергаются одновременно (параллельно) различным видам испытаний. Возможен и так называемый параллельно-последовательный способ, при котором все виды испытаний разбиваются на определенное число групп и соответственно на такое же число групп делится выборка изделий; группы изделий испытываются параллельно, в то время как в группах испытания изделий проводятся последовательно. И, наконец, возможен способ комбинированных испытаний, при котором испытываемое изделие подвергается одновременно воздействию двух или более определенных внешних факторов.

При последовательном способе один и тот же объект испытания последовательно подвергается всем предусмотренным программой видам испытаний. Исключение составляют испытания, проводимые при воздействии большинства химических и биологических внешних воздействующих факторов. Эти испытания, как правило, проводятся на различных выборках.

Важным условием проведения последовательных испытаний является соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов. Иногда при составлении программы предусматривают такую последовательность внешних воздействующих факторов на объект, согласно которой вначале действуют наиболее сильно влияющие на данный объект внешние факторы. Это делается для скорейшего выявления потенциально ненадежных образцов с целью сокращения времени испытаний. Однако при этом теряется большая часть информации о влиянии других видов факторов, которая могла быть получена при их воздействии. Поэтому чаще на практике рекомендуется начинать испытания с воздействия на объект наименее жестких внешних факторов, при которых воздействие будет наименьшим. Такой способ испытаний позволяет точнее определить причины на-

блюдаемых отказов и составить более полную картину о наличии в объекте потенциальных дефектов. С другой стороны, если наиболее опасные для объекта внешние воздействующие факторы расположить в конце последовательных испытаний, то значительно увеличивается время их проведения.

Как видно, последовательность проведения испытаний играет важную роль. Установление единой последовательности проведения испытаний для различных объектов вряд ли оправдано. Оптимальная последовательность проведения испытаний зависит от назначения объекта, места его установки и предполагаемых условий эксплуатации. Поэтому последовательность проведения испытаний конкретного объекта указывается в технических условиях или программе испытаний. В то же время рекомендуется, например, перед проверкой герметичности и влагоустойчивости такого объекта, как электронная аппаратура (ЭА), проводить механические испытания, способные вызвать разгерметизацию аппаратуры.

И вообще, все климатические испытания по этой же причине целесообразно проводить после механических испытаний ЭА.

Характерной особенностью последовательного способа проведения испытаний является наличие эффекта накопления деградиционных изменений в физической структуре объекта испытаний по мере перехода от одного вида внешнего воздействующего фактора к другому, в результате чего каждое воздействие предыдущего фактора оказывает влияние на результаты испытаний при воздействии последующего, что, в свою очередь, усложняет интерпретацию результатов испытаний и увеличивает износ ЭА.

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

Компромиссным между последовательным и параллельным способами проведения испытаний является последовательно-параллельный способ, позволяющий в каждом конкретном случае более эффективно использовать преимущества того или иного способа и

находить наиболее оптимальные варианты их сочетания. Однако каждый из рассмотренных способов проведения испытаний предусматривает, как правило, раздельное воздействие на объект внешних факторов, что является существенным отличием от реальных условий его эксплуатации. Поскольку при лабораторных и стендовых испытаниях практически невозможно имитировать реальные условия эксплуатации объекта, ограничиваются определенным комплексом стандартных испытаний. Простые и универсальные, они сложились на эмпирических принципах. Не имитируя реальных условий эксплуатации, такие испытания позволяют получать информацию, необходимую для уверенности в том, что вновь разрабатываемые изделия будут обладать в эксплуатации не худшими характеристиками, чем предшествующие.

С целью приближения лабораторных условий испытаний объекта к реальным условиям его эксплуатации все большее распространение начинает получать комбинированный способ испытаний, при котором на объект испытания одновременно воздействуют несколько внешних факторов.

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

Лабораторные и стендовые испытания изделий отличаются от реальной эксплуатации тем, что при их проведении пока еще не представляется возможным моделировать все внешние воздействия одновременно в той случайной совокупности, которая имеет место при реальной эксплуатации. Обычно при лабораторных и стендовых испытаниях аппаратура подвергается воздействию одной или нескольких определенных нагрузок. Это приводит к результатам, несколько отличающимся от полученных при реальной эксплуатации. Поэтому при исследовании влияния внешних воздействующих факторов наряду с лабораторными и стендовыми испытаниями проводятся также испытания изделий в естественных условиях окружающей среды.

В зависимости от условий и места проведения испытаний при воздействии естественных внешних факторов различают полигонные и натурные испытания изделий.

Полигонные испытания объекта проводят на специально оборудованном полигоне. Широко распространены полигонные испытания изделий, проводимые при воздействии внешних климатических факторов. При этом испытания изделий, предназначенных для эксплуатации и хранения только в ограниченных климатических районах, проводят на полигонах, расположенных в пунктах, характеризующих климатическое воздействие этих районов.

Натурные испытания объекта реализуются при выполнении трех основных условий:

1) испытаниям подвергается непосредственно изготовленное изделие (т. е. объект испытания) без применения моделей или составных частей аппаратуры;

2) испытания проводятся в условиях и при воздействиях на изделия, соответствующих действиям при их использовании по целевому назначению;

3) определяемые характеристики свойств объекта испытаний измеряются непосредственно без использования аналитических зависимостей, отражающих физическую структуру объекта испытаний и его составных частей. При этом допускается применение математического аппарата статистической обработки экспериментальных данных.

К натурным испытаниям относится, в частности, опытная эксплуатация изделий.

Цель полигонных и натурных испытаний — исследование комплексного влияния естественно воздействующих факторов на изменение параметров, свойств и механизмы отказов изделий при их эксплуатации и хранении. Эти испытания обеспечивают получение наиболее полной и достоверной информации о комплексном влиянии факторов окружающей среды на параметры, характеризующие изделия; позволяют исследовать характер реальных физико-химических процессов, протекающих в материалах и комплектующих изделиях при воздействии естественных внешних факторов; дают возможность уточнять данные, полученные при испытании объекта под воздействием внешних факторов, создаваемых искусственным путем, а также нормы на допустимые изменения параметров (критерии годности). По результатам полигонных и натурных испытаний разрабатывают рекомендации по способам защиты изделий от внешних воздействующих факторов.

Однако специфика натуральных испытаний заключается в их большой продолжительности, сложности и высокой стоимости. Эти испытания требуют четкой их организации и оптимального планирования. С целью ограничения объема испытаний программа их проведения должна базироваться на анализе результатов эксплуатации, лабораторных и стендовых испытаний, а также требований; предъявляемых к изделиям. Это позволяет проводить испытание объекта только в тех естественных условиях, в которых влияние дестабилизирующих факторов наиболее интенсивно.

К физическим испытаниям при естественных внешних воздействующих факторах следует отнести также эксплуатационные испытания, т. е. испытания объекта, проводимые при эксплуатации. Одним из основных видов эксплуатационных испытаний является опытная эксплуатация изделий. Иногда проводится подконтрольная эксплуатация, которая условно может быть отнесена к эксплуатационным испытаниям. При подготовке к подконтрольной эксплуатации специально предназначенный для ее проведения персонал, руководствуясь специально разработанной документацией, осуществляет сбор, учет и первичную обработку информации.

Испытания с использованием моделей осуществляются методами физического и математического моделирования. Применение этих методов позволяет отказаться от ряда сложных физических испытаний реальных изделий или их макетов.

Физическое моделирование заключается в том, что первичный параметр объекта испытаний (процесс в элементе схемы или какое-либо внешнее воздействие) заменяется простой физической моделью, способной имитировать изменения данного параметра. Физическое моделирование может осуществляться также следующими статистическими методами испытаний.

1. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) заключается в том, что при помощи многократных случайных испытаний (вычислений, производимых над случайными числами) определяют вероятность появления некоторого случайного события (математического ожидания случайной величины). Данный метод позволяет определить характеристики надежности, исходя из предположения, что известен механизм отказов при различных сочетаниях значений параметров изделий, выбираемых случайным образом согласно заданной статистической модели.

2. Метод статистических испытаний физическим моделированием объекта предусматривает проведение испытаний на реальных объектах или их электронных моделях. При испытаниях на реальных объектах производят исследование возможных причин возникновения отказов изделий и их последствий путем искусственного введения в схему обрывов, коротких замыканий или установки комплектующих элементов с параметрами, выходящими за допустимые нормы. Проведение испытаний на электронных моделях объекта заключается в том, что определенные комплектующие элементы схемы заменяются физическими моделями, позволяющими изменять величины характеризующих их параметров. Моделирование различных элементов осуществляют на специальных стендах, где воспроизводят случайные процессы изменения параметров комплектующих элементов.

Математическое моделирование базируется на использовании уравнений, связывающих входные и выходные параметры объекта испытаний. (В предыдущем методе такая связь реализуется непосредственно в физической модели). Эти уравнения выводят на основании изучения конкретных изделий и их внутренних функциональных связей, после чего и осуществляют математическое описание установленных связей с учетом воздействия различных факторов на изделия. Основной недостаток метода — необходимость проведения огромного объема теоретических и экспериментальных исследований для определения соотношений, характеризующих математическую модель объекта, что требует применения ЭВМ с высоким быстродействием и большим объемом памяти, а также — знания вероятностных характеристик первичных (входных) параметров. Необходимость проведения огромного объема экспериментальных исследований, техническая сложность выполнения физических моделей целого ряда устройств (например, высокочастотных, импульсных и др.), высокая стоимость и длительность проведения испытаний не стимулируют широкого применения методов физического и математического моделирования в практике испытаний изделий и поэтому здесь подробно не рассматриваются.

Частным видом статистических методов испытаний, применяемым на практике, являются граничные испытания изделий.

Граничные испытания проводятся для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров объекта и

режимом эксплуатации. Они являются экспериментальным методом, основанным на физическом моделировании области значений первичных параметров, при которых выходные параметры изделий находятся в пределах допуска, т. е. в области безотказной работы изделий при изменениях первичных параметров. Однако определить область безотказной работы изделий при одновременном изменении многих первичных параметров не представляется возможным. Поэтому часто на практике находят граничные точки области безотказной работы изделий при изменении какого-либо одного первичного параметра изделий (параметр граничных испытаний), сохраняя значения других неизменными. В этом и состоит смысл граничных испытаний.

Для реализации метода граничных испытаний используют изменение выходного параметра изделий с помощью искусственных приемов, например, меняют одно из питающих напряжений, выбранное в качестве первичного параметра граничных испытаний. Границы области, в пределах которой изделие работает безотказно, определяются при изменении напряжения до момента отказа изделий по исследуемому выходному параметру в случае, когда остальные первичные параметры изделий имеют номинальные (или заданные) значения. Затем при некотором отклонении одного из первичных параметров изделий от номинального (или заданного) значения снова наблюдают за выходным параметром изделий при изменении напряжения. Ясно, что при отклонении первичного параметра в обе стороны от номинального значения выходной параметр будет выходить за пределы допуска при различных значениях напряжения.

Исследовательские испытания проводятся для изучения определенных характеристик свойств объекта и их целью являются:

- определение или оценка показателей качества функционирования испытываемого объекта в определенных условиях его применения;
- выбор наилучших режимов работы объекта или наилучших характеристик свойств объекта;
- сравнение множества вариантов реализации объекта при проектировании и аттестации;
- построение математической модели функционирования объекта (оценка параметров математической модели);
- отбор существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта;

— выбор вида математической модели объекта (из заданного множества вариантов).

Примером исследовательских испытаний могут быть рассмотренные испытания моделей.

Особенностью исследовательских испытаний является факультативный характер их проведения, и они, как правило, не применяются при сдаче готовой продукции.

Определительные испытания проводят для определения значенных характеристик объекта с заданными значениями показателей точности и достоверности.

Сравнительные испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов. На практике иногда возникает необходимость сравнить качество аналогичных по характеристикам или даже одинаковых изделий, но выпускаемых, например, различными предприятиями. Для этого испытывают сравниваемые объекты в идентичных условиях.

Сравнительные испытания проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов.

Контрольные испытания проводятся для контроля качества объекта. Испытания этого вида составляют наиболее многочисленную группу.

На этапе проектирования проводят доводочные, предварительные и приемочные испытания.

К видам испытаний готовой продукции относят квалификационные, предъявительские, приемсдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные. Так, доводочные испытания — это исследовательские испытания, проводимые при проектировании изделий с целью оценки влияния вносимых в нее изменений для достижения заданных значений показателей качества, а предварительные испытания являются контрольными испытаниями опытных образцов и (или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

Приемочные испытания также являются контрольными. Это испытания опытных образцов, опытных партий продукции или изделий единичного производства, проводимые для решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции (изделий) на производство и (или) использования ее по назначению.

Приемочные испытания опытных образцов или партий изделий проводятся, как правило, для решения вопроса о целесообразности постановки аппаратуры на производство, а приемочные испытания изделий единичного производства — для решения вопроса о целесообразности передачи этих изделий в эксплуатацию.

Квалификационные испытания проводятся уже на установочной серии или первой промышленной партии изделий, т. е. на стадии освоения производства изделий. Целью их является оценка готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме.

Предъявительские испытания изделий проводятся обязательно службой технического контроля предприятия-изготовителя перед предъявлением ее для приемки представителем заказчика, потребителем или другими органами приемки.

Приемосдаточные испытания проводятся в освоенном производстве. Это контрольные испытания изготовленной продукции при приемном контроле. Приемосдаточные испытания, как правило, проводятся изготовителем продукции. Если на предприятии-изготовителе имеется представитель заказчика, приемосдаточные испытания проводятся им в присутствии представителя-изготовителя.

С целью контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска проводят периодические испытания продукции в объеме и в сроки, установленные нормативно-техническими документами (НТД).

Инспекционные испытания — это особый вид контрольных испытаний. Они проводятся в выборочном порядке с целью контроля стабильности качества установленных видов продукции специально уполномоченными организациями.

В тех случаях, когда в производственном процессе выявляют недостатки конструкции изделий или технологического процесса ее изготовления, возникает необходимость совершенствования конструкции или техпроцесса. Целесообразность предложенных изменений выявляют с помощью типовых испытаний. Типовые испытания — это контрольные испытания выпускаемой продукции, проводимые с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию, рецептуру или технологический процесс.

Электронная аппаратура может оцениваться по категориям качества или на соответствие ее характеристик требованиям национальных и международных стандартов. Неотъемлемой процедурой такой оценки являются аттестационные или сертификационные испытания. Испытания, проводимые для оценки уровня качества продукции при ее аттестации по категориям качества, называются аттестационными. Сертификационные испытания — это контрольные испытания продукции, проводимые с целью установления соответствия характеристик ее свойств национальным и (или) международным НТД.

В зависимости от продолжительности все испытания подразделяются на нормальные, ускоренные, сокращенные.

Под нормальными понимаются испытания изделий, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации.

В свою очередь, ускоренные испытания — это такие испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о качестве изделий в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях. В НТД на методы испытаний конкретных видов изделий указываются значения воздействующих факторов и режимы функционирования, соответствующие нормальным условиям испытаний.

Сокращенные испытания проводятся по сокращенной программе.

В зависимости от уровня значимости испытаний изделий их можно разделить на государственные, межведомственные и ведомственные.

К государственным относятся испытания установленных важнейших видов изделий, проводимые головной организацией по государственным испытаниям, или приемочные испытания, проводимые государственной комиссией или испытательной организацией, которой предоставлено право их проведения.

Межведомственные испытания — это испытания изделий, проводимые комиссией из представителей нескольких заинтересованных министерств и ведомств, или приемочные испытания установленных видов электронной аппаратуры для приемки составных ее частей, разрабатываемых совместно несколькими ведомствами.

Ведомственные испытания проводятся комиссией из представителей заинтересованного министерства или ведомства или корпорации.

§ 4. Опасные и вредные производственные факторы

На человека в процессе его трудовой деятельности могут воздействовать опасные (вызывающие травмы) и вредные (вызывающие заболевания) производственные факторы.

Вредный производственный фактор — производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению работоспособности.

Опасный производственный фактор — производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор, в зависимости от интенсивности и продолжительности воздействия, может стать опасным.

Классификация опасных и вредных производственных факторов содержится в ГОСТ 12.0.003-74, согласно которому опасные и вредные производственные факторы подразделяются по природе действия на следующие группы:

1. Физические опасные и вредные производственные факторы подразделяются на следующие:

- движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования; передвигающиеся изделия, заготовки, материалы; разрушающиеся конструкции; обрывающиеся горные породы;
- повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны;
- повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования, материалов;
- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- повышенный уровень вибрации;
- повышенный уровень инфразвуковых колебаний;
- повышенный уровень ультразвука;
- повышенное или пониженное барометрическое давление в рабочей зоне и его резкое изменение;
- повышенная или пониженная влажность воздуха;
- повышенная или пониженная подвижность воздуха;
- повышенная или пониженная ионизация воздуха;
- повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;

- повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
- повышенный уровень статического электричества;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- повышенная напряженность электрического поля;
- повышенная напряженность магнитного поля;
- отсутствие или недостаток естественного света;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенная яркость света;
- пониженная контрастность;
- прямая и отраженная блесковость;
- повышенная пульсация светового потока;
- повышенный уровень ультрафиолетовой радиации;
- повышенный уровень инфракрасной радиации;
- острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхностях заготовок, инструментов и оборудования;
- расположение рабочего места на значительной высоте относительно земли (пола);
- невесомость.

2. Химически опасные и вредные производственные факторы подразделяются:

— *по характеру воздействия на организм человека:*

- на токсические;
- раздражающие;
- сенсibiliзирующие;
- канцерогенные;
- мутагенные;
- влияющие на репродуктивную функцию;

— *по пути проникания в организм человека:*

- через органы дыхания;
- желудочно-кишечный тракт;
- кожные покровы и слизистые оболочки.

3. Биологические опасные и вредные производственные факторы включают следующие биологические объекты:

- патогенные микроорганизмы (бактерии, вирусы, риккетсии, спирохеты, грибы, простейшие) и продукты их жизнедеятельности;
- микроорганизмы (растения и животные).

4. Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы по характеру действия подразделяются на следующие:

— физические перегрузки:

- статические;
- динамические;

— нервно-психические перегрузки:

- умственное перенапряжение;
- перенапряжение анализаторов;
- монотонность труда;
- эмоциональные перегрузки.

Один и тот же опасный и вредный производственный фактор по природе своего действия может относиться одновременно к различным группам.

Между вредными и опасными производственными факторами наблюдается определенная взаимосвязь. Во многих случаях наличие вредных факторов способствует проявлению травмоопасных. Например, чрезмерная влажность в производственном помещении и наличие токопроводящей пыли (вредные факторы) повышают опасность поражения человека электрическим током (опасный фактор).

Уровни воздействия на работающих вредных производственных факторов нормированы предельно-допустимыми уровнями, значения которых указаны в соответствующих стандартах системы стандартов безопасности труда и санитарно-гигиенических правилах.

ПДК (предельно-допустимая концентрация) — установленный безопасный уровень вещества в воздухе рабочей зоны (возможно, в почве, воде, снеге), соблюдение которого позволяет сохранить здоровье работника в течение рабочей смены, нормального производственного стажа и по выходу на пенсию. Не передается негативное последствие на последующие поколения.

ПДУ (предельно-допустимый уровень) — характеристика, применяемая к физическим опасным и вредным производственным факторам (по ГОСТ 12.0.002-80) — это предельное значение величины вредного производственного фактора, воздействие которого при ежедневной регламентированной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводит к снижению работоспособности и за-

болеванню как в период трудовой деятельности, так и к заболеванию в последующий период жизни.

Вредные условия труда — это условия труда, характеризующиеся наличием вредных производственных факторов, превышающих гигиенические нормативы и оказывающие неблагоприятное воздействие на организм работающего и (или) его потомство.

Следует иметь в виду, что одни опасности влияют только на человека (вращающиеся части машин, отлетающие частицы металла), а другие — как на человека, так и на среду, окружающую рабочие места (шум, пыль).

Опасности носят природный характер или порождаются деятельностью человека, следовательно, их можно разделить на природные и антропогенные.

Антропогенные опасности связаны с определенным видом деятельности человека. Например, шахтер подвергается одним опасностям, а пекарь — другим.

Опасности бывают:

- Непосредственные (повышенная температура, влажность, электромагнитные поля, шум, вибрация, ионизирующее излучение). Воздействуя на живой организм, эти опасности вызывают те или иные ощущения. В определенных случаях такие воздействия могут быть не безопасны.
- Косвенные опасности воздействуют на человека не сразу. Например, коррозия металлов непосредственной угрозы для человека не представляет, но в результате ее снижается прочность деталей, конструкций, машин, сооружений. При отсутствии мер защиты косвенные опасности приводят к авариям, порождая непосредственную опасность.

Свойство опасности проявляется только в определенных условиях, называемых потенциальностью. Уберечь человека от скрытых потенциальных опасностей удастся не всегда, т. к., во-первых, некоторые опасности носят скрытый характер, обнаруживаются не сразу, возникают неожиданно, непредвиденно; во-вторых, человек не всегда подчиняется сигналам, не выполняет правил безопасности, которые ему хорошо известны.

В результате опасности из потенциальных превращаются в действительные, принося большой ущерб как отдельным людям, так и обществу в целом.

Среди различных работ выделяют работы (и целые профессии) повышенной опасности. К ним относятся все работы, связанные с подъемными кранами, баллонами высокого давления, электросетью высокого напряжения и пр.

Общество, используя различные средства, обеспечивает определенный уровень безопасности производства, но абсолютную безопасность обеспечить невозможно. Для характеристики опасности используют понятие риска.

Риск — количественная оценка опасности, т. е. отношение числа тех или иных неблагоприятных последствий к их возможному числу за определенный период (обычно год). Знание уровня риска позволяет сделать определенное заключение о целесообразности (или нецелесообразности) дальнейших усилий для повышения безопасности того или иного рода деятельности с учетом экономических, технических и гуманитарных соображений.

Полная безопасность не может быть гарантирована никому, не зависимо от образа жизни. Поэтому современный мир пришел к понятию приемлемого (допустимого) риска, суть которого в стремлении к такой малой безопасности, которую приемлет общество в данный период времени. Во всем мире за приемлемый риск принята величина 10^{-6} степени. Пренебрежительно малым считается индивидуальный риск гибели 10^{-8} .

Экономические возможности повышения безопасности технических систем не безграничны. Затрачивая большие средства на повышение безопасности, человек наносит ущерб другим сферам экономики, при этом технический риск снижается, но увеличивается социальный.

§ 5. Особенности испытаний на функционирование, на безопасность и на надежность

5.1. Особенности испытаний на функционирование

Рассмотрим особенности испытаний на функционирование на примере летательного аппарата.

Испытания на функционирование (и целостность коммуникаций) бортовой аппаратуры и автоматики должны осуществляться

по принципу последовательно нарастающих повторных испытаний, что позволяет наиболее быстро выявить дефектные элементы. При выявлении дефектов все они должны анализироваться и устраняться, а объект испытаний обязан пройти после этого повторные испытания в установленном объеме. Такие испытания по полной программе проводятся также в случае внесения принципиальных изменений в конструкцию, технологию или оборудование.

Основными критериями эффективности контроля и испытаний являются надежность ЛА, стоимость, длительность цикла испытаний, что и должно учитываться в первую очередь при составлении программы испытаний и ее оптимизации.

Все наземные испытания должны быть закончены до летных испытаний. Из партии изделий в целом, прошедшей заводские приемосдаточные испытания, одно изделие подвергается летным испытаниям. Для получения максимально возможной информации о работе систем ЛА (например, ракеты) в процессе полета она дооборудуется дополнительными датчиками (телеметрический вариант). Летные испытания являются решающим этапом отработки ЛА, после которого окончательно определяют его основные характеристики.

Летные испытания проводятся с целью подтверждения (в реальных условиях) заданных технических характеристик и надежности ракетно-космического комплекса (РКК), его составных частей и систем. В процессе этих испытаний решаются те задачи экспериментальной отработки, которые было невозможно или технически (и экономически) нецелесообразно решать на стадиях наземной отработки.

При подготовке летных испытаний одной из основных задач является определение необходимого состава и числа измеряемых параметров, а также рациональное размещение датчиков и аппаратуры системы измерений. Реализация этой задачи начинается с этапа предварительных проработок выбранной компоновочной схемы, проводится на всех этапах разработки и основана на анализе предполагаемого функционирования систем и агрегатов ЛА на всех этапах работы в штатных и аварийных ситуациях. Особое внимание обращают на аварийные ситуации, т. к. в процессе летной от-

работки вероятность появления таких ситуаций достаточно велика, а выявление и устранение их причин — одна из главных задач летных испытаний.

Моделируя функционирование ЛА, его систем и агрегатов на различных участках полета при штатных ситуациях, а также возможные аварийные ситуации, вероятные процессы их развития и работу систем и агрегатов ЛА в этих условиях, определяют места установки первичных преобразователей, диапазон измерений и перечень измеряемых параметров, позволяющих с достаточной степенью достоверности судить как о параметрах ЛА в целом, так и о процессах, протекающих на его борту во всех этих ситуациях.

Летные испытания, особенно при их неблагоприятном исходе, выявляют возможные доработки тех или иных элементов конструкции или систем ЛА, после реализации которых необходимы дополнительные стендовые испытания, испытания на прочность и т. д., подтверждающие правильность принятых решений. В результате этих доработок возможно изменение выходных параметров ЛА, которые в процессе первых пусков, как правило, ухудшаются. Однако задача летных испытаний состоит не только в подтверждении правильности принятых конструкторско-технологических решений и выявлении слабых мест, но и в определении запасов, заложенных на предшествующих этапах разработки. Поэтому в ходе летных испытаний, по мере накопления информации о фактических характеристиках ЛА и уточнения расчетных методов и схем, появляется возможность уменьшить эти запасы и улучшить летные характеристики ЛА.

5.2. Особенности испытаний на безопасность

Особенности испытаний на безопасность любого объекта регламентируется соответствующим нормативным документом. В частности, безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов регламентируется ГОСТ 27570.0-87. Это достаточно объемный документ (содержит 177 стр.). Приведем содержание и некоторые выдержки из него.

Содержание ГОСТ 27570.0-87

1. Область распространения	1
2. Термины и определения	2
3. Общие требования	8
4. Общие условия испытаний	9
5. Номинальные величины	12
6. Классификация	13
7. Маркировка	13
8. Защита от поражения электрическим током	20
9. Пуск приборов с электроприводом	24
10. Потребляемая мощность и ток	26
11. Нагрев	27
12. Работа в условиях перегрузки приборов с нагревательными элементами	35
13. Электрическая изоляция и ток утечки при рабочей температуре	37
14. Подавление радио- и тепломех	40
15. Влагостойкость	40
16. Сопротивление изоляции и электрическая прочность	45
17. Защита от перегрузки	49
18. Износостойкость	49
19. Ненормальная работа	52
20. Устойчивость и механическая опасность	57
21. Механическая прочность	59
22. Конструкция	61
23. Внутренняя проводка	70
24. Комплектующие изделия	73
25. Присоединение к источнику питания и внешние гибкие кабели и шнуры	76
26. Зажимы для внешних проводов	87
27. Заземление	93
28. Винты и соединения	96
29. Пути утечки тока, воздушные зазоры и расстояния по изоляции	99
30. Теплостойкость, огнестойкость и стойкость к образованию токоведущих мостиков	103
31. Стойкость к коррозии	106
32. Радиация, токсичность и подобные опасности	107
Чертежи 1—17	107—116
Приложение А. Терморегулирующие устройства и реле перегрузки	117
Приложение В. Электронные цепи	119
Приложение С. Конструкция защитных разделительных трансформаторов	125
Приложение D. Варианты требований для двигателей с защитными устройствами	126
Приложение E. Измерение путей утечки тока и воздушных зазоров	126
Приложение F. Двигатели, не изолированные от питающей сети и имеющие основную изоляцию, которая не рассчитана на номинальное напряжение прибора	130
Приложение G. Схема цепи для измерения тока утечки	132
Приложение H. Порядок проведения испытаний по разд. 30 настоящего стандарта.	134
Приложение I. Испытание горением	135
Приложение K. Испытание раскаленной проволокой	137
Приложение L. Испытание дефектных соединений с помощью нагревателей	138
Приложение M. Испытание игольчатым пламенем	147
Приложение N. Испытание на образование токопроводящих мостиков	149
Приложение O. Жесткость условий эксплуатации изоляционных материалов относительно опасности трекинга	153
Приложение 1. Пружинное устройство для испытаний на удар и его калибровка	154
Приложение 2. Дополнительные требования и методы испытаний устройств автоматического управления.	160
Информационные данные	174

Выдержки из стандарта

Настоящий стандарт содержит нормы, правила и методы испытаний, являющиеся общими для всех бытовых электроприборов. Стандарт должен применяться совместно с аналогичными стандартами на конкретные типы приборов.

При отсутствии стандарта на конкретный тип прибора допускается распространять действие настоящего стандарта (насколько это приемлемо) на этот конкретный тип.

1. ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

1.1. Настоящий стандарт распространяется на электромеханические и электронагревательные приборы и приборы с магнитным приводом для бытового или аналогичного применения.

1.2. Настоящий стандарт допускается применять для приборов, не предназначенных для бытового применения, но которые могут быть источником опасности для людей, не являющихся специалистами электротехники, но пользующихся приборами во время своей рабочей деятельности (например, приборы, применяемые в парикмахерских, паяльники, клееварки, стерилизаторы, приборы инфракрасного излучения, кормозапарники, насосы для воды, газонокосилки и т. п.).

1.3. Настоящий стандарт не распространяется:
на приборы, предназначенные для промышленного применения;
приборы, предназначенные для применения в местах с особыми условиями среды, например в атмосфере, вызывающей коррозию, взрыв (пыль, пар или газ); отдельные двигатели (кроме мотор-компрессоров для холодильных приборов);

высокочастотные нагревательные приборы (кроме бытовых СВЧ-печей);

радио- и телеприемники, электрофоны и т. п.;

приборы для медицинских целей.

3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3.1. Приборы должны быть спроектированы и сконструированы так, чтобы при нормальной эксплуатации их работа была безопасной и не могла возникнуть опасность для обслуживающего персонала даже в случае небрежного обращения с прибором, которое возможно при нормальном обслуживании.

Проверку осуществляют путем проведения всех соответствующих испытаний!

4. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЯ

4.1. Испытания, проводимые в соответствии с настоящим стандартом, являются общими для всех приборов, входящих в область распространения стандарта. Для каждого конкретного прибора следует учитывать указания стандарта на этот тип прибора.

4.2. Если нет других указаний, испытания проводят на одном образце в том состоянии, в котором его поставляют в торговую сеть; образец должен выдерживать все предусмотренные для него испытания.

Примечания:

1. Если из конструкции прибора очевидно, что определенное испытание неприменимо, то это испытание не проводят.

2. Если прибор рассчитан на различные напряжения питания, для работы как на постоянном, так и на переменном токе, на различные частоты вращения и т. д., то может потребоваться более одного образца.

3. Если необходимо провести испытания по п. 11.10, то требуются дополнительные образцы.

4. Если для проведения определенных испытаний необходимо демонтировать прибор класса II, то для испытаний требуется два образца.

5. Испытание комплектующих изделий может потребовать поставки дополнительных образцов этих изделий. В таком случае они должны быть поставлены вместе с прибором.

4.3. При отсутствии других указаний испытания проводят в последовательности, определяемой нумерацией разделов настоящего стандарта.

Примечание. Перед началом испытаний прибор включают на номинальное напряжение для того, чтобы убедиться, что он работоспособен.

4.4. Прибор или любую подвижную часть его при испытании устанавливают в наиболее неблагоприятное положение, которое возможно при нормальной эксплуатации.

4.5. Если на результаты испытаний влияет температура окружающей среды, то температуру помещения, в которой проводят испытания, поддерживают в пределах $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Если температура какой-либо части ограничивается устройством, чувствительным к температуре, или на нее влияет температура, при которой происходит изменение со-

стояния, например, температура кипящей воды, то при возникновении сомнений в результатах испытаний температуру в помещении поддерживают в пределах $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

4.6. Приборы, предназначенные для работы только на переменном токе, испытывают переменным током при номинальной частоте, если она указана; приборы, предназначенные для работы только на постоянном токе, испытывают постоянным током; приборы, предназначенные для работы как на переменном, так и на постоянном токе, испытывают при наиболее неблагоприятном виде питания.

Приборы, предназначенные для работы на переменном токе и на которых не указана номинальная частота или указан диапазон частот 50 до 60 Гц, испытывают при частоте 50 или 60 Гц, в зависимости от того, при какой частоте создаются наиболее неблагоприятные условия.

Приборы, на которых указан диапазон номинальных частот, отличающийся от 50-60 Гц, испытывают при наиболее неблагоприятной частоте в пределах этого диапазона.

Приборы, предназначенные для работы при нескольких номинальных напряжениях, испытывают при наиболее неблагоприятном напряжении.

Если нет других указаний, приборы, рассчитанные на один или несколько диапазонов номинальных напряжений, испытывают при наиболее неблагоприятном напряжении в пределах соответствующего диапазона.

Если для приборов с электроприводом, на которых указан диапазон номинальных напряжений, указано, что напряжение питания равно номинальному напряжению, умноженному на коэффициент, то напряжение питания должно быть равно:

верхнему пределу диапазона номинальных напряжений, умноженному на коэффициент, если последний больше 1;

нижнему пределу диапазона номинальных напряжений, умноженному на коэффициент, если последний меньше 1.

Примечание. В случае ссылки на максимальную или минимальную номинальные потребляемые мощности имеется в виду номинальная мощность, соответствующая верхнему или нижнему пределу диапазона номинальных напряжений.

При испытании приборов, предназначенных для работы только на постоянном токе, принимается во внимание возможное влияние полярности на работу прибора.

Примечание. Если нагревательный прибор без встроенного двигателя рассчитан на один диапазон номинальных напряжений, то верхний предел диапазона обычно является наиболее неблагоприятным напряжением в пределах диапазона. Если прибор имеет двигатель или рассчитан на более чем одно номинальное напряжение или более чем один диапазон номинальных напряжений, то с целью определения наиболее неблагоприятного напряжения может возникнуть необходимость в проведении нескольких испытаний при минимальном, среднем и максимальном значениях номинального напряжения или диапазонов номинальных напряжений.

4.7. Приборы со сменными нагревательными элементами и принадлежностями испытывают с элементами или принадлежностями, которые дают самые неблагоприятные результаты при условии, что эти элементы и принадлежности используют в соответствии с инструкцией предприятия-изготовителя прибора.

4.8. Если при нормальной эксплуатации нагревательный элемент не может функционировать при неработающем двигателе, то элемент испытывают при работающем двигателе. Если нагревательный элемент может функционировать при неработающем двигателе, то элемент испытывают при работающем или неработающем двигателе, в зависимости от того, что является наиболее неблагоприятным.

4.9. Приборы, снабженные терморегулятором, регулирующим устройством или подобным устройством управления, уставка которых может быть изменена потребителем, испытывают при самых неблагоприятных уставках этих устройств.

Примечания:

1. Если средства настройки устройства управления доступны без инструмента, то требования п. 4.9 применимы независимо от того, может быть уставка изменена вручную или с помощью инструмента; если средства настройки недоступны без помощи инструмента и если не предусмотрено изменение уставки потребителем, то требования п. 4.9 не применяют.

2. Соответствующее пломбирование рассматривается как способ предотвращения изменения уставки потребителем.

4.10. Встраиваемые приборы устанавливают в соответствии с указаниями изготовителя.

4.11. Если нет других указаний, приборы, предназначенные для подключения к сети при помощи гибкого кабеля или шнура, испытывают с соответствующим гибким кабелем или шнуром, присоединенным к прибору.

4.12. Если для нагревательных приборов указано, что напряжение питания прибора должно быть таким, при котором потребляемая мощность больше номинальной, то это напряжение применимо только для нагревательных элементов с небольшим температурным коэффициентом сопротивления. Для других нагревательных элементов это напряжение определяют следующим образом: сначала нагревательный элемент питается номинальным напряжением до достижения своей рабочей температуры. Затем напряжение питания быстро увеличивают до величины, необходимой для получения потребляемой мощности, требуемой для соответствующего испытания. Испытание проводят, как указано выше, а данную величину питающего напряжения поддерживают в течение всего испытания.

Примечание. В общем случае температурный коэффициент считается значительным, если при номинальном напряжении потребляемая мощность прибора в холодном состоянии отличается от мощности, потребляемой прибором при рабочей температуре, более чем на 25%.

4.13. Если для электромеханических приборов условия нормальной нагрузки приведены в стандарте на конкретный прибор, то приборы нагружают в соответствии с этими условиями независимо от маркировки кратковременного или повторно-кратковременного режимов работы, за исключением случаев, когда из конструкции прибора очевидно, что эти условия не возникнут при нормальной эксплуатации.

4.14. Приборы класса III испытывают совместно с питающими их трансформаторами, если последние поставляются с приборами.

4.15. При испытаниях, предусмотренных п.п. 8.6, 8.7, 16.4, 25.11 и 27.1, части, отделенные от токоведущих частей двойной или усиленной изоляцией, рассматривают как части, которые не могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции; соединение доступных металлических частей с заземляющим зажимом или заземляющим контактом не исключает необходимости в проведении соответствующих испытаний.

(Измененная редакция. Изм. № 1).

4.16. Если приборы класса 01 или I имеют доступные металлические части, которые не присоединены к заземляющему зажиму или

заземляющему контакту и не отделены от токоведущих частей промежуточной металлической частью, соединенной с заземляющим зажимом или контактом, то такие части испытывают на соответствие требованиям, предусмотренным для приборов класса II.

4.17. Если приборы классов 0, 01, I и II имеют части, работающие при безопасном сверхнизком напряжении, то такие части испытывают на соответствие требованиям, предусмотренным для приборов класса III.

4.18. Приборы, содержащие электронные цепи, рассматриваются в приложении В.

Приборы со встроенными двигателями, не изолированными от сети питания и имеющими основную изоляцию, не рассчитанную на номинальное напряжение прибора, рассматриваются в приложении F.

Все особенности испытаний детально приведены в чертежах и приложениях к стандарту (см. табл. 4.2).

5.3. Особенности испытаний на надежность

Понятие *надежности* тесно связано с понятием *качества*. Под качеством продукции понимают совокупность свойств продукции, определяющих степень ее пригодности для использования по назначению. Надежность является составной частью качества. В понятие надежности включают только часть свойств, определяющих качество. В соответствии с Международным стандартом ИСО 8402 (относящимся к сфере качества) под надежностью понимается собирательный термин, используемый для описания характеристики готовности и влияющих на нее факторов: безотказности, ремонтпригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта.

В настоящее время под надежностью обычно понимают совокупность таких свойств продукции, как *безотказность*, *долговечность* и *ремонтпригодность*. Общим у этих трех свойств является то, что все они связаны с возможностью появления неисправностей у рассматриваемых изделий при их эксплуатации (т. е. при хранении, транспортировке и работе). Надежность систем (R) рассчитывается на основании данных о надежности элементов (R_i) по формуле:

$$R = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n.$$

Надежности перемножаются, т. к. вероятность того, что все n событий произойдут одновременно равна произведению вероятностей отдельных событий.

Учитывая, что надежность является характеристикой, зависящей от условий применения изделий и времени, можно сделать вывод, что количественные значения надежности элементов должны соответствовать определенному типу систем и конкретным условиям их применения. Поэтому во многих случаях, особенно при создании новых или уникальных технических объектов (ТО), для определения показателей надежности прибегают или к предварительным испытаниям, или определяют их по результатам эксплуатации ТО, подобных создаваемым.

В качестве отправных данных при определении количественных значений надежности используются события, состоящие в нарушении работоспособности ТО и называемые отказами. Под *отказом* понимают событие, после которого ТО перестает выполнять (целиком или частично) свои функции. Допустим, что тестируется N элементов в течение времени t . Отказавшие элементы ремонтируются и вновь пускаются в работу. Если в течение этого времени отказало N_i элементов, то среднее время между отказами, или среднее время безотказной работы, — $T_{\text{безот.}} = (N \cdot t) / N_i$.

Таким образом, понятие отказа является основным в теории надежности и правильное уяснение его физической сущности — важнейшее условие успешного решения вопросов обеспечения надежности. Ясно, что отсутствие отказов ТО в эксплуатации является признаком их высокой надежности. *Поэтому надежность (как свойство ТО, характеризующее его эксплуатационные качества), наиболее часто оценивается только безотказностью.* Другие эксплуатационные характеристики ТО (восстанавливаемость, ремонтпригодность, долговечность, готовность к применению, экономичность, характеристики технического обслуживания и т. п.) зависят от безотказности.

Понятия безотказности и долговечности достаточно ясно определяются своими наименованиями. Для количественной характеристики этих свойств применяют различные численные *показатели* надежности, например: *вероятность безотказной работы, интенсивность отказов — величина, обратная $T_{\text{безот.}}$, средний срок службы, гарантийный срок службы* и т. п.

Для количественной характеристики ремонтпригодности применяют среднее время, затрачиваемое на отыскание и устранение одного отказа, коэффициент готовности и т. п.

Наличие различных показателей надежности обусловлено тем, что в некоторых случаях важно, чтобы ТО не только безотказно работал в течение определенного промежутка времени, но, несмотря на наличие отказов и перерывов в работе, связанных с их устранением и проведением технического обслуживания, сохранял бы в целом способность выполнять заданные функции в течение длительного времени.

Свойство ТО сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с некоторыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов называется *долговечностью*. Она определяется по наработке — техническим ресурсом или по календарному времени — сроком службы.

На рис. 4.1 схематично показано, как изменяется интенсивность отказов для измерительной системы или ее элемента с течением времени. Здесь можно выделить три характерные зоны:

1. Период ранних отказов из-за дефекта материала и заводского брака.

2. Период нормальной работоспособности, когда интенсивность отказов практически постоянна и отказы являются чисто случайным событием.

3. Период отказов из-за процесса старения, когда интенсивность отказов растет из-за изнашивания компонентов. Долговечность определяется третьей зоной интенсивности отказов на рис. 4.1.

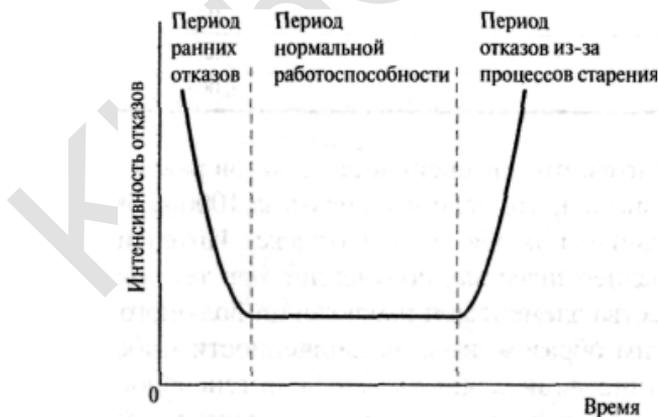


Рис. 4.1. Изменение интенсивности отказов во времени

Предельными состояниями ТО могут являться поломка, предельный износ, падение мощности или производительности, снижение точности и др. Очевидно, что для простейших элементов, работающих до первого отказа (неремонтируемых), понятия надежности и долговечности совпадают. Для многоэлементных систем, многократно восстанавливаемых (ремонтируемых) в процессе эксплуатации, долговечность — наиболее важный показатель.

При решении многих теоретических и практических вопросов обеспечения надежности необходимо правильно разграничивать ТО на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. *Восстанавливаемыми* (ремонтируемыми) называются ТО, работоспособность которых в случае возникновения отказа можно восстанавливать в данных условиях эксплуатации с помощью ремонта, выполняемого подручными средствами. Такие ТО могут многократно отказывать и восстанавливать свою работоспособность после каждого ремонта. *Невосстанавливаемыми* (неремонтируемыми) называются такие ТО, восстановление работоспособности которых в случае отказа в данных условиях эксплуатации не производится. Подобные ТО могут иметь только один отказ. В общем случае любое ТО можно считать невосстанавливаемым, если рассматривать его работу только до первого отказа.

ТО может потерять работоспособность не только при эксплуатации, но также в процессе длительного хранения, в результате старения. Чтобы подчеркнуть свойство ТО сохранять работоспособность в процессе хранения, введено понятие сохраняемости, которое, по существу, имеет смысл надежности ТО в условиях хранения. *Сохраняемостью* называется свойство иметь обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного в технической документации.

Важное значение при определении эксплуатационных характеристик ТО имеют понятия срока службы, наработки и ресурса.

Сроком службы называется календарная продолжительность эксплуатации ТО до момента возникновения предельного состояния, оговоренного в технической документации.

Под *наработкой* понимается продолжительность (в часах или циклах) или объем работы ТО (в литрах, килограммах и т. п.).

Ресурсом называется наработка до предельного состояния, оговоренного в технической документации. Ресурс равен сумме всех

наработок ТО от начала эксплуатации до момента достижения этого состояния.

При рассмотрении надежности ТО целесообразно разбить их на три группы следующим образом:

1. Элементы

К этой группе относятся элементы ТО (интегральные схемы, модули, детали, конденсаторы, резисторы и т. п.), которые при выходе из строя уже не могут быть восстановлены. В случае применения их в ТО многократного действия вышедшие из строя элементы заменяются на исправные. В некоторых случаях целесообразно в качестве элементов сложных изделий рассматривать их отдельные блоки или узлы.

2. ТО однократного действия

К этой группе относятся такие ТО, которые предназначены для однократного использования и которые не ремонтируются в процессе их эксплуатации.

Заметим, что отдельные блоки или узлы ТО многократного действия можно в ряде случаев рассматривать как объекты однократного действия. Это относится к таким блокам и узлам, которые при выходе из строя не ремонтируются, а заменяются на исправные.

ТО однократного действия можно разделить на два класса:

— ТО называются *простыми*, если в них выход из строя любого существенного элемента вызывает выход из строя всего объекта. Это значит, что все существенные элементы работают последовательно, т. е. что в изделии нет параллельных (дублирующих) цепей. При этом мы относим к несущественным элементам такие, выход из строя которых не влияет на функции ТО (например, сигнальные лампы или контрольные приборы);

— ТО называются *сложными* изделиями, если в них имеются дублирующие (параллельные) цепи. В этих ТО выход из строя одного существенного элемента не всегда влечет за собой выход из строя всего объекта. Простые ТО иначе называются объектами *без резервирования*, сложные — с *резервированием*.

3. ТО многократного действия

К ТО многократного действия относятся такие, которые предназначены для длительной работы и для которых предусмотрена возможность ремонтов в процессе эксплуатации.

Такие ТО, так же, как и объекты однократного действия, разделяются на простые (без резервирования) и сложные (с резервированием).

Приведенная классификация ТО является достаточно условной. В некоторых случаях трудно провести грань между группами 1 и 2 или 2 и 3. Однако эта классификация удобна и позволяет избежать некоторых недоразумений при расчете надежности сложных ТО.

5.4. Отказы и их классификация

В некоторых случаях при рассмотрении вопросов надежности удобно различать отказы и дефекты.

Дефектом называется такое изменение нормального состояния ТО, которое не влияет на выполнение им своих функций (т. е. не влияет на эффективность объекта или не снижает эффективности ниже требуемого уровня).

Отказом называется такое изменение нормального состояния ТО, которое существенно влияет на выполнение им своих функций (т. е. выводит ТО из строя или снижает его эффективность ниже требуемого уровня).

Особенностью количественных характеристик надежности является их вероятностно-статистическая природа. Отсюда вытекают особенности их определения и использования. Как показывает практика, поступающие в эксплуатацию однотипные ТО, например автомашины, даже будучи изготовленными на одном заводе, проявляют различную способность сохранять свою работоспособность. Вследствие этого в процессе эксплуатации отказы ТО происходят в самые неожиданные и, на первый взгляд, совершенно непредвиденные моменты. Естественно, возникает вопрос: существуют ли вообще какие-либо закономерности в появлении отказов? Оказывается, что существуют. Только для их установления следует вести наблюдения не за одним, а за многими ТО, находящимися в эксплуатации, и для обработки результатов наблюдений применять методы математической статистики и теории вероятностей.

В качестве основной количественной меры надежности ТО, характеризующей закономерности появления отказов во времени, принимается *вероятность безотказной работы*. Эта мера является характеристикой качества, проявляемого как множеством однотипных ТО, так и отдельным техническим объектом, принадлежащим к данному множеству, и может быть истолкована в этом случае как

степень объективной уверенности в его безотказной работе. Вероятность безотказной работы не является единственной количественной характеристикой надежности ТО. К ним также относятся интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, плотность распределения времени безотказной работы и др.

Например, современные ЛА — это сложные и дорогостоящие инженерные конструкции, эффективность использования которых во многом определяется их надежностью.

Обеспечение надежности в процессе создания ЛА заключается в выявлении и устранении допущенных при разработке причин, приводящих к отказам, а также в организации условий производства и эксплуатации ЛА, которые исключили бы появление новых причин отказов. Таким образом, отказы в функционировании ЛА и его элементов связаны с ошибками проектно-конструкторских разработок, технологии изготовления и эксплуатации.

Устранение ошибок и недоработок проектно-конструкторского характера осуществляется в процессе различных испытаний агрегатов и систем, отсеков и ракетных блоков ЛА.

Экспериментальная отработка полностью собранного аппарата в ходе летно-конструкторских испытаний (ЛКИ) является наиболее информативной операцией, но и наиболее дорогостоящей. Поэтому ЛКИ дополняются большим объемом наземных комплексных и автономных испытаний отдельных узлов, агрегатов, отсеков ЛА, причем эти испытания выполняются на всех этапах разработки конструкции и конструкторской документации.

Экспериментальные исследования и отработка конструкций имеют своей целью разработку и уточнение методик расчета, их экспериментальное подтверждение. Эти исследования обычно выполняются на моделях в широком диапазоне варьируемых параметров конструкции. Модели изготавливают в уменьшенном масштабе, конструктивно подобными натурной конструкции. Элементы, не существенные для прочности и жесткости, не воспроизводятся.

Указанные испытания нужны при разработке и внедрении новых конструктивно-силовых схем, конструкционных материалов, технологических процессов и т. д. В результате экспериментальных исследований *подтверждаются фактические характеристики и работоспособность отсеков и агрегатов*. Обязательным условием при испытаниях конструкций является обеспечение реальных

условий заделки торцов. В экспериментальной сборке должны быть установлены все конструктивные элементы, влияющие на прочность и жесткость (приварные элементы, местные вырезы, конструктивные надстройки). Данная группа исследований включает статические и динамические испытания отдельных узлов, агрегатов и отсеков, испытания теплоизоляционных и теплозащитных покрытий.

В процессе *статических испытаний*:

- определяют истинные значения прочностных и жесткостных характеристик с учетом всех особенностей конструкции, технологии и материалов;
- подтверждают принятые в расчетах значения коэффициентов безопасности и результаты расчета напряженного состояния и жесткости конструкции при эксплуатационных нагрузках или указывают на ошибочность используемых в конструкции узлов и агрегатов решений;
- выявляют на основании анализа результатов разрушающих испытаний истинные причины разрушения конструктивных элементов;
- выявляют в результате анализа напряженного состояния и деформаций элементы и узлы недостаточной и избыточной прочности.

Динамические испытания проводят для различных конструктивных элементов с целью получения значений обобщенной жесткости и коэффициентов демпфирования, проверки усталостной прочности, исследования поведения конструкций в условиях нестационарного нагружения.

В результате выполненного комплекса исследований уточняется конструктивное исполнение, корректируется конструкторская документация, определяются фактические значения массовых характеристик отсеков и агрегатов и дополняются или изменяются требования к производству.

После завершения разработки конструкторской документации продолжают экспериментальную отработку конструкций ЛА и технологии их производства. Для этого изготавливается определенное число натуральных отсеков и агрегатов для прочностных испытаний, отработки технологии, проверки отдельных систем на функционирование и т. д. Задачи отработки на этом этапе те же, что и на предшествующем, но носят контрольный характер (конструкторско-доводочные испытания — КДИ). По результатам КДИ вносятся

изменения в конструкторскую документацию, корректируются характеристики отсеков и ЛА в целом, уточняется технологическая документация на изготовление летных образцов ЛА.

§ 6. Испытания на механические воздействия вибрации, ударов, линейных ускорений и акустических шумов

К испытаниям изделий на воздействие механических факторов в основном относятся испытания на воздействие синусоидальной и случайной широкополосной вибрации, механического удара многократного и одиночного действия, удара при падении, линейного ускорения и акустического шума.

К механическим воздействиям относятся статические, динамические и вибрационные. Они могут вызывать разрушения вследствие растяжения, сжатия, изгиба, кручения, среза, вдавливания и усталости материала, из которого выполнено изделие. Поэтому изделия, предназначенные для работы в условиях механических воздействий, должны выдерживать определенные нагрузки.

Как правило, механические свойства материалов характеризуют прочность, пластичность, твердость, ударная вязкость и т. д. Критериями прочности материалов являются такие характеристики, как предел упругости, предел текучести, предел прочности.

Избежать механических воздействий на электротехническое и всевозможное другое оборудование в современном мире практически невозможно, поэтому должна быть проведена оценка стойкости к влиянию внешних механических факторов.

Механические воздействия на электротехническое оборудование во многом обусловлены динамическими явлениями, возникающими при вращении и возвратно-поступательном движении неуравновешенных элементов и деталей. В свою очередь, механические колебания с малой амплитудой часто вызывают резонансные колебания других элементов конструкций. Дополнительным источником механических воздействий на электротехническое оборудование являются факторы техногенного характера, а также внешние природные факторы, в том числе землетрясения. Примеры последних лет подтверждают, что на земле сейчас нет мест, где землетрясения невозможны.

Воздействие различного характера вибраций на изделия авиационной и ракетно-космической техники на этапах ее жизненного цик-

ла часто приводит к возникновению в них механических дефектов и (или) ухудшению значений параметров (характеристик). В связи с этим предусматривается проведение лабораторно-стендовых испытаний на воздействие вибрации с помощью специальных средств испытаний. Основные требования, предъявляемые к виброиспытаниям различных изделий и средствам испытаний, сформулированные в рекомендациях МЭК, отечественных государственных и зарубежных стандартах, следующие:

- возможность проведения испытаний на гармоническую (синусоидальную и полигармоническую), случайную (узко- и широкополосную) и смешанную (гармоническую и случайную) вибрации;
- обеспечение воспроизводимости результатов испытаний, исключая неоднозначность заключения;
- возможность учета особенностей характеристик испытуемого изделия и способов его крепления;
- простота и удобство в управлении заданным испытательным режимом; возможность ручного и автоматического управления;
- обеспечение точности измерения: частоты ниже 50 Гц $\pm(1-2)\%$ и выше 50 Гц $\pm(2-3)\%$; перемещения $\pm(10-20)\%$; ускорения $\pm(10-20)\%$; спектральной плотности ускорения $\pm(1,5-3,0)$ дБ;
- обеспечение точности (0,5-2 дБ) поддержания ускорения (перемещения) постоянным при динамическом диапазоне регулирования 10-60 дБ;
- обеспечение допусков искажающих факторов: нелинейных искажений не более 30%; уровня поперечных составляющих вибрации 25%; неравномерности амплитуды колебаний в точках крепления $\pm 25\%$;
- обеспечение толкающих усилий до нескольких сотен тысяч ньютонов и грузоподъемности до нескольких тонн.

Кроме того, соответствующие требования предъявляют к местам установки и способам крепления виброизмерительных преобразователей (ВИП) и к конструкции приспособлений для крепления изделия.

Для выполнения указанных требований используются вибрационные установки — сложные комплексы, включающие в основном подсистемы задания, воспроизведения, управления и измерения, анализа и регистрации параметров вибрации. Основным звеном такой установки является вибратор — исполнительный элемент, пред-

назначенный для воспроизведения заданных колебаний. В зависимости от принципа действия вибратора в установке используют различные способы задания испытательного режима. Самое широкое распространение в практике виброиспытаний получили электродинамические, электрогидравлические и механические вибраторы. Первые два типа вибраторов применяют в вибрационных системах, реализующих все современные методы испытаний. В этом случае в качестве задающего устройства используют генераторы электрических сигналов. Электродинамические вибраторы позволяют создавать колебания более высокочастотные (5-10000 Гц), чем электрогидравлические (0-1000 Гц). Механические вибраторы применяют в системах, предназначенных для испытания методом фиксированных частот.

Основным недостатком всех типов вибраторов является зависимость их передаточной функции от частоты и нагрузки, что существенно усложняет задачу воспроизведения заданных параметров вибрации при испытаниях в широком диапазоне частот. Поэтому для реализации любого метода испытаний требуются специальные способы компенсации изменений передаточной функции при изменении частоты и нагрузок.

Структурная схема виброустановки приведена на рис. 4.2.

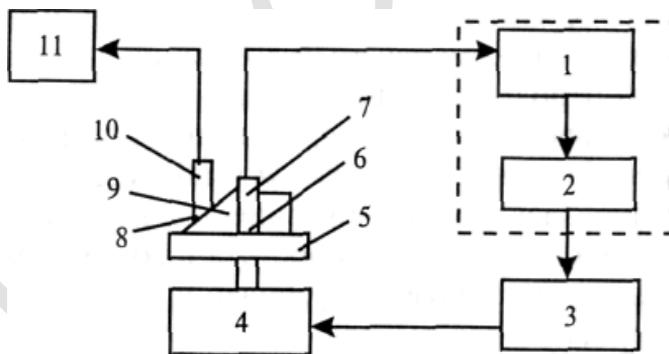


Рис. 4.2. Структурная схема вибрационной установки

В состав виброустановки входят: вибростенд (вибровозбудитель) (4), преобразующий энергию любого вида в энергию механических

колебаний (в вибрацию); генератор (2) испытательных (управляющих) сигналов, создающий управляющее воздействие на вибростенд, соответствующее данному характеру вибрации и режиму испытаний; усилитель мощности (3), предназначенный для получения требуемого значения вынуждающей силы.

В конструкцию вибростенда входит как неподвижная часть, так и подвижная система, совершающая вибрационное движение.

Устойчивое равновесие и ориентацию подвижной системы относительно неподвижной части обеспечивает система подвески. Испытуемое изделие устанавливается и закрепляется для передачи ему вибрации на конструктивной части подвижной системы, называемой вибростолом (5).

Для получения информации о воздействии вибрации в процессе испытаний используют виброизмерительные преобразователи, размещаемые в двух или более специфических точках. Различают две основные точки: контрольную и измерительную. Контрольная точка (6) располагается в том месте, относительно которого должно проводиться измерение значений параметров вибрации испытуемого изделия (на столе вибростенда, на приспособлении, на самом изделии), причем она должна находиться как можно ближе к одной из точек крепления и быть с ней жестко связанной. Сигнал с ВИП (7), расположенного в контрольной точке, используется в системе управления (1), обеспечивающей поддержание значений параметров вибрации на определенном уровне.

Возможно использование нескольких контрольных точек (желательно не более четырех). В этом случае сигналы, снимаемые с них с помощью ВИП, подвергаются непрерывному арифметическому усреднению или обработке специальной сравнивающей аппаратурой.

Измерительная точка (8) располагается в том месте испытуемого изделия (9), где значения параметров вибрации определяют исход испытаний. В точку (8) помещают ВИП (10), сигнал с которого подводится к средствам измерения, анализа и обработки полученных данных (11). Таким образом, результаты испытаний оцениваются значениями параметров вибрации, полученными в измерительной точке при условии обеспечения заданных значений в контрольной точке.

Испытание на воздействие вибрации и удара проводят при воздействии фактора в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений по отношению к изделию.

Испытание на виброустойчивость допускается совмещать с испытанием на вибропрочность, проводя его в начале и конце испытания на вибропрочность. При этом скорость изменения частоты вибрации должна быть достаточной для проверки и регистрации параметров изделия, контролируемых в процессе испытания на виброустойчивость.

Кратковременное испытание на вибропрочность применяют только для контроля стабильности производства и выявления грубых технологических дефектов.

Механические испытания проводят при нормальных климатических условиях. Допускается повышение температуры окружающего воздуха при вибрационных испытаниях за счет выделения тепла стендом и изделием в пределах, оговоренных в НТД. Способ крепления изделий для проведения механических испытаний должен быть указан в НТД на испытание с учетом возможных положений изделий при эксплуатации. Изделия, имеющие собственные амортизаторы, должны, как правило, крепиться на амортизаторах. Изделия устанавливают непосредственно на платформу вибростенда или с помощью приспособлений, которые должны передавать механические нагрузки на изделие с минимальными искажениями.

Параметры режимов при механических испытаниях должны устанавливаться в контрольной точке, которую указывают в НТД на испытание.

При испытаниях на вибрационные и ударные воздействия контрольную точку выбирают в одном из следующих мест:

- на платформе стенда рядом с одной из точек крепления изделия, если последнее крепят непосредственно на платформе;
- на крепежном приспособлении, если изделие крепят на приспособлении;
- рядом с точкой крепления амортизатора, если изделие крепят на собственных амортизаторах. В технически обоснованных случаях допускается выбирать контрольную точку непосредственно на изделии при условии, что измерения в этой точке обеспечивают объективный контроль параметров воздействия.

При испытаниях на воздействие линейных нагрузок контрольную точку, для которой вычисляют величину ускорения, выбирают в центре тяжести изделия.

При испытаниях на воздействие акустических шумов контрольную точку выбирают в месте, обусловленном конструкцией камеры.

Испытание на обнаружение резонансных частот

Испытания проводят с целью определения резонансных частот изделий или их отдельных деталей и узлов.

Изделия, имеющие собственные амортизаторы, испытывают без амортизаторов при жестком креплении.

Изделия, к которым предъявлено требование по воздействию вибрационных нагрузок, испытывают в диапазоне от 5 Гц до верхней частоты заданного диапазона вибрационных нагрузок. Изделия, к которым предъявлено требование по отсутствию резонансных частот в заданном диапазоне, но не предъявлено требование в отношении вибрационных нагрузок, испытывают в диапазоне от 5 Гц до верхней частоты диапазона, в котором должны отсутствовать резонансы.

Если испытание на обнаружение резонансных частот совмещают с испытанием на виброустойчивость, то величина ускорения должна быть равной величине, установленной для испытания на виброустойчивость.

Поиск резонансных частот производят путем плавного изменения частоты при поддержании постоянного ускорения (в пределах 1-5 g) или амплитуды. В обоих случаях амплитуда перемещения не должна превышать 1,5 мм. Скорость изменения частоты при этом должна быть такой, чтобы обеспечить возможность обнаружения и регистрации резонансов.

Резонансные частоты определяют с помощью вибromетров или визуально при помощи микроскопа, стробоскопа и т. п. или по измерению выходных параметров изделий.

Испытание на виброустойчивость

Изделие устанавливают на вибростенд и включают его питание.

Испытания проводят путем плавного изменения частоты в заданном диапазоне.

В процессе испытания производят наблюдения за параметрами изделий, критичными к воздействию вибрационных нагрузок.

При обнаружении у изделий частот, на которых наблюдается нестабильность работы или ухудшение параметров, производят дополнительную выдержку на этих частотах в течение не менее 5 мин. Если испытание проводят методом качающейся частоты, дополнительную выдержку в этом случае не производят.

Испытание на вибропрочность

Испытанию на вибропрочность подвергают те же образцы изделий, которые были испытаны на виброустойчивость, если такой вид испытаний предусмотрен в НТД. У изделий, прошедших испытание на виброустойчивость, проверку параметров перед испытанием на вибропрочность не проводят.

Общая продолжительность испытания должна поровну распределяться между положениями изделия, при которых проводят испытания. Допускается испытывать изделия в одном наиболее опасном для них положении без сокращения продолжительности испытаний. При испытании допускаются перерывы, но при этом должна сохраняться общая продолжительность воздействия вибрации.

По окончании испытания на вибропрочность проводят испытания на виброустойчивость (для изделий, проверяемых на виброустойчивость) в том же диапазоне частот.

При испытаниях применяют один из следующих методов:

- метод качающейся частоты;
- метод фиксированных частот;
- комбинированный метод;
- метод, реализующий воздействие случайной вибрации.

При испытании методом качающейся частоты непрерывно изменяют частоту во всем диапазоне от нижнего значения до верхнего и обратно по линейному логарифмическому закону. В диапазоне частот от 10 Гц до частоты перехода поддерживают постоянное ускорение, соответствующее заданной степени жесткости испытаний. В общем случае диапазон частот вибрации, амплитуда, частота перехода, ускорение, время цикла качания частоты, количество циклов и общую продолжительность испытания устанавливают в соответствии с требуемой степенью жесткости испытаний. В частных случаях продолжительность испытания может быть уменьшена. Для изделий, у которых резонансные частоты выше 200 Гц, испытание проводят, начиная с частоты 100 Гц. При этом продолжительность испытания уменьшается на время, приходящееся на диапазон до 100 Гц. Для изделий, у которых резонансные частоты лежат в диапазоне частот, соответствующем заданной степени жесткости испытаний, при ускорении испытания его проводят только в области резонансных частот.

При проведении испытания методом фиксированных частот осуществляют плавное изменение частоты в течение 1 мин. в каждом поддиапазоне, на которые разбивают весь диапазон в соответствии со степенью жесткости испытаний. Затем производят выдержку на верхней частоте поддиапазона в соответствии с заданной степенью жесткости испытаний. При этом для изделий с собственными амортизаторами следует избегать совпадения частоты, на которой производят выдержку, с резонансной частотой амортизатора. Продолжительность испытаний может быть сокращена для изделий, имеющих резонансные частоты выше 200 Гц, опуская испытания до 100 Гц. Изделия, резонансные частоты которых превышают более чем в 1,5 раза верхнюю частоту диапазона, соответствующего заданной степени жесткости испытаний, испытывают на любой фиксированной частоте диапазона, соответствующей этой степени.

В случае применения комбинированного метода испытания проводят до частоты 50-60 Гц методом фиксированных частот, а далее — методом качающейся частоты.

Метод случайной вибрации наиболее полно отражает реальные условия эксплуатации. При его реализации в соответствии с заданной степенью жесткости испытаний устанавливают диапазон частот, спектральную плотность ускорения и продолжительность испытаний. При испытании происходит одновременное возбуждение всех резонансов изделия в заданном диапазоне частот, что позволяет, во-первых, определить их наличие, а во-вторых, их взаимное влияние. Ужесточение условий испытаний за счет одновременного возбуждения резонансов различных частот сокращает время испытаний по сравнению с другими методами.

Метод случайной вибрации применяют также при испытании изделий на виброустойчивость.

Испытание на ударную прочность

При испытаниях общее количество ударов должно поровну распределяться между положениями, при которых проводят испытание. Изделия, снабженные собственными амортизаторами, а также изделия, имеющие одно эксплуатационное положение, допускается испытывать только в эксплуатационном положении.

Допускается испытывать изделия в одном наиболее опасном для него положении при сохранении общего количества ударов.

Необходимость испытаний изделия под электрической нагрузкой (напряжением) должна оговариваться в НТД.

Испытание проводят путем воздействия ударов на вибростенде или ударном стенде. Величина ускорения и длительность удара, а также общее количество ударов должны соответствовать степени жесткости испытаний. Форма ударного импульса, как правило, не регламентируется, но рекомендуется близкой к полусинусоиде. Частота ударов составляет 40-120 в минуту. Во время испытаний осуществляется измерение параметров удара.

По окончании испытания проводят внешний осмотр и измерение параметров изделий.

Испытание на ударную устойчивость

Методика испытаний такая же, как и при испытании на ударную прочность, за исключением общего числа ударов и числа ударов в минуту.

Испытание проводят под электрической нагрузкой в режиме функционирования изделий.

Изделия подвергают воздействию 20 ударов в каждом положении, при этом частота следования должна быть такой, чтобы была обеспечена возможность контроля проверяемых параметров изделия.

В процессе испытания производят наблюдение за параметрами изделий, критичными к воздействию ударных нагрузок.

При совмещении испытания на ударную стойкость с испытанием на ударную прочность количество ударов определяется испытанием на ударную прочность, а контроль параметров изделий проводят в заключение испытаний на ударную прочность при воздействии не менее 20 ударов для каждого положения изделия.

Испытание на воздействие одиночных ударов

Испытание проводят на ударном стенде. Изделия, снабженные собственными амортизаторами, устанавливают на стенд на амортизаторах в эксплуатационном режиме. Необходимость проведения испытания под электрической нагрузкой должна оговариваться в НТД.

В каждом положении производят воздействие трех ударов заданной формы и величины ускорения. Как правило, рекомендуется форма импульса, близкая к полусинусоиде. Контроль параметров

изделий производят в процессе испытания, если к изделиям предъявлено требование по функционированию при воздействии одиночных ударов.

Испытание на воздействие линейных (центробежных) нагрузок

Испытания проводят с помощью центрифуг.

Снабженные собственными амортизаторами изделия допускаются испытывать без амортизаторов при жестком креплении. Испытание проводят при воздействии центробежного ускорения поочередно в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений по отношению к изделию. Величину ускорения устанавливают в соответствии с заданной степенью жесткости испытания относительно геометрического центра тяжести изделий. При этом разброс ускорения по изделию не должен превышать установленных значений.

Скорость вращения платформы центрифуги устанавливают в соответствии с величиной ускорения и расстоянием от центра вращения платформы до геометрического центра изделия или его центра тяжести.

Изделия испытывают без или под электрической нагрузкой в течение времени, необходимого для контроля параметров изделий в процессе испытания, но не менее 3 мин. в каждом положении.

Испытание на воздействие акустических шумов

Испытание проводят в камере, размеры которой превышают линейные размеры испытываемых изделий не менее чем в два раза. Изделия устанавливают в камере таким образом, чтобы все наружные поверхности их испытывали воздействие звукового давления. Неравномерность звукового давления в месте предполагаемого размещения изделия в камере не должна превышать 6 дБ. Крепление изделий производят путем подвешивания их в камере или в ее рабочей зоне на пружинках или растяжках. Собственная частота подвесок с закрепленными изделиями не должна превышать 25 Гц. Изделия, имеющие небольшие размеры, могут крепиться на плате, которую подвешивают на пружинах или растяжках. Крупногабаритные изделия допускается устанавливать на виброизолирующих прокладках (поролон, войлок) без крепления к платформе камеры.

Испытания изделий проводят под электрической нагрузкой (напряжением), характер и параметры которой должны устанавливаться в НТД.

При испытании изделия подвергают воздействию акустического шума с диапазоном частот 125-1000 Гц. При этом в диапазоне частот 200-1000 Гц уровень звукового давления должен соответствовать заданной степени жесткости испытаний; на частотах ниже 200 Гц и выше 1000 Гц должно быть снижение, равное 6 дБ на октаву, относительно уровня на частоте 1000 Гц.

Когда испытание проводят тоном меняющейся частоты, то в диапазоне частот 200-1000 Гц уровень звукового давления должен быть на 10 дБ ниже значений, установленных для заданной степени жесткости испытаний, а на частотах ниже 200 Гц и выше 1000 Гц должно быть снижение уровня, равное 6 дБ на октаву, относительно уровня на частоте 1000 Гц.

В процессе испытаний проводят контроль параметров изделий.

Продолжительность испытания должна быть достаточной для контроля параметров изделий и в случае воздействия тона меняющейся частоты должна быть не менее 30 мин.

В реальных условиях внешние факторы могут воздействовать в самых разнообразных сочетаниях и последовательностях, учесть которые при проведении испытаний не представляется возможным. Под комплексным испытанием изделий (или испытанием изделий на комплексное воздействие внешних факторов) понимается испытание изделий в условиях одновременного воздействия нескольких внешних факторов.

При проведении комплексных испытаний целесообразно исходить из следующих соображений:

- вероятность одновременного действия внешних факторов в реальных условиях эксплуатации изделий должна быть не ниже вероятности действия отдельных факторов с уровнями, соответствующими заданным в НТД требованиям;
- эффективность комплексного воздействия внешних факторов должна быть не ниже эффективности их раздельного (последовательного) воздействия при одинаковых условиях;
- необходимые средства на проведение испытаний должны оправдывать цели испытаний.

Нормы комплексных испытаний устанавливают с учетом вида испытаний. При этом следует руководствоваться нормами, установленными для испытаний на раздельное воздействие внешних факторов, или результатами измерения внешних факторов в реальных условиях эксплуатации испытываемых изделий. При проведении экспериментальных исследований следует исходить из условий достижения поставленных целей и задач исследований.

Ниже приводятся методы комплексных испытаний на некоторые сочетания внешних факторов.

Испытание на комплексное воздействие вибрации и повышенной (пониженной) температуры среды

Испытание проводят в установке комплексных испытаний (климатической камере, объединенной с вибратором), обеспечивающей испытательные режимы по температуре и вибрации. Если в процессе испытания температура поверхности вибрационного стола может существенно отличаться от температуры в камере, то крепление изделий к вибрационному столу должно иметь низкую теплопроводность. При этом крепление не должно вносить изменений в динамическую характеристику изделий в пределах диапазона частот испытаний.

После размещения изделия в камере его включают и по установлению теплового равновесия измеряют его параметры. Затем проводят испытание на виброустойчивость и изделие выключают.

Температуру в камере снижают до значения пониженной рабочей температуры и выдерживают до установления температуры по всему объему. Изделие включают и после достижения теплового равновесия проводят измерения параметров, указанных в НТД для испытаний на холодоустойчивость.

Затем изделия испытывают последовательно на виброустойчивость и вибропрочность при пониженной температуре.

Температуру в камере повышают до значения повышенной рабочей температуры и выдерживают до установления температуры по всему объему. Изделия выключают и после достижения теплового равновесия измеряют параметры, указанные в НТД для испытаний на теплоустойчивость.

Затем изделия испытывают последовательно на виброустойчивость и вибропрочность при повышенной температуре.

Температуру в камере устанавливают нормальной и проводят испытание на вибропрочность.

Этой операцией заканчивается первый цикл испытания.

Аналогичным образом изделия испытывают по очереди для двух других положений изделий по отношению к направлению действия вибрации.

Испытание на комплексное воздействие вибрации, пониженной температуры и повышенной влажности среды

Испытания проводят в установке комплексных испытаний (в климатической камере, объединенной с вибратором), обеспечивающей испытательные режимы по влажности, температуре и вибрации, или последовательно в двух климатических камерах, одна из которых должна быть объединена с вибратором, и обеспечивать одновременное воздействие пониженной температуры и вибрации.

Изделия помещают в установку комплексных испытаний и проводят испытания на воздействие повышенной влажности циклическим методом (для изделий, к которым предъявлены требования по инею и росе) или в постоянном режиме. В конце испытания измеряют параметры изделий, после чего температуру в камере снижают до рабочего значения пониженной температуры. Выдерживают изделия при пониженной рабочей температуре в течение времени, достаточного для установления температуры по всему объему. Включают вибратор и проводят испытание на прочность к воздействию синусоидальной или случайной широкополосной вибрации в эксплуатационном положении в условиях рабочей пониженной температуры.

Завершением испытания на вибропрочность заканчивается первый цикл данного вида испытаний. Проводят еще не менее двух аналогичных циклов испытаний. В каждом из этих циклов направление действия вибрации выбирается таким образом, чтобы в результате испытаний изделие подвергалось воздействию вибрации в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Общее количество циклов испытаний устанавливается, исходя из реальных условий эксплуатации изделий, целей и задач испытаний. По окончании последнего цикла испытаний изделия извлекаются из камеры и после выдержки в нормальных условиях в течение времени, достаточного для установления температуры по всему объему, проводят внешний осмотр изделий и измерение их параметров.

Испытание на комплексное воздействие одиночных ударов и пониженной (повышенной) температуры среды

Испытания проводят на установке комплексных испытаний или на ударном стенде, объединенном с оборудованием для охлаждения (нагрева) испытываемых изделий в заданном диапазоне температур. Для испытаний может быть использован ударный стенд без оборудования его специальной системой для охлаждения (нагрева) испытываемых изделий. В этом случае изделия предварительно охлаждают (нагревают) в отдельной климатической камере с учетом возможного их нагрева после охлаждения или, наоборот, охлаждения после нагрева за общее время, необходимое для переноса изделия из камеры, закрепления их на стенде и воздействия ударов. Это время зависит от массы испытываемых изделий и возможностей приспособления для их закрепления на стенде. Оно определяется на этапе подготовки к испытаниям.

Изделия закрепляют на ударном стенде. При этом их крепление к стенду должно иметь низкую теплопроводность и не должно вносить изменений в динамическую характеристику изделий в заданном диапазоне частот.

Включают изделия и, после выдержки в нормальных климатических условиях до установления теплового равновесия, измеряют параметры, оговоренные в НТД. Затем изделия выключают. Если в НТД указана необходимость контроля параметров в процессе испытаний, то испытания изделий проводят под электрической нагрузкой.

Изделия охлаждают (нагревают) до рабочего или предельного значения температуры и выдерживают при этой температуре до установления теплового равновесия или охлаждения (нагрева) по всему объему.

Далее изделия подвергают воздействию ударов поочередно в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений. Температура образца при испытаниях в каждом направлении должна соответствовать пониженной (повышенной) рабочей или предельной температуре, заданной в НТД для отдельных испытаний. Форму ударов импульсов, количество ударов, ускорение и частоту следования ударов устанавливают также в соответствии с НТД для испытаний.

После окончания испытаний на воздействие ударов изделия снимают со стенда, включают и после выдержки в нормальных климатических условиях до установления теплового равновесия измеряют параметры, оговоренные в НТД.

§ 7. Средства измерений механических воздействий

7.1. Оборудование для механических испытаний

Механические испытания служат для определения механических свойств материалов и изделий.

В зависимости от воспроизводимых, воздействующих факторов группы и вида функциональных испытаний оборудование для механических испытаний можно классифицировать следующим образом:

- *машины для статических испытаний*: машины для испытаний на растяжение; на сжатие (прессы); на кручение; универсальные — для испытания на растяжение, изгиб, срез, сжатие;
- *оборудование для испытаний на удар и постоянное ускорение*: копры маятниковые; копры с подающей платформой; устройства ударные; центрифуги; устройства линейного ускорения; платформы сейсмические;
- *вибростенды для испытаний при синусоидальных колебаниях*: механические; гидравлические; пневматические; электрогидравлические; электромагнитные; электродинамические; пьезоэлектрические и магнитострикционные;
- *оборудование для испытаний при воздействии качки, наклона и тряски*: стенд транспортной тряски; стенды для испытаний на воздействие качки и наклонов;
- *оборудование испытательное для комбинированных механических испытаний* — оборудование для испытаний при воздействии двух и более механических факторов.

Средства испытаний, контроля и измерений при испытаниях изделий на воздействие механических факторов должны обеспечивать возможность выполнения следующих требований:

- приложение к объекту испытаний нагрузок с точностью, указанной в НТД, при условии надежного крепления объекта испытаний к стенду (приспособлений, передающих нагрузку к объекту испытаний);

- имитацию нагрузок, установленных в НТД, во всем диапазоне их изменения с учетом установленных запасов;
- требуемое время нагружения, выдержки под нагрузкой и возможность регулирования нагрузок;
- воспроизведение и поддержание (либо отключение при возникновении ситуации) режимов нагружения;
- измерение деформаций, перемещений или других необходимых параметров с требуемой точностью;
- установку (закрепление) датчиков и средств измерений на объектах испытаний и при необходимости на стенде;
- обеспечение при необходимости термокомпенсации элементов системы измерений, если различные элементы конструкции объекта испытаний при определении зависимости напряжений, деформаций или перемещений от нагружения имеют различные температуры, разность которых превышает 5°C;
- установку кинокамер, подключение средств связи, звуковой и визуальной сигнализации (при необходимости);
- возможность многократного использования стендов, унифицированных сборочных единиц и деталей оснастки, а также приспособлений и устройств;
- установку устройств, исключающих возможность выхода из строя стендов из-за ошибок оператора (персонала), а также защищающих от внешней сети электропитания;
- безопасность при проведении монтажа, испытаний, демонтажа.

Оснастка, используемая при испытаниях, не должна препятствовать деформациям (вплоть до разрушения) объекта испытания при его нагружении.

Средства измерений, контроля и регистрации должны обеспечивать получение достоверной информации о нагружении и состоянии объекта испытаний. Характеристики чувствительных элементов, устанавливаемых на объекте испытаний с целью контроля его состояния, должны быть согласованы с характеристиками передающей и принимающей сигналы аппаратуры и обеспечивать получение и регистрацию необходимой информации с требуемой точностью.

Кабельные соединения и отдельно выполненные устройства, входящие в качестве элементов электрических цепей в схемы измерения параметров объекта испытаний, не должны приводить к из-

менению заданного режима нагружения (измерения) и влиять на результат измерения.

Средства измерений и регистрации информации об изделии, которые устанавливаются на объекте испытаний для измерения контролируемых характеристик изделия, подвергаемого воздействию вибрации, ударов или акустических нагрузок, должны быть защищены при помощи системы амортизации или другой защиты от указанных нагрузок.

Для проведения испытаний на механические ВВФ необходимо специальное испытательное оборудование, позволяющее искусственно воспроизвести механические воздействия и измерять основные параметры.

Для искусственного создания вибрации с целью испытаний используются вибраторами, которые соединяются со специальной платформой (столом), предназначенным для установки на нем испытываемого изделия. Получившиеся таким образом устройства называют вибрационными стендами.

Вибраторы различаются следующими показателями:

- видом создаваемой вибрации (линейная или угловая);
- направлением действия вибрации (однокомпонентная — прямолинейная вибрация в вертикальном или горизонтальном направлении, двухкомпонентная — круговая вибрация в вертикальной или горизонтальной плоскости, трехкомпонентная);
- формой создаваемой вибрации (гармонические синусоидальные колебания, бигармонические — два синусоидальных колебания с разными частотами, импульсные, по специальной программе и т. д.);
- видом энергетического привода (механический, электрический, пневматический и электрогидравлический).

Измерение параметров механических колебаний чаще всего производится приборами, обеспечивающими непосредственный отсчет колебательных величин или регистрирующими мгновенные значения во времени (записывающими виброграмму). Виброграммы могут быть получены с помощью осциллографов, магнитофонной и киноаппаратуры, а также другими средствами.

Виброграммы, помимо наглядного представления о колебательном процессе, позволяют после графической или расчетной обработки получить данные обо всех интересующих нас параметрах вибрации.

Большинство современных виброизмерительных приборов основано на превращении механических колебаний в электрические, что позволяет производить дистанционную запись и измерение параметров механических колебаний. При этом в месте расположения источника вибрации располагают чувствительный элемент, воспринимающий вибрацию и называемый датчиком или вибродатчиком. Современные виброизмерительные приборы могут классифицироваться по ряду признаков.

Остановимся кратко на классификации наиболее широко применяемых виброизмерительных приборов.

По роду измеряемых компонентов вибрации различают виброметры для измерения линейных компонентов и торсиометры для измерения угловых компонентов.

Виброметры бывают одно-, двух- и трехкомпонентные.

По измеряемому параметру различают:

- частотометры;
- виброметры, предназначенные для измерения амплитуды колебательного процесса (собственная частота колебаний колебательной системы виброметра должна быть ниже всех частот спектра измеряемых колебаний);
- велосиметры, предназначенные для измерения скоростей колебаний;
- акселерометры, предназначенные для измерения ускорений при колебательном процессе, вся частота спектра которого ниже его собственной частоты колебаний;
- спектрометры;
- фазометры;
- измерители линейных искажений и т. д.

По принципу преобразования механических колебаний в другие виды колебаний для их измерения или записи различают:

- механические для непосредственных измерений;
- оптические;
- пьезоэлектрические;
- электродинамические;
- емкостные;
- омические.

Помимо перечисленных признаков, приборы могут различаться по габаритным размерам, массе, способу установки, виду индикации результатов измерений и т. д.

Для оценки свойств испытываемых изделий целесообразно использовать измерительную аппаратуру, представляющую собой линейные преобразователи, обладающие достаточно высокой чувствительностью и имеющей линейные амплитудную и фазочастотную характеристики.

7.2. Средства измерения вибрации и шума

Измерение вибрации включает измерение, регистрацию и анализ величин, характеризующих вибрацию (виброперемещений, виброскоростей, виброускорений и т. д.). Измеряют и (или) регистрируют колебания непосредственно у вибрирующего элемента механическими, оптическими, электрическими и электронными средствами измерений.

История изучения и измерения вибрации насчитывает несколько десятилетий. Первыми стали применяться механические приборы, известные из медицины под названием стетоскопы, с помощью которых выслушивался шум машин, сопровождающий вибрацию, величина вибрации при этом оценивалась по восприятию органами чувств. Для выполнения этих операций персонал проходил отбор и специальную подготовку. Такая профессия называлась слухач.

Далее появились простейшие механические приборы для измерения вибрации без регистрации — индикаторы часового типа, амплитудомер А. М. Емельянова и В. Ф. Смотровая и язычковые частотомеры, приборы, измеряемая величина на шкалах которых фиксировалась визуально.

Среди приборов с регистрацией наиболее известны тастограф и аналогичные ему приборы ВР-1, ВР-2, ВР-3, предназначенные для работы в качестве виброщупов с использованием неподвижного штатива (или рук оператора вместо штатива).

Широко распространенный виброграф ВР-1А (рис. 4.3) служит для записи амплитуды и частоты колебаний машин, приборов и других объектов. Запись производится на ленте пером (процарапывается покрывающий ленту слой). Прибор измеряет вибрации при соприкосновении приемного наконечника с испытуемым объектом в направлении движения наконечника с размахом 0,1...6 мм и частотой 5...100 Гц.

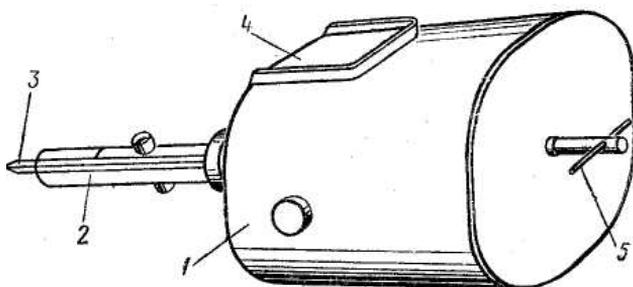


Рис. 4.3. Виброграф ручной типа ВР-1А:
 1 — корпус; 2 — направляющая трубка;
 3 — наконечник; 4 — смотровое окно;
 5 — ручка для заводки механизма протяжки ленты

Частота колебаний определяется с помощью отметчика времени, который находится в приборе и дает отметку на ленте через 1 с. При замерах виброграф удерживается непосредственно в руках (не требует подставки). Корпус вибрографа не колеблется, если частота колебаний испытываемого объекта лежит выше 4...5 Гц. Виброграф записывает колебания с размахом в пределах 0,1...1,5 мм с шестикратным увеличением, а в пределах 1,5...6 мм — с двукратным или в натуральную величину с помощью дополнительного рычажного приспособления. Масса прибора около 1,7 кг.

Оптические приборы для измерения вибрации до настоящего времени используются редко. Однако в некоторых простейших случаях они могут применяться достаточно эффективно.

На рис. 4.4 показан простейший амплитудомер — вибромарка, или мерный клин. Вибромарку вычерчивают или изготавливают фотоспособом на бумаге и наклеивают на поверхность, совершающую вибрации в направлении стрелок. При частотах выше 8... 10 Гц глаз отчетливо видит сдвоенный клин. Амплитуду колебаний определяют по соотношению $A = Hl / (2L)$; величина A обычно проставляется на вибромарке вместо значения l . Установлено, что наибольшая точность (около 0,1 мм) получается при отношении $H/L = 1/20$.

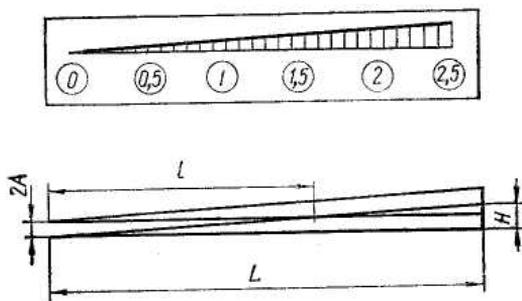


Рис. 4.4. Вибромарка — простейшее средство для измерения амплитуды колебаний

Механические и оптические приборы позволяют производить измерение одновременно только в одной точке и вблизи вибрирующего элемента.

Оптические методы измерения параметров абсолютной и относительной вибрации являются бесконтактными, поскольку основаны на использовании явлений отражения, преломления, дифракции и интерференции волн.

Фотомодуляционные методы (ФММ). Действие измерительных преобразователей, реализующих фотомодуляционные методы, основано на пространственной модуляции светового пучка или модуляции его интенсивности колеблющейся поверхностью, что может происходить за счет отражения, перекрытия или пересечения, вращения плоскости поляризации. Данные методы не критичны к источнику излучения, однако на практике чаще используют лазеры.

Метод пространственной модуляции светового пучка (иногда его называют зеркальным) основан на последующем преобразовании пространственного смещения пучка, линейного или углового, позиционно-чувствительным элементом (фотопреобразователем).

Другим распространенным методом является модуляция светового пучка некоторой структурой, имеющей функцию пропускания с четко выраженной периодичностью (например, растр или дифракционная решетка). Дискретность характеристики преобразования этого метода очевидна, причем входная величина (виброперемещение) квантуется по уровню. Сопряжением параллельных растров получа-

ют комбинационные (муаровые или нониусные) полосы. В этом случае малому перемещению подвижного растра соответствует значительное перемещение комбинационных полос.

Использование ФММ для измерения силы и ускорения основано на различных эффектах, например пьезооптическом, использующем поляризационный способ модуляции интенсивности. Являясь оптическим по принципу действия, этот измерительный преобразователь относится к типу контактных.

Возможности методов оптической регистрации вибрационных процессов, основанных на скоростной кинофотосъемке объекта и использовании стробоскопического эффекта при визуальной регистрации, исчерпываются в основном получением качественной информации о вибропроцессе.

Интерференционно-оптические методы (ИОМ), применяемые в виброметрии, основаны на использовании информации, содержащейся в фазе световой волны, отраженной от поверхности исследуемого объекта. Следовательно, получение информации о параметрах движения объекта связано с процессом демодуляции фазомодулированного (ФМ) сигнала оптического диапазона, что осуществляется (исключая способ преобразования ФМ оптического сигнала в пространственное смещение с помощью дисперсионного элемента) только посредством интерференции. Учитывая, что реальные приемники оптического диапазона (в том числе и глаз) являются квадратичными детекторами, необходимо осуществлять следующую последовательность преобразований сигнала в измерительном канале такого типа: фазовая модуляция (эффект Допплера) — фазовая демодуляция (интерференция) — квадратичное детектирование (фоторегистрация).

По виду получаемой информации методы оптической интерферометрии делят на локальные (дающие информацию о параметрах вибрации отдельных точек поверхности исследуемого объекта) и интегральные (дающие информацию о распределении параметров вибрации по поверхности объекта), соответственно на интерференционно-доплеровские и интерференционно-голографические.

Интерференционно-доплеровские методы. В зависимости от кинематического параметра, к которому чувствительна оптическая схема интерференционно-доплеровского измерительного преобразователя, различают интерферометры перемещения и интерфероме-

тры скорости. В первом случае сигнал на выходе интерферометра пропорционален виброперемещению, а о виброскорости судят по скорости изменения этого сигнала; во втором случае сигнал пропорционален виброскорости, а производная сигнала по времени — виброускорению.

Оптические методы измерения вибрации не получили широкого применения главным образом из-за необходимости «идеальных» лабораторных условий для измерений, а также сложности монтажа оптических приборов и их чувствительности к ударам и механическим воздействиям при транспортировке и монтаже.

Более подробная и комплексная информация о вибрации обеспечивается при измерениях вибрации электрическими и электронными измерительными приборами. Основное преимущество этих приборов — возможность дистанционного измерения и одновременной регистрации вибрации во многих точках. Электрические методы позволяют также автоматизировать измерительные процессы и организовать предупредительную и аварийную сигнализацию.

Конструкция вибродатчика представляет собой следующее (см. рис. 4.5). В корпусе датчика магнит соединен с помощью специальных подшипников качения, которые состоят из наружной и внутренней обойм. Между обоймами расположены три качающихся сектора, которые при действии возмущающей силы на корпус датчика совершают качающиеся движения вдоль оси датчика, опираясь на внутреннюю обойму подшипника, жестко соединенную с осью магнита. Внешние концы секторов через подпятники соединены с наружной обоймой подшипника, смонтированной в корпус датчика.

Среднее положение магнита по оси датчика, совпадающей с направлением измерения параметров вибрации, обеспечивается двумя цилиндрическими пружинами.

При действии возбуждающей силы на корпус датчика в направлении оси измерения сектора, качаясь в подпятниках, дают возможность подвижной системе оставаться практически на месте, а корпусу датчика с катушкой перемещаться вдоль магнита с частотой и амплитудой возмущающей силы (вибрации).

При этом витки катушки будут пересекать магнитные силовые линии постоянного магнита и в катушке будет индуцироваться ЭДС.

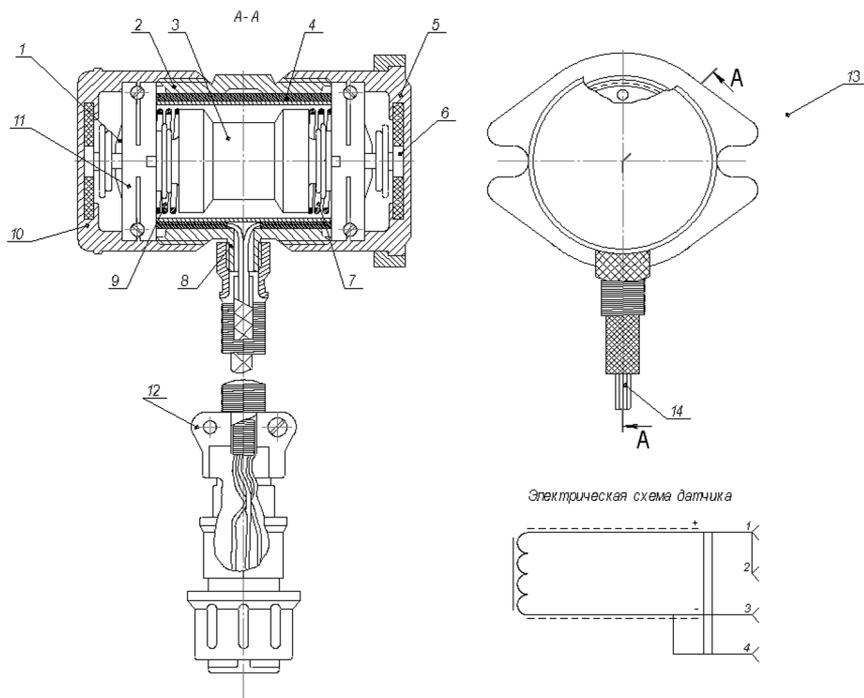


Рис. 4.5. Вибропреобразователь электромагнитный:

- 1 — сектор; 2 — корпус; 3 — постоянный магнит; 4 — катушка;
 5 — сектор; 6 — винт; 7, 9 — цилиндрические пружины; 8 — штуцер;
 10 — крышка; 11 — подшипник; 12 — штеккер; 13 — фланец;
 14 — соединительный кабель

Величина ЭДС, наводимая в обмотке, пропорциональна скорости вибрации.

Собственные колебания подвижной системы датчика гасятся противодействием основного магнитного потока и магнитного потока, который возникает из-за наличия индукционных токов в каркасе катушки.

Соединение датчика с блоком фильтров осуществляется с помощью экранированных проводов.

В датчиках ускорения получили распространение пьезоэлектрические преобразующие элементы (пьезоакселерометры), где они одновременно выполняют и роль упругого элемента механической системы.

Датчики линейного виброускорения (акселерометры). Датчики, сигнал которых пропорционален виброускорению, являются основным средством измерения характеристик вибрации и составляют одну из самых многочисленных групп датчиков вообще. Их широкая распространенность объясняется тем, что именно акселерометрам удастся придать наиболее высокие эксплуатационные качества, а знание виброускорений позволяет сравнительно просто определить другие кинематические и некоторые динамические величины.

Датчики кинематических величин могут быть датчиками характеристик относительного или абсолютного движения. В первом случае измерение ведется относительно системы отсчета, связанной с материальным объектом, на движение которого не накладывается никаких ограничений. Все акселерометры, не использующие дополнительного дифференцирования, измеряют абсолютное ускорение (ускорение в инерциальной системе отсчета) и являются приборами инерционного действия, имеющими чувствительный элемент в виде упруго закрепленной массы.

Выходной величиной преобразователя может быть почти любая кинематическая или силовая величина, однако на практике ею является напряжение, деформация или перемещение. Несмотря на разнообразие преобразователей, воспринимающих эти величины, серийно выпускают больше пьезоэлектрических, меньше — тензорезистивных и еще меньше — емкостных и индуктивных акселерометров.

Сферы применения этих датчиков различны: индуктивные акселерометры являются низкочастотными, тензорезистивные и емкостные используют в более широкой области низких и средних частот, причем все они работают от нулевой частоты. Известны тензорезистивные акселерометры с более широким рабочим диапазоном частот, но при измерении виброускорений, близких к стационарным, они не обладают какими-либо преимуществами перед пьезоэлектрическими, применяемыми практически монополюсно в области средних и высоких частот.

Акселерометр с большим рабочим диапазоном частот имеет и большой диапазон измерений. Это очень удобно, т. к. на многих технических объектах виброскорость в незначительной степени зависит от частоты и, следовательно, виброускорение увеличивается с ростом частоты.

подавляющее большинство акселерометров предназначено для измерения одного компонента вектора ускорения, однако применяемые преобразователи позволяют конструировать малогабаритные двух- и трехкомпонентные датчики.

Акселерометры целесообразно систематизировать по эксплуатационным особенностям: к первой эксплуатационной группе относят акселерометры для лабораторных, цеховых и натуральных измерений, непосредственно проводимых человеком в сравнительно легких условиях, в которых погрешность измерения определяется главным образом основной погрешностью акселерометра. Вторая группа включает приборы для цеховых и натуральных измерений в более жестких условиях, исключающих обслуживание на месте. Для них определяющими являются частные (дополнительные) погрешности, вклад которых превосходит основную погрешность. К третьей группе принадлежат акселерометры, предназначенные для эксплуатации в крайне жестких натуральных условиях, когда без применения специальных мер неизбежно или разрушение прибора, или возрастание погрешности до 100% и более. К этой группе относят и специальные акселерометры, например сверхминиатюрные.

Акселерометры первой группы конструктивно сравнительно просты (рис. 4.6). Пьезоэлектрический МЭП в них обычно работает на растяжение-сжатие, а тензорезистивный — на изгиб. Наряду с керамическими пьезоэлементами используют и монокристаллические, преимущественно в образцовых датчиках. В электрической схеме обычно используют простейший несимметричный выход. Съемный кабель, выведенный вверх или вбок, облегчает установку на объекте и демонтаж. По этой причине применяется резьбовое, магнитное или мастичное крепление к объекту.

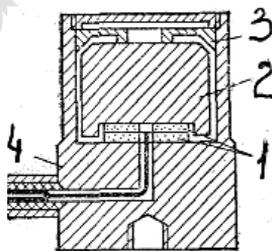


Рис. 4.6. Простейший пьезоэлектрический акселерометр:
1 — пьезоэлементы; 2 — чувствительный элемент;
3 — пружинная поджимная гайка; 4 — корпус

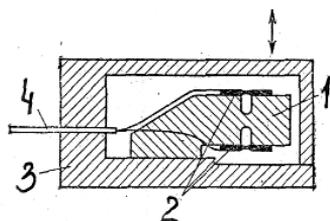


Рис. 4.7. Акселерометр с полупроводниковыми тензорезисторами:
 1 — инерционный (чувствительный) элемент; 2 — тензорезисторы;
 3 — основание корпуса; 4 — кабель

Большое внимание уделено повышению основной чувствительности и снижению поперечной. Низкочастотные акселерометры часто снабжают демпферами, иногда применяют встроенные усилители сигнала. Акселерометры этой группы ориентированы на измерение вибрационных ускорений низкой и средней интенсивности (до $1000\text{--}10000\text{ м/с}^2$). Их широко используют при градуировке других приборов методом сличения.

При разработке акселерометров второй группы приняты меры по улучшению и стабилизации характеристик и облегчению длительной эксплуатации. В среднем их габариты меньше. Благодаря особой форме основания и корпуса ослаблена чувствительность к деформациям основания. Широко применяют неразъемный кабель, выводимый как вверх, так и вбок, повышена герметичность конструкции. В ряде датчиков используют симметричный электрический выход для повышения помехоустойчивости, клеевое или резьбовое с клеевой фиксацией крепление к объекту. Чувствительность акселерометров этой группы может быть ниже, чем предыдущей, т. к. важнее ее относительная стабильность. Более широко применяют многокомпонентные датчики и встроенные усилители. Демпферы, как правило, отсутствуют. По диапазонам измерения акселерометры этой группы близки к предыдущей; рабочий диапазон частот может быть несколько шире (до $10\text{--}15\text{ кГц}$).

На рис. 4.8 показана схема нечувствительного к деформациям корпуса пьезоэлектрического акселерометра с симметричным выходом. Для увеличения чувствительности к ускорению вместо изоляторов применены пьезоэлементы, а для увеличения помехоустойчивости использована емкостная симметрия пьезоэлементов.

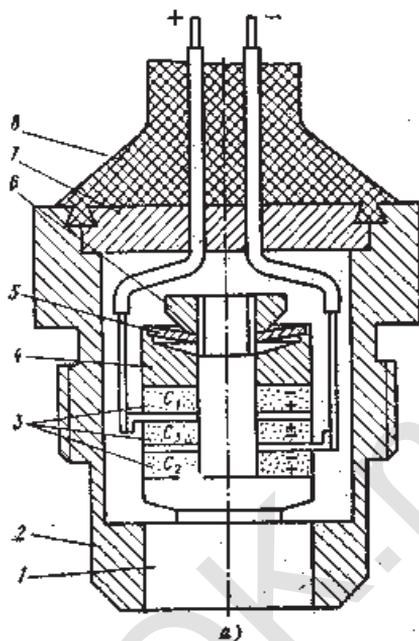


Рис. 4.8. Пьезоэлектрический акселерометр с симметричным выходом:

- 1 — основание; 2 — корпус; 3 — пьезоэлементы;
 4 — инерционный (чувствительный) элемент; 5 — пружина;
 6 — гайка; 7 — крышка; 8 — герметизация

Акселерометры третьей группы (рис. 4.9. и 4.10), обладающие еще более высокой защищенностью от внешних воздействий, в значительной степени специализированы. Например, для измерений при высоких температурах или больших уровнях радиации используют стабилизированные материалы и жесткие кабели, а иногда и принудительное охлаждение. В акселерометрах, устойчивых к интенсивным электромагнитным воздействиям, чувствительный элемент изолирован от корпуса, имеет симметричный выход, в некоторых случаях используется специальный кабель с двойной экранировкой. Стойкие к нестационарным механическим и тепловым воздействиям акселерометры конструируют дифференциальными. Указанные конструктивные особенности вне специальных условий применения не дают

каких-то преимуществ или даже затрудняют измерения. Для акселерометров этой группы характерна высокая вибропрочность во всех направлениях, что заставляет использовать неразъемный кабель, выведенный вбок почти на уровне посадочной плоскости, реже — специальный вибростойкий разъем в основании. Диапазоны измерения и рабочие диапазоны частот наиболее широки.

Современные акселерометры могут измерять виброускорения от 10^{-3} до 10^5 м/с² в диапазоне частот от 0,5 Гц до 50 кГц. Однако наиболее широко применяют акселерометры, рассчитанные на измерение ускорений до 10 000 м/с² с частотами до 10–15 кГц. Основная погрешность 2–10%. Рабочие температуры от –250 до +750 °С. Масса некоторых акселерометров составляет десятые и сотые доли грамма.

При эксплуатации акселерометров необходимо соблюдать ряд предосторожностей во избежание увеличения погрешности или получения неверных результатов. Резьбовое крепление высокочастотных акселерометров следует уплотнять и по возможности фиксировать клеем. Кабель следует закреплять, особенно в непосредственной близости от акселерометра, что легче осуществить при боковом выводе кабеля. При высокочастотных измерениях целесообразно использовать акселерометры с известной собственной частотой колебаний перпендикулярно измерительной оси, поскольку она обычно ниже паспортной собственной частоты, а высокочастотные виброускорения имеют почти сплошной спектр и произвольные направления, так что возможно возникновение поперечного резонанса. Чувствительность не следует выбирать чрезмерно высокой, т. к. это может привести к повышению нелинейных искажений. После датчика рекомендуется включать фильтр, максимально ограничивающий с обеих сторон рабочий диапазон частот.

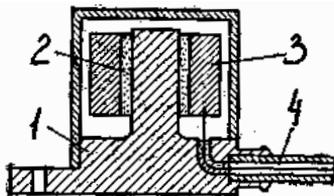


Рис. 4.9. Низкочастотный дифференциальный акселерометр:

- 1 — основание; 2 — пьезоэлемент;
3 — составной инерционный элемент; 4 — кабель

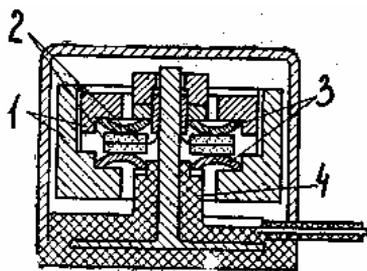


Рис. 4.10. Высокотемпературный пьезоакселерометр:
1 — основание; 2 — пьезоэлемент, работающий на сдвиг;
3 — инерционный элемент;
4 — жесткий кабель с неорганической изоляцией

Виброускорения измерять можно путем электрического дифференцирования сигнала датчика скорости. Этот метод используют редко и только в низкочастотной области, т. к. датчики скорости уступают акселерометрам по ряду метрологических характеристик, по прочности и устойчивости к эксплуатационным воздействиям.

В датчиках линейной виброскорости можно использовать элементы, чувствительные к относительной скорости, без предварительного механического преобразователя.

Вместе с тем относительную скорость часто измеряют путем дифференцирования сигнала датчика перемещения. Этот метод рекомендуется применять в тех случаях, когда измерение перемещения должно проводиться как основное. Промышленный выпуск датчиков относительной скорости крайне мал.

Сравнение метрологических и эксплуатационных свойств датчиков виброскорости и акселерометров показывает, что у акселерометров они выше почти по всем показателям. Применение датчиков скорости дает единственное преимущество — большой выходной сигнал. Но это преимущество не является решающим, поэтому для измерения абсолютной виброскорости наиболее часто используют акселерометры с последующим интегрированием сигнала. Такой метод позволяет сократить количество и разновидности датчиков, применяемых при измерениях. По этим причинам промышленный выпуск датчиков абсолютной скорости относительно невелик.

Различают датчики измерения углового виброускорения, угловой виброскорости и углового виброперемещения (колебательного угла поворота). Все сказанное относительно прямолинейных датчиков относится и к угловым. В основном их специфика связана только с вращательным движением и проявляется в конструктивных решениях.

Характеристики угловой вибрации часто измеряют в условиях установившегося или изменяющегося вращения с большой угловой скоростью и, следовательно, больших осецилирующих ускорений. Это накладывает отпечаток на конструкцию угловых датчиков. Менее жесткие требования предъявляются к датчикам для измерения угловой вибрации невращающихся объектов — станков с мягкой виброизоляцией, автомобилей, сидений операторов и др. Большинство описываемых и изготавливаемых датчиков предназначено для измерения крутильных колебаний валов и связанных с ними деталей. Для измерения угловых ускорений чаще используют датчики инерционного действия. В них применяют упругий элемент, работающий на кручение, или несколько симметрично расположенных упругих элементов, работающих на изгиб или растяжение-сжатие (рис. 4.11). В угловых акселерометрах используют как параметрические элементы, чувствительные к деформации, перемещению, напряжению (тензорезистивные, индуктивные, магнитоупругие), так и генераторные (электродинамические и пьезоэлектрические, рис. 4.12). МЭП конструируют так, чтобы он реагировал только на характеристики вращательного движения.

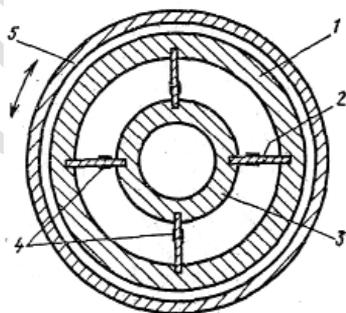


Рис. 4.11. Угловой тензорезисторный акселерометр (в разрезе):

- 1 — инерционный (чувствительный) элемент;
- 2 — упругий элемент; 3 — опорное кольцо; 4 — тензорезисторы;
- 5 — корпус (токосъемник не показан)

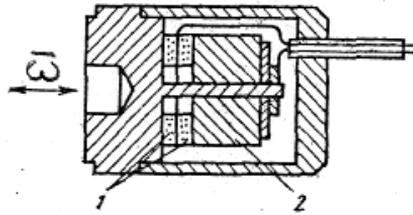


Рис. 4.12. Угловой пьезоэлектрический акселерометр:
 1 — пьезоэлементы с радиальной поляризацией;
 2 — инерционный элемент

Современные угловые акселерометры рассчитаны на измерение ускорений до 10^5 рад/с² с частотами до 2 кГц, однако обычно их диапазоны значительно уже. Рабочий диапазон температур невелик (от -30 до +70°).

Максимальные измеряемые угловые виброперемещения не превосходят 0,1 рад, частотный диапазон 10–1000 Гц. В ряде случаев для точных измерений угловой вибрации тел применяют совокупность только прямолинейных датчиков.

7.3. Применяемое оборудование для вибродиагностики

Особенностью современного рынка приборов вибродиагностики является то, что при производстве анализаторов вибросигналов фирмы-разработчики ориентируются на определенную сферу их применения. Это может быть решение вполне определенных проблем или, что бывает чаще всего, некоторое универсальное применение прибора. По мнению разработчиков именно такой набор свойств позволяет решать наиболее часто встречающиеся проблемы контроля состояния и диагностики дефектов оборудования. Обычно такой подход себя оправдывает, но достаточно часто от прибора требуются некоторые специальные функции. Каждая новая специализированная функция прибора увеличивает его стоимость. Проблема выбора прибора с оптимальным набором технических параметров, с одной стороны, предполагает получение максимума свойств, а с другой — всегда проходит в рамках определенного бюджета предприятия.

Учитывая специфику развития цифровых систем, схемотехники и информационных технологий, следует отметить, что аналоговые

приборы практически вытеснены, за исключением отдельных моделей, выпускаемых до сих пор.

При выборе средств измерений необходимо учитывать специфические вопросы, влияющие на выбор анализатора вибросигналов с оптимальным (иногда и уникальным) набором параметров. (Все рассматриваемые ниже свойства приборов реально присутствуют в тех или иных модификациях различных фирм).

В первую очередь необходимо учитывать требования к анализаторам вибросигналов, обусловленные диагностикой технического состояния и дефектов некоторых типов оборудования. Наибольшие отличия от «обычной» диагностики имеют:

- подшипники качения;
- тихоходное вращающееся оборудование с подшипниками качения и скольжения;
- многоканальная синхронная диагностика сложных вращающихся агрегатов;
- поршневые компрессоры и двигатели внутреннего сгорания;
- асинхронные электродвигатели.

Кроме этого, существует ряд специфических диагностических операций, требующих от анализаторов вибросигналов определенных технических параметров:

- разгон-выбег агрегатов;
- балансировка роторов в собственных подшипниках.

Общей задачей вибрационной диагностики является обслуживание вращающегося оборудования по техническому состоянию на основе информации о вибрации агрегатов.

При выборе приборов важным является вопрос программного обеспечения виброконтроля. Он тоже имеет два аспекта:

- внутреннее программное обеспечение прибора;
- внешнее, располагаемое на компьютере.

В настоящее время все вибродиагностические комплексы принято делить на два типа — портативные и стационарные. Портативные, в свою очередь, можно условно разделить на следующие виды:

1. Виброметры — приборы со встроенным или выносным датчиком, позволяющие измерять какой-либо интегральный параметр вибрации СКЗ, ПИК или ПИК-ПИК в фиксированном частотном диапазоне (как правило, СКЗ виброскорости). Пользователь такого

прибора может оценить исправность того или иного узла контролируемого оборудования, плотно прижав металлический щуп прибора к поверхности контролируемой машины и сравнив полученный результат измерений с допустимым уровнем вибрации, приведенным в эксплуатационной документации на агрегат. На основании периодических измерений составляются графики изменения параметров по каждой точке. Эти графики позволяют наглядно продемонстрировать изменения и отфильтровать «выпадающие» измерения, с достаточно высокой точностью прогнозировать дальнейшее изменение интегрального состояния контролируемого оборудования. Использование приборов типа виброметров не требует специальной подготовки персонала. Виброметры наиболее эффективно могут применяться для контроля состояния небольших насосов, электродвигателей и т. п.

2. Сборщики данных — более сложные приборы со встроенной памятью, календарем и часами реального времени. Они имеют возможность сбора данных с большого числа точек в соответствии с заданными при помощи ПЭВМ маршрутами измерений (от 8192 до 65536 отсчетов СКЗ). Способны передавать результаты измерений в ПЭВМ для хранения в базе данных и дальнейшего анализа с помощью специализированного программного обеспечения. Программное обеспечение такого рода позволяет давать не только интегральную оценку состояния оборудования, но и выявлять причины изменений этого состояния на основе спектрального анализа, различных видов фильтрации и другой математической обработки. Информацию, собранную этими приборами, можно обрабатывать и без помощи ПЭВМ (см. выше).

3. Виброанализаторы — приборы, имеющие более широкие возможности, а именно:

- более одного канала измерений;
- возможность загрузки специализированного программного обеспечения непосредственно в прибор;
- возможность редактирования маршрута измерений;
- возможность обработки данных;
- наличие встроенного аппарата спектрального анализа;
- возможность составления отчетов;
- возможность распечатки отчетов;

- возможность проведения балансировки роторов в собственных опорах.

Стационарные системы бывают также нескольких видов:

1. Системы виброзащиты выполняют функцию выдачи предупредительной сигнализации и аварийной остановки оборудования в случае превышения в какой-либо из точек измерения максимально допустимого уровня вибрации.

2. Системы мониторинга кроме виброзащиты выполняют следующие функции:

- протоколирование событий, связанных со срабатыванием сигнализаций;
- автоматический контроль тенденции изменения параметров;
- архивирование собранных данных и событий;
- отображение текущих значений параметров в типовом виде;
- создание специальных алгоритмов обработки данных.

3. Системы диагностики и анализа по сравнению с системами мониторинга имеют более мощное аппаратное и программное обеспечение, позволяющее дополнительно проводить глубокий анализ собранных данных и на его основе делать выводы о состоянии оборудования и его остаточном ресурсе.

Как правило, стационарные системы имеют следующие возможности:

- построения конфигурации в зависимости от поставленных задач;
- интегрирования в автоматизированные системы управления технологическим процессом;
- масштабирования от уровня агрегата до уровня цеха или предприятия с выходом на региональный диагностический центр.

7.4. Современное состояние технических средств анализа вибрации

Общая структура систем измерения и анализа вибрации, будь то технические средства вибрационного контроля и защиты, вибрационного мониторинга или диагностики, включает в себя первичные измерительные преобразователи, согласующие устройства, линии связи, собственно средства анализа, базу данных (в простейшем случае — пороговые устройства) и средства (программы) обработки информации (рис. 4.13).

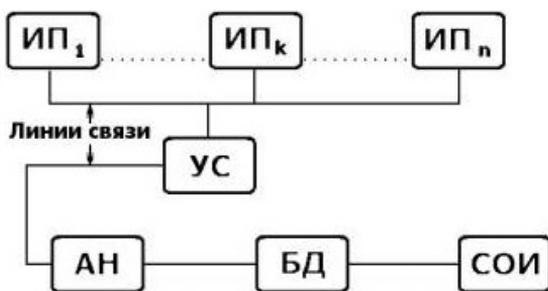


Рис. 4.13. Структурная схема системы измерения и анализа вибрации: ИП — измерительные преобразователи; УС — устройства согласования; АН — анализатор; БД — база данных; СОИ — средства обработки информации

В зависимости от задач, решаемых с помощью приборов или систем измерения и анализа вибрации, к ним предъявляются различные технические требования. Существующие технические средства можно классифицировать следующим образом:

- средства допускового контроля и аварийной защиты;
- индикаторы состояния объектов контроля;
- средства вибрационного мониторинга;
- средства вибрационной диагностики;
- исследовательские приборы и системы.

Все средства измерения и анализа вибрации используют измерительные вибропреобразователи, причем чаще других применяются пьезоэлектрические преобразователи виброускорения (акселерометры), оптические (лазерные) преобразователи виброскорости и токовихревые преобразователи относительного виброперемещения (проксиметры). Кроме них для обеспечения синхронных видов анализа вибрации часто используются либо оптические или токовихревые датчики оборотов, либо датчики тока (напряжения) синхронных электрических машин, в том числе генераторов электроэнергии.

Вибропреобразователи

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается достаточно много вибропреобразователей, отличающихся чувствительностью, размерами, способами крепления, условиями работы.

Среди них достаточно много аналогичных друг другу по характеристикам, выпускаемых различными фирмами. Ниже приведены некоторые типичные виды датчиков наиболее известных отечественных фирм. Датчик ВП-3 (производитель ООО «Технекон» г. Москва) представляет собой пьезоэлектрический акселерометр с встроенным блоком электроники. Внешний вид и схема соединений приведены на рис. 4.14.

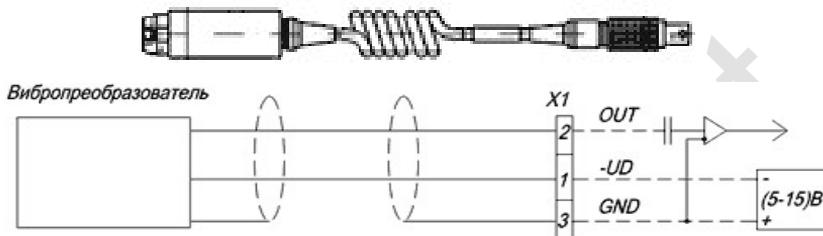


Рис. 4.14. Акселерометр ВП-3

ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы — ЗЭТ» выпускает миниатюрные трехкомпонентные вибропреобразователи, предназначенные для измерения трех взаимоперпендикулярных составляющих пространственного вибрационного и ударного ускорения в составе портативных или стационарных диагностических систем, при лабораторных исследованиях.

Основные особенности: конструкция с тремя сдвигowymi чувствительными элементами; неразъемный трехжильный антивибрационный кабель; сочетание миниатюрности и приемлемой чувствительности (рис. 4.15).

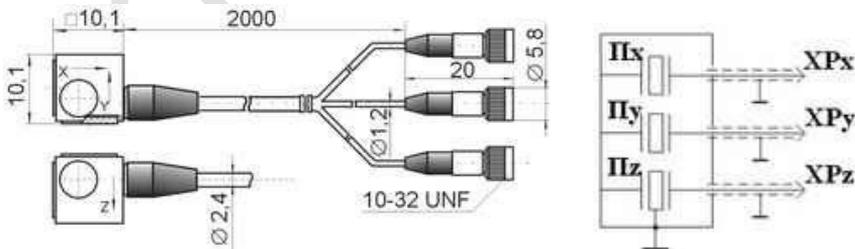


Рис. 4.15. Общий вид и электрическая схема датчика AP20

Для связи вибропреобразователя со средствами анализа используются линии проводной или беспроводной связи и согласующие устройства. В простейшем случае это предварительные усилители сигнала. Для пьезоакселерометров в зависимости от характеристик линии связи могут использоваться предварительные усилители напряжения, заряда или тока, причем достаточно часто для обеспечения высокой помехоустойчивости средств измерения и анализа вибрации (особенно многоканальных) предварительные усилители встраиваются в один корпус с акселерометром. В более сложных случаях согласующее устройство может выполнять функции предварительной фильтрации сигнала, коммутации линий связи, преобразования сигнала в цифровую форму, а также ряд других.

Большинство требований предъявляется не к отдельным элементам устройств измерения и анализа вибрации, а к приборам или системам в целом. Чаще всего эти требования могут определять:

- основные виды анализа и контролируемые параметры вибрации;
- динамический и частотный диапазоны измерения и анализа;
- линейность отдельных операций и параметров прибора (системы);
- скорость выполнения операций анализа и время принятия решений;
- количество параллельных каналов измерения и анализа;
- помехоустойчивость и надежность;
- ресурс и ремонтпригодность.

Собственно анализатор является основой любого средства измерения и анализа вибрации и может существовать как независимое устройство. В последнем случае могут предъявляться требования к характеристикам входных и выходных сигналов.

Простейшие средства измерения и анализа вибрации

Простейшими по глубине анализа техническими средствами являются приборы и системы допускового контроля и аварийной защиты. Их обязательной функцией является измерение величины виброскорости или вибросмещения в стандартной полосе частот, например от 2 до 1000 Гц или от 10 до 1000 Гц. Для этого в составе прибора используется широкополосный фильтр со стандартной амплитудно-частотной характеристикой. Широкая полоса частот фильтра позволяет обеспечить быструю реакцию выходного сигнала на скачок вибрации контролируемого оборудования, удовлетворив тем самым требования к системам аварийной защиты по скорости их срабатывания. Кроме требований к форме АЧХ и скорости срабатывания к устройствам

виброзащиты, предъявляются высокие требования по помехоустойчивости и надежности с целью снижения вероятности ложного срабатывания устройства до значений, устанавливаемых технической документацией.

На рис. 4.16 приведен вид простейшего прибора (виброметра) для допускового контроля вибрации производства фирмы «Виконт» и простейшего устройства аварийной защиты (сигнализации) по сигналу вибрации производства фирмы ВАСТ.

К сожалению, многие виброметры, разработанные на основе аналоговой измерительной техники, имеют низкую стабильность АЧХ и надежность, а ряд систем виброзащиты не обеспечивает современных требований по вероятности ложного срабатывания.

Стандартами по безопасности труда в промышленности регламентирован допусковой контроль вибрации оборудования и помещений, который может производиться в нескольких полосах частот от 0,8 до 80 Гц или от 8 до 1000 Гц (для ручного инструмента).

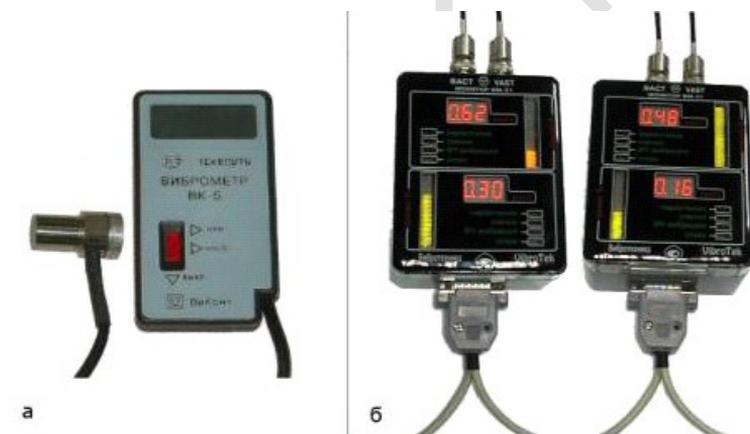


Рис. 4.16. Простейшие виброметр (а) и система виброзащиты (б)

Для этой цели в ряде средств вибрационного контроля предусмотрены возможности частотного анализа вибрации, например, в октавных или третьоктавных полосах частот. В промышленной безопасности производится одновременно контроль как вибрации, так и акустического шума, поэтому некоторые приборы допускового кон-

троля могут иметь взаимозаменяемые или параллельные каналы измерения как вибрации, так и шума.

Иногда встречаются и виброметры с несколькими преобразователями вибрации на входе, позволяющие работать с трехмерными измерительными преобразователями вибрации или группой преобразователей.

Не отличаются сложностью анализа вибрации и приборы, выполняющие функции индикаторов состояния. Задачей такого прибора является раннее обнаружение признаков одного (или группы) возможных дефектов контролируемого оборудования. Из всего множества дефектов выбираются такие, которые, с одной стороны, просто и эффективно обнаруживаются по сигналу вибрации, а с другой — присутствуют в любой из цепочек дефектов, быстро развивающихся в предаварийном состоянии контролируемого оборудования.

Практически единственным успешно применяемым в вибрационной диагностике классом приборов такого типа можно назвать индикаторы состояния подшипников качения по ультразвуковой вибрации неподвижных элементов этих подшипников, возбуждаемых ударными импульсами при контакте тел качения с неподвижным кольцом подшипника. Индикаторы состояния подшипников обычно измеряют ультразвуковую вибрацию в достаточно широкой полосе частот. Центральная частота этой полосы в разных приборах может быть различной, начиная от 20-30 кГц и заканчивая значениями выше 100 кГц. Контролируется обычно среднеквадратичное значение ультразвуковой вибрации (мощность ударных импульсов) и величина пикфактора или крестфактора (форма одиночных ударных импульсов).

Простота измерений и доступность получаемой информации позволяет использовать эти приборы обслуживающему персоналу без специальной подготовки, а при обнаружении нештатной ситуации вызывать специалистов для проведения более сложного исследования вибрации. Поскольку индикаторы состояния дают одинаковую информацию при появлении как неопасного одиночного дефекта, так и предаварийной цепочки быстроразвивающихся дефектов, проводить контроль состояния подшипников с их помощью следует достаточно часто, не реже одного раза в течение 3-5 суток. Один из вариантов индикатора состояния подшипников производства фирмы Меткатом приведен на рис. 4.17.



Рис. 4.17. Индикатор состояния подшипников ИРП-12

В последние годы все чаще стали появляться приборы и системы, объединяющие функции допускового контроля оборудования по низкочастотной вибрации и индикатора состояния подшипников качения по ультразвуковой вибрации.

Стационарные системы мониторинга и диагностики

Более сложные виды анализа могут использоваться в средствах вибрационного мониторинга. Основным назначением средств вибрационного мониторинга является обнаружение необратимых изменений вибрации оборудования и прогнозирование скорости их развития. К дополнительной задаче, которая может решаться средствами мониторинга, можно отнести определение причин обнаруженных изменений. Эта задача решается экспертом, анализирующим результаты мониторинга, в том числе с применением специальных экспертных программ.

Средства вибрационного мониторинга объединяются в системы защитного или прогнозирующего мониторинга. Чаще других используются системы защитного мониторинга, анализирующие информацию о многих структурных и рабочих параметрах объекта мониторинга. В таких системах обычно проводится лишь простейший анализ вибрации с помощью стандартных контроллеров. Лишь в некоторых случаях кроме величины вибрации в стандартной полосе частот выполняется спектральный анализ вибрации в полосе частот до 1-2 кГц, причем требования к качеству такого анализа обычно гораздо ниже,

чем к надежности технических средств. Структура выходных данных вибрационных каналов в системах защитного мониторинга, как правило, определяется стандартами на системы автоматического контроля и управления.

Основу систем «прогнозирующего» вибрационного мониторинга вращающегося оборудования, которые чаще всего содержат только каналы измерения и анализа вибрации, составляет ее спектральный анализ. К средствам спектрального анализа таких систем предъявляются весьма высокие требования. Верхняя частота спектрального анализа может ограничиваться типовыми значениями ~1000–2000 Гц, но достаточно часто она увеличивается до значений ~20 кГц и более, в зависимости от конструктивных особенностей и частоты вращения объекта мониторинга. С учетом этого выбираются и типы измерительных преобразователей вибрации. Требования к динамическому диапазону без учета его увеличения при спектральном анализе сигналов находятся на уровне ~106 и достигаются использованием АЦП с разрядностью не менее 20 или совместным использованием АЦП меньшей разрядности и усилителя с регулируемым коэффициентом усилителя. Наконец линейность измерительного и анализирующего тракта должна быть не хуже 0,1%. Не менее жесткие требования предъявляются и к помехоустойчивости систем, достигаемой, в частности, использованием дифференциальных измерительных преобразователей, преобразователей с встроенными усилителями и т. п.

Спектральный анализ вибрации вращающегося оборудования позволяет выявить более половины из возможных развитых дефектов и на этой основе не пропустить ни одной цепочки дефектов, быстро развивающихся непосредственно перед аварией контролируемого оборудования. Именно поэтому системы вибрационного мониторинга являются эффективным средством предупреждения аварий, а использование в их составе экспертной диагностической программы позволяет выявить причины необходимой остановки оборудования и быстро их устранить.

Но тот факт, что далеко не все дефекты оборудования могут быть обнаружены задолго до отказа, не позволяет давать реальный прогноз его безаварийной работы на длительное время, достаточное для практического использования переносных систем мониторинга с периодичностью измерений более 5-10 дней. Поэтому абсолютное большинство эффективных систем вибрационного мониторинга уста-

навливается на оборудовании штатно и проводит измерения вибрации через короткие интервалы времени.

Стационарное исполнение систем вибрационного мониторинга существенным образом меняет требования к средствам анализа вибрации. Во-первых, отсутствие жестких требований к габаритам анализатора и потребляемой мощности дает возможность широкого использования виртуальных анализаторов на базе персональных компьютеров. Компьютерный анализ сигналов дает возможность оперативно проводить практически любой вид анализа, поэтому многие стационарные системы при необходимости анализируют вибрацию и в установившихся, и в переходных режимах работы оборудования, в том числе во время его пуска и выбега.

Использование синхронных и многомерных видов анализа вибрации позволяет повысить эффективность экспертных систем диагностики и осуществлять прогноз вибрационного состояния оборудования. Единственным ограничивающим диагностические возможности фактором в стационарных системах мониторинга становится конечное количество точек контроля вибрации, в каждой из которых стационарно устанавливается измерительный преобразователь.

Для расширения диагностических возможностей мониторинга стационарные системы часто комплектуются дополнительным переносным каналом измерения вибрации в любой точке оборудования, где на время измерения может быть установлен измерительный преобразователь. Для этого существуют либо простейшие сборщики данных, либо переносные анализаторы вибрации.

Получив дополнительные данные, эксперт (или диагностическая программа) может решить задачу обнаружения не части, а большинства дефектов, и прогнозировать их развитие на время, гораздо большее, чем 5-10 дней. Тогда встает вопрос о том, зачем нужна стационарная система мониторинга, когда экономически выгоднее иметь переносную систему диагностики с возможностью прогноза состояния оборудования на срок между диагностическими измерениями, который может быть доведен до 2-3 месяцев.

Как показывает практика, стационарная система мониторинга нужна в первую очередь для многорежимного ответственного оборудования, управляемого обслуживающим персоналом. Именно ошибки персонала чаще всего являются причиной лавинообразного роста дефектов управляемого оборудования, которые необходимо об-

наруживать практически мгновенно (за 2-3 оборота ротора) для своевременного предотвращения аварии.

Естественно, что для обнаружения опасных ошибок обслуживающего персонала не требуется контролировать вибрацию в большом числе точек. В то же время анализ вибрации во всех выбранных точках контроля необходимо вести параллельно, как в любой системе аварийной защиты.

Диагностическую информацию во всех точках контроля вибрации, в том числе и в точках, используемых для аварийной защиты, можно снимать последовательно, с большими интервалами времени между измерениями.

Таким образом, структура систем вибрационной защиты, мониторинга и диагностики приобретает вид, показанный на рис. 4.18.

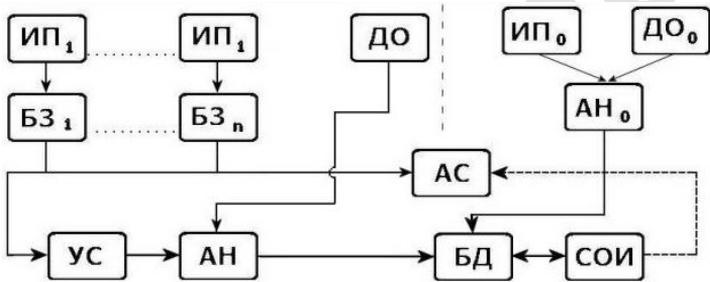


Рис. 4.18. Структура стационарной системы вибрационной защиты, мониторинга и диагностики вращающегося оборудования:

- ИП — измерительные преобразователи; ДО — датчик оборотов;
- БЗ — блоки защиты; АС — аварийная сигнализация;
- УС — устройства согласования; АН — анализатор;
- АН0 — портативный анализатор; БД — база данных;
- СОИ — средства обработки информации

Несколько иначе строится стационарная система мониторинга и диагностики однорежимного оборудования, которая используется для контроля состояния вращающегося оборудования, недоступного для работы с переносными системами диагностики. Во-первых, основной акцент в таких системах делается на глубокую диагностику, которая не требует измерений через короткие интервалы времени. Как следствие все измерения и анализ вибрации проводятся последовательно

одним анализатором, что значительно удешевляет систему. Во-вторых, задачи мониторинга и диагностики решаются независимо. Для этого простейшие мониторинговые измерения вибрации выполняются достаточно часто, с интервалами от 5 до 30 мин., а сложные диагностические измерения проводятся с интервалами несколько часов (дней), и данные интервалы зависят от реального состояния объекта (узла), определяемого по предыдущим измерениям.

К основным видам анализа при вибрационном мониторинге оборудования в типовых режимах работы можно отнести:

- измерение уровня вибрации в стандартных полосах частот;
- широкополосный, например третьоктавный, анализ вибрации;
- узкополосный спектральный анализ низко- и среднечастотной вибрации;
- статистический анализ результатов периодических измерений;
- контроль формы колебаний высокооборотного вала в подшипниках скольжения («орбиты» вала).

К основным видам анализа при глубокой диагностике вращающегося оборудования можно отнести:

- узкополосный спектральный анализ вибрации в расширенных диапазонах частот;
- узкополосный спектральный анализ огибающей высокочастотной случайной вибрации, предварительно выделенной полосовым фильтром;
- статистический групповой анализ результатов измерений диагностических параметров.

К дополнительным видам анализа как для мониторинга, так и для диагностики, можно отнести:

- синхронный спектральный анализ вибрации в переходных режимах работы;
- взаимный спектральный анализ вибрации (взаимные фазовые спектры);
- анализ собственных колебаний, возбуждаемых тестовыми возмущениями;
- анализ формы колебаний корпуса с определением амплитуд и фаз колебаний в точках контроля на частоте вращения машины (для балансировки роторов);
- анализ контролируемых параметров собственно стационарной системы мониторинга и диагностики для определения ее работоспособности и правильности получаемых результатов.

Применяются и виртуальные анализаторы сигналов. Конструктивно виртуальный анализатор сигналов вибрации обычно состоит из компьютера и двух последовательных устройств на его входе. Первое обеспечивает поддержку измерительных преобразователей и содержит источник их питания, согласующие усилители, управляемые компьютером, и фильтры. Второе устройство преобразует аналоговый сигнал в цифровую последовательность и передает ее в память компьютера. Кроме преобразователей вибрации, часто используются и датчики оборотов (углового положения вала). Оба вида устройств выпускаются многими специализированными фирмами.

Перечисленные устройства могут быть внешними, тогда передача данных идет через стандартный интерфейс связи, например USB-порт. Из-за ограничений по скорости передачи информации чаще используются встраиваемые в компьютер устройства, питающиеся от общего источника и передающие информацию непосредственно на шину компьютера.

Для различных экспертных программ, поставляемых некоторыми приборостроительными и экспертными диагностическими фирмами, могут потребоваться и другие виды анализа сигналов вибрации, а также других процессов, протекающих в диагностируемом оборудовании.

Портативные системы мониторинга и диагностики

Наряду со стационарными системами широкое применение находят и портативные переносные системы мониторинга и диагностики, оснащенные экспертными или автоматическими диагностическими программами. Эти системы можно разделить на два основных класса — расширенные системы мониторинга, в том числе и с экспертными программами, рассчитанные на то, что диагностику выполняет подготовленный эксперт, и системы массового диагностического обслуживания с программами автоматической диагностики и прогноза состояния типового вращающегося оборудования.

В состав такой системы входят портативный прибор (приборы), обеспечивающий измерение и анализ вибрации в тяжелых промышленных условиях, компьютер с программой мониторинга, содержащей базу данных и выполняющий ряд операций анализа сигналов и обработки результатов анализа, а также экспертная или автоматическая программа диагностики, обрабатывающая полученную диагностическую информацию.

Кроме этого, в состав системы часто входят приборы (программы) для сервисных работ, выполняемых с оборудованием по результатам диагностики, например для его балансировки и (или) центровки.

Важным показателем системы является граница разделения функций анализа сигналов между прибором и программой мониторинга. Иногда встречаются приборы (сборщики данных), не выполняющие функций анализа, а только собирающие временные сигналы вибрации. Поскольку качество записи сигнала на месте измерения вибрации в таких приборах проверить невозможно, они не получили широкого распространения. Чаще всего используются сборщики данных — анализаторы, которые проводят на месте операции анализа во временной и в частотной областях, а статистический анализ вибрации и результатов измерений выполняется программами мониторинга и диагностики. Существуют и приборы, которые на месте проводят операции мониторинга, а иногда и диагностики, и дают предварительный анализ состояния объекта контроля, но, как правило, достоверность результатов оценки состояния, выполненной непосредственно в приборе, оказывается существенно ниже, чем результатов диагностики по всей базе данных измерений аналогичного оборудования. Такой анализ выполняется в компьютере расширенной диагностической программой.

Поскольку объемы и (или) скорости вычислений в портативных приборах несколько ниже, чем в компьютерах, анализирующие возможности реальных приборов ниже, чем виртуальных. Для устранения возникающих в портативных системах ограничений, многие современные приборы могут работать с персональным компьютером в режиме «on-line», перекладывая на компьютер наиболее сложные виды анализа сигналов. Более того, часть приборов имеет возможность подключения на вход коммутатора сигналов от группы датчиков вибрации и оборотов, т. е. позволяет собрать на время проведения различных испытаний портативную стационарную систему мониторинга и диагностики.

Такая возможность имеет особое значение в «квазистационарных» системах мониторинга и диагностики оборудования с недоступными для периодического измерения вибрации точками ее контроля. В этом случае измерительные преобразователи могут встраиваться в объект контроля, а линии связи выводятся в доступ-

ное для подключения прибора место (коммутационный блок). Именно таким способом можно поэтапно создавать стационарные системы мониторинга и диагностики на предприятиях, ограничиваясь на первом этапе стационарной установкой только измерительных преобразователей.

Минимума затрат на мониторинг и диагностику большого количества удаленного друг от друга оборудования можно достичь, если измерения проводят несколько операторов, оснащенных портативными приборами, а результаты измерений собираются в одном компьютере с программным обеспечением для мониторинга и диагностики. Для успешного решения этой задачи в некоторые приборы встраиваются средства поддержки типовых электронных линий связи, по которым автоматически передаются результаты измерений и принимаются результаты мониторинга диагностики, а также задания на выполнение следующих измерений.

Один из портативных приборов — виброанализатор СД-12М, удовлетворяющий перечисленным требованиям, приведен на рис. 4.19. Там же показан общий вид портативной стационарной (стендовой) системы на базе этого анализатора.

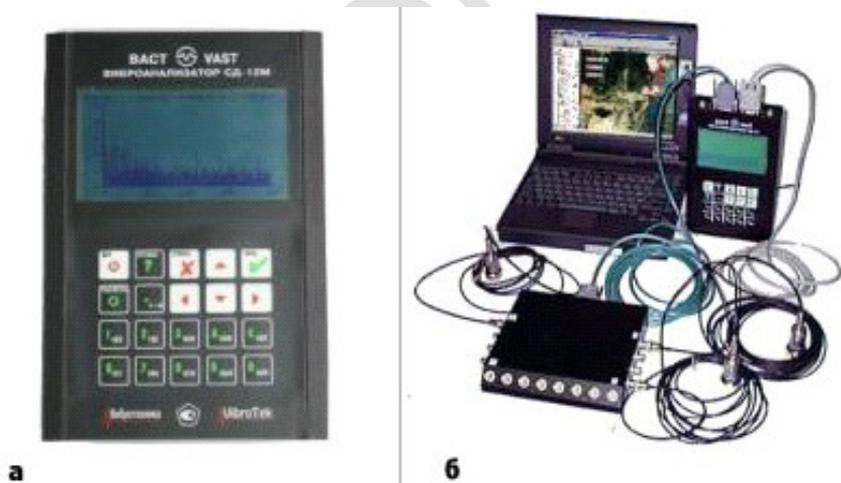


Рис. 4.19. Виброанализатор СД-12М (а) и портативная стационарная система вибрационного мониторинга и диагностики на его основе (б)

Существует минимум операций анализа, которые должен выполнять портативный прибор на месте измерения вибрации. Это перечисленные ранее основные виды анализа вибрации для решения задач мониторинга и глубокой диагностики. Следует отметить, что практически все основные виды анализа для мониторинга могут быть выполнены расчетным путем по результатам измерения узкополосных спектров вибрации во всем рабочем диапазоне частот от 0,5-1 Гц до 25-30 кГц. Для определения по ним величины вибрации в стандартных полосах частот, а также «орбит» вала не требуется больших вычислительных мощностей, т. е. они могут быть рассчитаны непосредственно в приборе и практически в реальном времени.

Что касается обязательных диагностических измерений спектров огибающей высокочастотной случайной вибрации, то такой вид анализа в реальном времени выполняют лишь некоторые из выпускаемых портативных приборов. Это связано с тем фактом, что операции фильтрации высокочастотной вибрации и формирования огибающей в реальном времени может выполнять либо мощный стандартный процессор, либо специализированный сигнальный процессор.

Мощные процессоры в портативных приборах не используются из-за ограничений по питанию, а современные сигнальные процессоры устанавливаются далеко не во все портативные анализаторы. Для обработки предварительно накопленного для построения спектра огибающей массива выборочных значений сигнала в несколько Мб с помощью процессоров, устанавливаемых в портативные приборы, необходимо время, которое может в несколько раз превышать время накопления такого массива. Это несколько ограничивает возможность использования цифровых приборов, созданных на базе одноплатных компьютеров промышленного исполнения, например пространственных приборов фирмы DI (рис. 4.20), широко используемых многими экспертами различных стран.

Что касается одной из основных операций — статистического анализа результатов измерения вибрации, то он может выполняться после передачи данных в компьютер, т. к. не используется для контроля качества выполненных измерений непосредственно на месте их проведения.

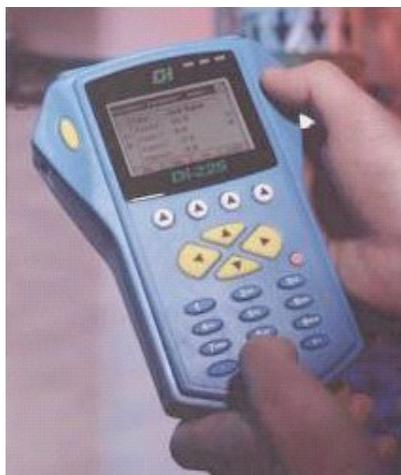


Рис. 4.20. Цифровой сборщик данных — анализатор DI-225 на основе одноплатного промышленного компьютера

Среди портативных сборщиков-анализаторов вибрации, выполняющих указанные основные виды анализа, предпочтение отдается тем, которые без ухудшения массо-габаритных, энергетических и стоимостных показателей выполняют и многие из перечисленных ранее дополнительных видов анализа. При этом особое внимание уделяется вопросу совместимости выходных данных анализатора с наиболее эффективными программами мониторинга и диагностики.

Ряд фирм выпускают виртуальные портативные анализаторы вибрации, для чего используются элементы персонального компьютера типа Notebook, объединяемые общими шиной и источником питания повышенной мощности с платой поддержки измерительных преобразователей и платой АЦП в едином корпусе. Примеры таких анализаторов приведены на рис. 4.21.

Наряду с очевидными преимуществами такие анализаторы имеют ряд недостатков, к которым следует отнести повышенные массо-габаритные показатели, а также ограниченную надежность и длительность непрерывной работы без подзарядки аккумуляторов. Кроме того, постоянное развитие портативных средств вычислительной техники определяет быстрое моральное старение подобных анализаторов.



Рис. 4.21. Виртуальные портативные анализаторы фирмы CSI (а) и Predict DLI (б)

Важным показателем портативного анализатора является стабильность во времени его характеристик, обеспечивающих основные виды анализа, предусмотренные международными стандартами по вибрационному мониторингу. Прежде всего, это относится к измерению величин виброскорости и вибросмещения в полосах частот 2-1000 Гц и 10-1000 Гц. В большинстве существующих анализаторов для этого используются электронные интеграторы сигналов с преобразователем виброускорения и электронные фильтры, характеристики которых не обладают хорошей стабильностью как во времени, так и при изменении внешних условий, например температуры. Учитывая это, ряд производителей перешел на цифровые методы интегрирования и фильтрации, но при этом далеко не все смогли сохранить высокий динамический диапазон измерений, уложившись в минимальные границы, задаваемые стандартами. В то же время в задачах расширенного мониторинга и диагностики требуется и расширенный динамический диапазон стандартных измерений (не менее 60 дБ), который обеспечивает далеко не каждый из цифровых портативных анализаторов вибрации.

Исследовательские приборы и системы

Среди задач вибрационного мониторинга и диагностики встречаются и такие, решение которых требует проведения специальных исследований, для которых может не хватать возможностей типовых анализирующих приборов.

Поэтому ряд приборостроительных фирм выпускает технические средства для расширенного анализа сигналов, которые предусматривают предварительную запись этих сигналов в память прибора с последующим его многократным анализом различными методами.

Отличительными особенностями исследовательских приборов и систем являются:

- возможность запоминания больших массивов информации, в том числе и измеряемых сигналов, без искажений и потерь информации;
- многоканальность с возможностью параллельной записи и анализа сигналов с выхода измерительных преобразователей разных физических процессов;
- возможность проведения большинства существующих видов анализа сигналов.

Большинство из таких приборов и систем строятся на базе виртуальных анализаторов, т. е. компьютеров с входными устройствами, поддерживающими различные виды измерительных преобразователей. Количество параллельных каналов измерения в различных приборах и системах может меняться от двух до нескольких десятков. Верхняя граница частотного диапазона таких каналов определяется тремя основными факторами — частотным диапазоном измерительных преобразователей, ограничениями по питанию системы и по ее стоимости. Типовое число параллельных каналов измерения вибрации во всем диапазоне частот, от $\sim 0,5$ Гц до ~ 30 кГц, используемом при решении диагностических задач, составляет 4–8. При снижении верхней границы частотного диапазона измеряемых сигналов в 4 раза количество параллельных каналов измерений может быть увеличено приблизительно вдвое.

Если передача цифровой информации с устройств поддержки измерительных преобразователей идет через внешние каналы связи, например через USB-порт, количество параллельных каналов в исследовательских системах снижается. Однако скорости передачи информации в компьютер непрерывно растут, и в ближайшем будущем, вероятно, они перестанут определять количество параллельных каналов измерения различных процессов в исследовательских виртуальных системах.

Таким образом, технические исследовательские системы измерения и анализа вибрации на базе виртуального анализатора могут иметь три основных конструктивных варианта. Первый представляет

собой две платы, встраиваемые в стандартный компьютер, одна из которых имеет несколько линейных аналоговых входов с управляемыми усилителями и фильтрами, а вторая — многоходовый аналого-цифровой преобразователь, передающий данные в память компьютера по общей шине. Кроме компьютера с платами, который чаще всего является Portable компьютером, в систему могут входить внешний коммутатор с количеством входов, определяемым числом точек контроля в исследуемом оборудовании, и сами измерительные преобразователи с источниками питания и согласующими устройствами (рис. 4.22 а).

Второй вариант представляет собой компьютер и внешнее устройство со своим источником питания, которое выполняет перечисленные выше функции поддержки первичных преобразователей, коммутации сигналов, их согласование, фильтрацию, собственно АЦП преобразование и передачу цифровой информации по стандартному интерфейсу (рис. 4.22 б).

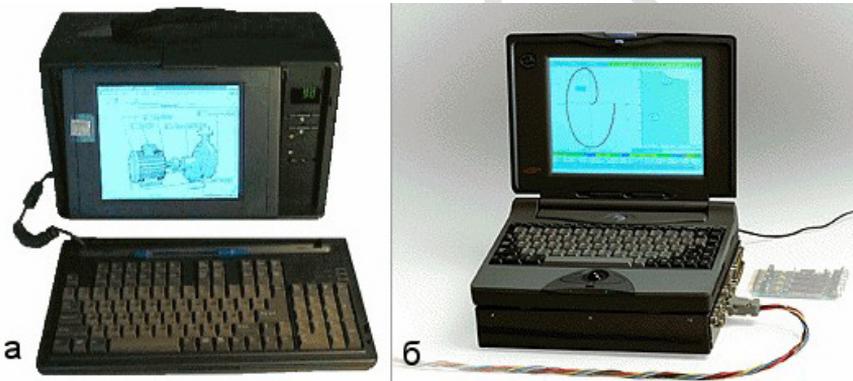


Рис. 4.22. Многоходовые виртуальные анализаторы на базе компьютера производства фирмы ВАСТ и производства фирмы Мера

Во втором варианте систем чаще других используются компьютеры типа Notebook, что позволяет в некоторое время использовать систему в полевых условиях без внешнего источника питания.

Третьим вариантом можно считать виброанализатор, конструктивно объединяющий Notebook и входное устройство в корпусе одного прибора.

Как правило, большинство исследовательских виртуальных анализаторов имеет небольшое число параллельных каналов измерения (до 4-х аналоговых и столько же цифровых), что позволяет производить запись сигналов во всем рабочем диапазоне частот. Существует, однако, ряд исследовательских задач, например анализ режимов пуска и остановки работы крупных машин, когда количество параллельных измерительных каналов должно быть много больше, но частотный диапазон измеряемых сигналов может быть существенно сокращен. Для решения таких задач можно использовать специальные многовходовые устройства параллельного приема сигналов с передачей цифровой информации по стандартному интерфейсу, чаще всего через USB-порт компьютера.

Исследовательские системы на базе виртуальных анализаторов вибрации и других процессов, как правило, имеют широкие возможности для анализа сигналов в рамках функциональной и тестовой диагностики оборудования, а также для модального анализа механических систем и конструкций. В то же время не меньший интерес представляют анализирующие приборы, даже в тех случаях, когда их возможности ниже, чем у виртуальных анализаторов.

Причиной интереса является не только возможность работы в автономном режиме и в тяжелых промышленных условиях. Не менее важной особенностью является то, что производители таких приборов активно развивают и совершенствуют программное обеспечение для мониторинга и диагностики различного оборудования, которое, как правило, совместимо только с ограниченной номенклатурой технических средств. А эффективность решения практических задач мониторинга и диагностики зависит от возможностей всей совокупности имеющихся у пользователя технических средств и программного обеспечения. Определенный интерес представляют технические средства, расширяющие возможности параллельного анализа с помощью промышленных анализаторов вибрации. К ним относятся, например, многовходовые приставки (рис. 4.23).

При проведении диагностирования вращающегося оборудования по параметрам вибрации, прежде всего, необходимо получать достоверные измерения виброакустических сигналов в контрольных точках. Для этого нужно помимо соблюдения правил установки датчиков использовать приборы-спектроанализаторы, которые отвечают определенным требованиям.



Рис. 4.23. Анализатор с многоканальной приставкой для параллельного измерения низкочастотной вибрации производства фирмы Диамех

В настоящее время ряд российских фирм разрабатывают и производят оборудование, предназначенное для измерения характеристик виброакустических сигналов. Имея общее назначение, эти приборы значительно различаются между собой по предоставляемым возможностям и удобству в эксплуатации. Поэтому, перед тем как остановить выбор на том или ином устройстве, необходимо предварительно провести их сравнительный анализ и оценить, в какой мере они удовлетворяют уровню задач, предъявляемых виброакустической диагностикой.

К необходимым возможностям, которыми должны обладать приборы, анализирующие вибрацию, относятся:

- проведение анализа временных характеристик сигналов и анализа временной развертки сигналов (режим осциллографа);
- проведение спектрального анализа вибрации, т. е. осуществление разделения вибрации на частотные составляющие в широком диапазоне частот (от долей Герца до 20 кГц), с возможностью выбора различных частотных поддиапазонов;
- проведение спектрального анализа огибающих высокочастотных сигналов вибрации с возможностью перестройки средней частоты полосового фильтра и выбором различных пределов частотного диапазона;
- обеспечение достаточной разрешающей способности, до 1600 линий/спектр;

- обеспечение усреднений по спектральным характеристикам;
- оценка выбросов в сигнале вибрации, т. е. определение пик-фактора (отношение пикового и среднеквадратичного значений);
- определение общего уровня вибрации в полосе частот, требуемой стандартами вибрационного контроля;
- проведение измерений по маршруту;
- возможность передачи накопленных измерений в компьютер для их дальнейшей обработки.

Дополнительными функциями, которыми должны бы обладать приборы, являются балансировка роторов в собственных опорах, наличие графического жидкокристаллического дисплея, возможность загрузки маршрута измерений из компьютера.

На сегодняшний день наиболее известными и широко представленными на рынке сборщиками-спектроанализаторами виброакустической информации, из изготавливаемых в РФ, являются: «ПР-200А» (НТЦ «Приз» г. Москва), «Кварц» и «Топаз» (ООО «Диамех» г. Москва).

Все указанные приборы являются сложными программно-аппаратными комплексами, созданными на базе микропроцессорных модулей. Использование микропроцессоров позволило при сравнительно небольших размерах реализовать в устройствах широкий спектр измерительных и вычислительных возможностей, проводить различные виды анализа сигналов вибрации, а также рассчитывать дополнительные параметры виброакустических характеристик (СКЗ, пик-фактор и т. д.).

Тем не менее, только часть из перечисленных сборщиков-спектроанализаторов отвечает всем основным требованиям, предъявляемым при проведении вибродиагностики. Другие устройства обладают необходимыми возможностями лишь частично.

§ 8. Разработка программы и методик испытаний

8.1. Программа испытаний

Программа испытаний (ПИ) — это организационно-методический документ, обязательный к выполнению, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обе-

спечение и проведение испытаний. Документ оформляется следующим образом. На титульном листе размещают:

- наименование программы;
- название темы, по которой ведется разработка изделия;
- согласующие и утверждающие программу подписи руководителей организации-разработчика и (при необходимости) представителя заказчика.

Программа испытаний состоит из шести разделов. Раздел 1 «Объект испытаний» включает наименование, чертежный и заводской номера, дату выпуска объекта испытаний. В разделе 2 «Цель испытаний» ставится конкретная цель (или цели) испытаний. В разделе 3 «Обоснование необходимости проведения испытаний» указываются плановые документы, в которых регламентирована необходимость проведения испытаний (например, программа обеспечения качества). Раздел 4 «Место проведения и обеспечение испытаний» содержит наименование подразделения, в котором проводятся испытания, а также план работ по их подготовке и проведению с указанием объема, срока исполнения и соответствующих исполнителей работ. Раздел 5 «Объем и методика испытаний», раскрывающий содержание испытаний, разбивается на два подраздела. В первом указываются условия испытаний (число образцов, распределение их на группы, последовательность прохождения испытаний различными группами по видам воздействий с регламентацией количественной оценки каждого воздействия) и номера чертежей оснастки, необходимой для их проведения. Второй подраздел включает сведения о контролируемых параметрах изделия с указанием документации, по которой требуется измерить или определить эти параметры.

В разделе 6 «Оформление результатов испытаний» регламентируется форма представления результатов испытаний: протокол, отчет, техническая справка.

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

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

При выборе объекта испытаний следует исходить из того, что в процессе испытаний должна быть подтверждена работоспособность изделия/изделий при указанных в НТД условиях эксплуатации, а также соответствие значений показателей надежности изделия/изделий требуемым НТД. При этом должны быть предусмотрены наличие соответствующих устройств для проведения испытаний, минимальные стоимость (включая затраты на устройства для испытаний) и продолжительность испытаний, взаимозаменяемость испытываемых изделий или отдельных функциональных узлов и блоков (для ремонтпригодных изделий) в процессе испытаний.

Для отдельных видов испытаний целесообразно выбрать типовой представитель номенклатуры изделий, изготавливаемых по близкому конструктивно-технологическому решению. Для этого разработана методика, направленная на то, чтобы результаты испытаний выбранного объекта можно было распространить на всю номенклатуру изделий данного конструктивно-технологического варианта. В соответствии с этой методикой в каждом изделии рассматриваемого варианта выявляют номенклатуру и число элементов, определяющих надежность изделия. Из сравниваемых выбирают изделие, обладающее широкой номенклатурой и насыщенностью такими элементами. Его и рекомендуется использовать в качестве типичного для рассматриваемого конструктивно-технологического варианта при проведении испытаний.

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

План проведения испытаний, входящих в раздел 4 ПИ, содержит перечень работ, необходимых для проведения испытаний: изготовление образцов, приемка образцов ОТК, измерение и определение параметров образцов испытаний, подготовка устройств для испытаний, проведение испытаний, оформление результатов испытаний, согласование и утверждение протокола испытаний и др.

Под *условиями испытаний*, входящих в раздел 5 ПИ, понимают совокупность воздействий на объект и режимов функционирования

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

Для установления адекватности условий испытаний условиям эксплуатации необходим *физический подход к выбору воздействующих факторов*, который предполагает знание закономерностей возникновения и развития отказов и определение влияния различных факторов на скорость изменения запаса прочности изделия. Анализ диагностики отказов позволяет выявить физико-химические процессы, происходящие в физической структуре элементов и деталях конструкции ЭС. При этом очевидны причинно-следственные связи между указанными процессами и внешними и внутренними воздействиями. Целесообразно элементы физической структуры исследуемого изделия, изменение состояния которых вызывает его отказы, разделить в зависимости от их основных функций на следующие группы: конструктивные, обеспечивающие необходимую геометрию изделий, сочленение его с другими изделиями и соединение элементов друг с другом; активные (рабочие области), физические процессы в которых обеспечивают функционирование изделия; защитные, потеря свойств которых приводит к возникновению и усилению деградационных процессов в активных элементах. Например, в интегральных схемах (ИС) можно выделить кристалл, оксид, металлизацию, внутрисхемные контакты (термокомпрессионные или ультразвуковые), проводники для соединения металлизации с выводами корпуса, корпус. Указанные элементы физической структуры выполняют различные функции: кристалл — активные, конструк-

тивные; оксид — защитные; проводники — активные, конструктивные и т. д. Таким образом, физическую структуру ИС можно разделить на активные, конструктивные и защитные элементы.

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

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

При физическом подходе к определению условий испытаний ЭС и воздействующих на них факторов необходимо учитывать все элементы физической структуры ЭС, принимая во внимание деградационные процессы в них и ускоряющие эти процессы объективные факторы.

По характеру воздействующих на ЭС факторов можно выделить испытания с парциальным и комплексным воздействием объективных факторов. В том случае, когда ЭС характеризуется существенно меньшим запасом прочности (механической, электрической, тепловой), для установления его надежности применяется парциальное воздействие того фактора, который приводит к значительному снижению прочности. Если же ЭС несущественно различаются по запасу прочности, а

смена факторов во время эксплуатации не приводит к выделению доминирующего процесса деградации, целесообразно проводить комплексное воздействие нескольких факторов. Это необходимо также в тех случаях, когда воздействие определяющего фактора совместно с другими эффективнее его одиночного воздействия. Примером комплексного воздействия могут служить испытания в «камерах космоса», где на испытываемое изделие одновременно действуют механические нагрузки (вибрации и удары), тепловые и радиационные потоки.

В ряде случаев ЭС представляют совокупность функционально взаимодействующих автономных электронных блоков и ячеек, сконструированных, в свою очередь на различных электрорадиоэлементах. Все они перед сборкой и после нее, как правило, проходят испытания по своим частным программам. Для согласования частных программ готовят комплексную программу испытаний. Такое согласование необходимо для исключения неоправданного дублирования и наиболее полной систематизации результатов испытаний. Испытания, проводимые на ЭС различной конструктивной сложности, обладают как определенными достоинствами, так и некоторыми недостатками, что учитывают при составлении комплексной ПИ. Так, проведение испытаний менее сложных в конструктивном исполнении ЭС позволяет быстро обнаружить «слабые места» изделий; оценить качество элементов и в случае необходимости заменить их более качественными; определить причины и механизмы отказов отдельных элементов. Недостаток испытаний таких ЭС — невозможность оценки некоторых параметров, влияющих на совместную работу элементов.

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

8.2. Методика испытаний

Методика испытаний — это организационно-методический документ, обязательный к выполнению, включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполне-

ния операций по определению одной или нескольких характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

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

Воспроизводимость результатов испытаний определяется качеством методики испытаний и свойствами объекта испытаний. При оценке погрешностей результатов испытаний очень важно выделить погрешности, обусловленные методикой. Поэтому основное требование к методике — обеспечение максимальной эффективности процесса испытаний и минимальных погрешностей результатов. Общие требования к методике испытаний включают требования к методу испытаний, техническим средствам и условиям проведения испытаний. Выбор метода — наиболее ответственный момент при разработке методики испытаний.

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

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

физической структуры деградационных процессов или известных механизмов отказов.

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

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

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

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

Подготовка изделий к испытаниям включает выбор параметров, характеризующих качество изделий, их внешний осмотр и измерение параметров качества. Изделия контролируют по функциональным и физическим параметрам, а также по внешним признакам. При выборе параметров, подлежащих измерениям и контролю в про-

цессе испытаний, необходимо исходить из требований их максимальной информативности, чувствительности к воздействиям и объективной оценки качества испытываемых ЭС.

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

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

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

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

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

§ 9. Автоматизация испытаний

Увеличение объема испытаний и трудоемкости их проведения вследствие расширения функциональных возможностей объектов испытаний (например, ЭС) приводит к необходимости автоматизации испытательных и контрольно-измерительных операций путем широкого внедрения вычислительной техники. При этом особо важная роль отводится микропроцессорам, которые применяют как во встроенных системах контроля ЭС, так и в автономных системах автоматических устройств для испытаний. Интенсивное развитие микропроцессорной техники, а также непрерывное совершенствование устройств для испытаний позволяют создать полностью автоматизированные центральные испытательные станции (ЦИС). Центральная испытательная станция представляет собой телеметрическую систему, которая используется в сочетании с ЭВМ. Данная система является автоматизированной, обмен информацией может осуществляться по каналам связи в удобной для пользователя форме.

Объектом управления в ЦИС служит автоматизированное устройство для испытаний, в котором требуется поддерживать нужный испытательный режим и производить измерения значений контролируемых параметров испытываемого изделия по заданной программе. В состав автоматизированного устройства для испытаний входят собственно устройство для испытаний, средства измерений и исполнительные органы. Для поддержания заданного испытательного режима в автоматизированном устройстве для испытаний предусмотрен набор датчиков (температуры, влажности, давления, вибрации и др.), преобразующих измеряемый технологический параметр, как правило, в аналоговый электрический сигнал. Ввод этого сигнала в соответствующую ЭВМ (или микроконтроллер) требует его преобразования в цифровой код. Для управления ЭВМ исполнительным органом необходимо выполнить обратное преобразование цифрового сигнала в аналоговый. Указанные преобразования осуществляет устройство связи, содержащее цифроаналоговый (ЦАП) и аналого-цифровой (АЦП) преобразователи и машинный интерфейс.

Центральная ЭВМ (или микроконтроллер) анализирует данные о ходе испытаний и в случае нарушения испытательного режима производит необходимую коррекцию этих данных через исполнительный орган. Контроллер обычно обслуживает одно устройство для испытаний, в которое он, как правило, конструктивно встроен.

Рассмотренное сочетание перечисленных устройств позволяет моделировать работу отдельных агрегатов, выполнять автоматическую настройку, коррекцию и линеаризацию передаточных функций измерительных преобразователей в процессе испытаний, преобразовывать получаемую информацию, контролировать предельные значения (граничные условия), производить необходимые для анализа обработку и оценку статистического материала, оперативно отражать информацию о ходе испытаний в виде графиков, таблиц, гистограмм и т. п.

На отраслевых центральных испытательных станциях решают следующие основные задачи:

- предоставление предприятиям технической испытательной базы, позволяющей проводить испытания, наиболее полно удовлетворяющие все более ужесточающимся требованиям заказчиков;
- проведение граничных испытаний и испытаний на долговечность, направленных на выявление конструктивно-технологических запасов изделий и разработку на их основе руководящих материалов по совершенствованию конструкций изделий;
- накопление, обобщение и анализ результатов испытаний для внесения рекомендаций по повышению надежности изделий и совершенствованию системы и методов испытаний, а также по модернизации существующих и созданию новых устройств для испытаний.

Анализ современной контрольно-измерительной техники указывает на наличие устойчивых тенденций более широкомасштабного и всеобъемлющего использования компьютеров и компьютерных технологий для расширения функциональных возможностей испытательных систем.

Можно отметить три очень важных момента, которые характеризуют современный мир электронных измерительных средств:

- компьютер все чаще используется для хранения и обработки данных и результатов измерений, полученных отдельными измерительными приборами, подключенных с помощью различных интерфейсов;
- наблюдается тенденция создания автоматизированных систем управления за счет подключения измерительных приборов различных производителей к персональному компьютеру и соединения их между собой;
- наметилась интеграция нескольких измерительных приборов в одном.

Современные тенденции развития средств измерений и систем контроля для определенности проиллюстрируем на примере отдельных разработок фирм-конкурентов Хьюлетт-Паккард и National Instruments. Цифровой виртуальный осциллограф серии HP54800A (Infinium) работает под управлением Windows (рис. 4.24). Прибор имеет переднюю панель обычного осциллографа, гарантирующую простую настройку основных параметров осциллографа; предоставляет уникальные возможности по проведению сложных автоматических измерений с использованием «мыши» и технологии «drag&drop» («перенеси и брось»).

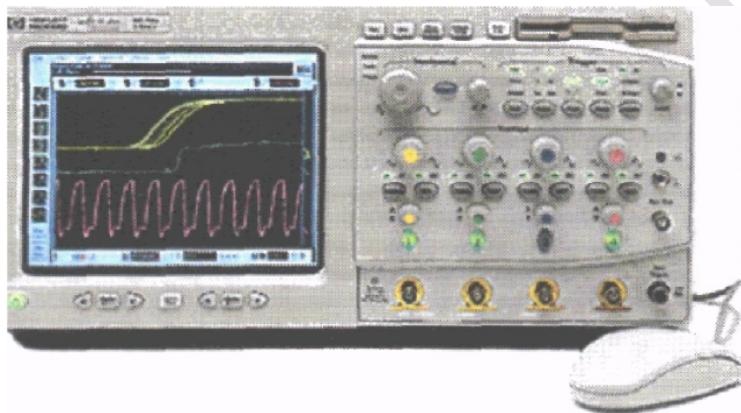


Рис. 4.24. Цифровой осциллограф HP54800A (Infinium)

Для мгновенного получения результата измерения необходимо всего лишь перетащить с помощью «мыши» из панели инструментов нужную пиктограмму и «бросить» ее на участок изображения сигнала, который необходимо измерить. Встроенная в прибор подсказка позволяет обойтись без дополнительных руководств. Изображения сигналов могут сохраняться в различных графических форматах и передаваться в другие программы с целью документирования и дальнейшего анализа. Разработано 5 моделей данной серии. Основные технические характеристики: полоса пропускания от 500 МГц до 1,5 ГГц; частота дискретизации до 8 ГГц; гарантия 3 года.

Серия осциллографов HP Infinium подтверждают тенденцию, которая отмечается в настоящее время в области электронной измерительной техники и заключается в том, что происходит интеграция возможностей различных измерительных приборов в одном приборе. При этом важно отметить, что ведущие производители прилагают серьезные усилия к тому, чтобы, несмотря на значительно возросшую функциональную мощь таких приборов, сделать их простыми в эксплуатации.

Разработаны и портативные системы сбора данных и коммутации. Например, несложная в эксплуатации система HP 34970A предназначена для решения широкого спектра прикладных задач, связанных с регистрацией параметров, автоматическим сбором данных по многочисленным каналам и коммутацией сигналов, как в автономном режиме, так и под управлением компьютера. Имеет высокие эксплуатационные и технические характеристики автономной системы сбора данных и коммутации при стоимости в несколько раз ниже, чем у других аналогичных систем. Модульная архитектура позволяет конфигурировать систему под конкретную задачу, каждый канал может быть запрограммирован на измерение какого-либо параметра независимо от других каналов с помощью встроенного мультиметра с автоматическим переключением вида измерения и пределов. Встроенные в модули средства нормализации сигналов позволяют обойтись без дорогостоящих внешних схем нормализации. При необходимости управления процессом регистрации данных с помощью ЭВМ, пользователю не потребуется тратить время на программирование, поскольку данная задача решается с помощью программного продукта HP BenchLink Data Logger, который поставляется бесплатно. Небольшие габариты, вес и конструктивное исполнение для жестких условий эксплуатации делают систему HP 34970A идеальной для случаев, когда целесообразно применять только портативные системы, а небольшая занимаемая площадь позволяет успешно использовать ее в стесненных условиях при проведении стендовых испытаний. Все эти достоинства повышают производительность системы независимо от того, эксплуатируется ли она каждый день или от случая к случаю. Основные технические характеристики: погрешность измерений постоянного напряжения не превышает 0,004% в течение одного года;

скорость коммутации до 250 каналов/с; энергонезависимая память на 50 тыс. показаний; стандартная гарантия — 3 года.

Эта система представляет собой, по существу, измерительно-вычислительный комплекс. Например, при конфигурировании HP 34970A с 20-канальным релейным мультиплексором система становится мощным, но недорогим регистратором данных для решения несложных прикладных задач определения параметров разнообразных изделий. Неотъемлемыми качествами такого регистратора являются простота установки и эксплуатации. HP 34970A может также являться автоматизированной испытательной системой с отличными измерительными характеристиками, такими, как погрешность, разрешение и скорость измерений.

Основные характеристики системы в этом случае выглядят следующим образом:

- основная погрешность измерения постоянного напряжения 0,004% и переменного напряжения 0,06%;
- скорости коммутации до 250 каналов/с;
- стандартные встроенные интерфейсы GPIB и RS-232;
- наличие программных драйверов для поддержки HP VEE и National Instruments LabVIEW;
- счетчик количества рабочих циклов реле для технического обслуживания системы.

Фирмой National Instruments (NI) также созданы многочисленные виртуальные приборы, измерительные комплексы, оборудование и программное обеспечение, которое используется и для автоматизации испытаний.

Технология модульных приборов NI основана на использовании компактного, высокопроизводительного оборудования, функционального программного обеспечения и встроенных систем синхронизации и тактирования, обеспечивающих проведение гибких, точных и высокопроизводительных измерений и испытаний. NI предлагает модульные приборы для проведения измерений, выполненные в форматах PXI, PCI, PCMCIA и USB и работающих в диапазоне частот сигналов от постоянного тока до радиочастот. Наиболее надежной и многофункциональной является платформа PXI, позволяющая реализовать практически любую автоматизированную тестовую или измерительную систему.

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) — это компьютерная платформа, предназначенная для создания гибких и мощных систем измерений и автоматизации. PXI объединяет скорость и производительность шины PCI с расширенными возможностями тактирования и синхронизации в надежном корпусе модульной платформы CompactPCI. Используя системы на базе PXI, можно реализовать все преимущества компьютерных платформ и обеспечить высокий уровень их интеграции в производственный процесс. При построении инструментальной платформы или автоматизированной тестовой системы, промышленной автоматизированной системы испытаний или системы сбора данных, использование PXI позволяет снизить материальные затраты, увеличить производительность системы и сократить время разработки.

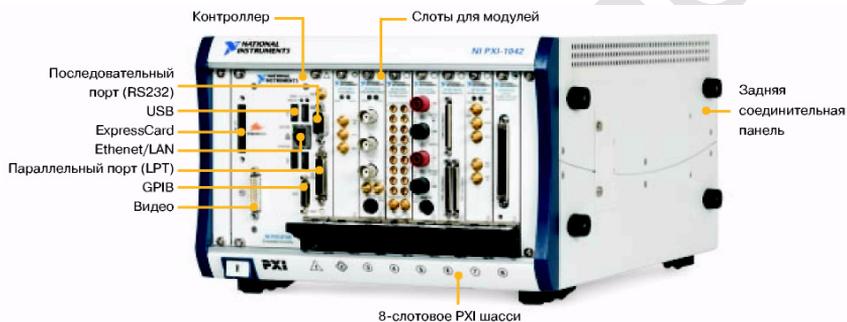


Рис. 4.25. Внешний вид PXI шасси

Например, автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс NI PXI (АИВК) предназначен для использования в качестве многофункциональной лабораторной или стендовой системы для исследования аналоговых процессов и сигналов в радиоэлектронных системах и устройствах, а также для автоматизации испытаний таких устройств. Комплекс предназначен:

- для ввода аналоговых сигналов в полосе частот до 100 МГц;
- вывода аналоговых сигналов (синус, прямоугольник, треугольник, пила) с частотой повторения до 20 МГц;
- измерения напряжения (до 300 В), силы тока (до 10 А), сопротивления (до 100 МОм), индуктивности (до 5 Гн) и емкости (до 10 мФ);

- выдачи напряжения питания до 46 В или токов до 2 А;
 - счета/выдачи дискретных TTL сигналов по 8 линиям с регулируемой частотой и скважностью;
 - реализации алгоритмов автоматизированного ввода/вывода сигналов и их обработки и т. д.
- Внешний вид базовой платформы комплекса приведен на рис. 4.26.



Рис. 4.26. Внешний вид модульной платформы PXI для измерений и автоматизации испытаний

Для того чтобы инженер, решая контрольно-измерительные задачи, сосредоточился на том, как лучше реализовать алгоритм управления, обработки данных и представления их на экране, были созданы специальные графические языки программирования, в которых программирование выполняется не символьными командами построчно, а с использованием графических символов или объектов, реализующих функции, аналогичные функциям процедур, составленных из символьных команд в других языках программирования. К графическим языкам программирования можно отнести, например, пакет HP VEE от Хьюлетт-Паккард и пакет LabVIEW от National Instruments. Несмотря на значительные различия между двумя конкурирующими на рынке программных средств пакетами для решения контрольно-измерительных задач, эти две программы имеют много общего. Они позволяют значительно сократить время,

необходимое для написания тестовых программ по автоматическому управлению за измерительными приборами, математической или статистической обработки сигналов, построению графиков изменения параметров тестового устройства или изделия. Если вкратце коснуться различий между двумя пакетами, то необходимо отметить следующее. LabVIEW позволяет инженеру-программисту реализовать определенный алгоритм, используя достаточно большое количество графических объектов из функционально разделенной библиотеки. При этом графические объекты обычно выполняют одну-две, реже — несколько функций. LabVIEW можно сравнить с языком C/C++. Назначение графических объектов в LabVIEW зачастую совпадает с назначением и функциональными возможностями команд в C/C++. Поэтому в LabVIEW достигается сокращение времени на разработку тестовых программ скорее за счет более наглядного (графического, в виде пиктограмм) представления команд. Оператору все же желательно иметь навыки программирования (например, на языке C/C++).

Совершенно другая картина наблюдается в отношении HP VEE от Хьюлетт-Паккард. Здесь алгоритм реализуется с помощью относительно (по сравнению с LabVIEW) небольшого набора графических объектов. Однако в данном случае каждый графический объект представляет собой многофункциональный модуль — он реализует несколько функций, гораздо проще конфигурируется, автоматически настраивается (в отличие от LabVIEW) на нужный тип данных. Программы, написанные на HP VEE, становятся гораздо проще и понятнее даже неопытному программисту. Статистика указывает на то, что большинство инженеров, не владеющих навыками программирования, осваивают данный пакет и решают свои специфические, но реальные задачи всего за несколько дней.

HP VEE обеспечивает исключительную возможность управления практически любыми измерительными программно-управляемыми приборами различных назначений. Это достигается с использованием специально написанного для HP VEE драйвера под конкретный прибор либо с использованием команды Plug&Play. В стандартной комплектации в пакет HP VEE включается более 450 драйверов известных на международном рынке приборов различных производителей. При этом пользователь на экране видит виртуальную прибор-

ную панель с кнопками, ручками и дисплеем, почти аналогичную приборной панели реального прибора. Пользователь может управлять прибором, который может находиться в соседней комнате, на другом этаже или даже в другом здании, и наблюдать и запоминать на компьютерных носителях результаты измерений. В настоящее время все большую популярность начинает приобретать стандарт Plug&Play. Согласно этому стандарту разработчики измерительных приборов одновременно разрабатывают прибор и драйвер для этого прибора. Драйвер построен таким образом, что он может использоваться в различных программных пакетах. Это позволяет обойти некоторые проблемы, с которыми в прошлом сталкивались пользователи и инженеры, когда для конкретного программного пакета (например, HP VEE или LabVIEW) необходимо было иметь драйвер соответствующего устройства. Вполне понятно, что если Хьюлетт-Паккард выпускал новый прибор, то пользователи LabVIEW не могли подключить прибор Хьюлетт-Паккард, поскольку драйвера для LabVIEW просто не было. Теперь приборы разных производителей стали доступны для пользователей LabVIEW, HP VEE и других пакетов, поскольку драйверы начали поддерживать «открытый стандарт» и стали независимы от программного обеспечения.

Следует подчеркнуть, что компьютер все больше и больше используется для решения контрольно-измерительных задач. Доказательством этому может служить тот факт, что рынок программных средств и, в частности, рынок LabVIEW и HP VEE с каждым годом увеличивается. Это означает, что все больше и больше задач во все более широком диапазоне приложений и областей применения выполняется с помощью персонального компьютера.

Кроме таких пакетов, как HP VEE и LabVIEW, которые можно отнести к разряду скорее «общего назначения», имеется программное обеспечение для конкретных приложений. Эти программные пакеты работают только с определенными моделями и выполняют всего несколько функций, например, перенос изображений с экрана прибора на персональный компьютер. Несмотря на существенную простоту этих программных пакетов, они позволяют решить массу проблем, которые могут встать перед инженером при решении различных контрольно-измерительных задач. Простая процедура установки и удобный интерфейс позволяют даже самому неопыт-

ному в программировании пользователю решить много контрольно-измерительных задач при использовании измерительных приборов для автоматизации испытаний.

Резюме

Главная цель испытаний состоит в том, что по их результатам принимается то или другое решение относительно объекта испытаний: о его годности или браковке, о предъявлении на следующие испытания, о возможности серийного выпуска и пр. При любых испытаниях должны быть установлены характеристики объекта испытаний, под которыми понимаются показатели качества или (и) параметры. К объектам испытаний помимо изделий относятся также материалы и процессы.

Номенклатура показателей качества продукции детально представлена в ГОСТ 22851. Различают два вида параметров и показателей качества объекта испытаний: измеряемые и неизмеряемые. Измеряемыми, контролируруемыми и управляемыми являются такие параметры, как температура и тепло, давление и вакуум, влажность и т. д. и т. п. Параметры объекта испытаний могут быть постоянными или случайными величинами, детерминированными или случайными функциями.

Характеристики свойств объекта при испытаниях могут оцениваться, если задачей испытаний является получение количественных или качественных оценок, или контролироваться, если задача испытаний заключается только в установлении соответствия характеристик объекта заданным требованиям. В последнем случае испытания сводятся к контролю. Поэтому ряд видов испытаний являются контрольными.

При испытаниях технических изделий и материалов предполагается наличие двух основных элементов: воздействие на объект и определение характеристик, которое может производиться как при функционировании объекта, так и без такового. При этом существуют определенные условия испытаний, к которым относятся внешние воздействующие факторы и внутренние воздействия, возникающие при функционировании объекта (например, нагрев, вызываемый трением или прохождением электрического тока). К условиям испыта-

ний относятся также режимы функционирования объекта, способы и место его установки, монтажа, крепления, скорость перемещения и т. п.

Испытания классифицируются по следующим признакам: уровню проведения; цели проведения; месту проведения; характеру внешних воздействий; продолжительности испытаний; влиянию на объект испытаний; определяемым характеристикам; стадиям жизненного цикла изделия.

Для проведения испытаний на механические ВВФ необходимо специальное испытательное оборудование, позволяющее искусственно воспроизвести механические воздействия и измерять основные параметры. Оборудование для механических испытаний классифицируется следующим образом: машины для статических испытаний, оборудование для испытаний на удар и постоянное ускорение, вибростенды для испытаний при синусоидальных колебаниях, оборудование для испытаний при воздействии качки, наклона и тряски, оборудование для комбинированных механических испытаний.

Оснастка, используемая при испытаниях, не должна препятствовать деформациям (вплоть до разрушения) объекта испытания при его нагружении.

Особенностью современного рынка приборов вибродиагностики является то, что при их производстве фирмы-разработчики ориентируются на определенную сферу применения таких приборов. Это может быть решение вполне определенных проблем или, что бывает чаще всего, некоторое универсальное применение прибора.

Среди задач вибрационного мониторинга и диагностики встречаются и такие, решение которых требует проведения специальных исследований, для которых может не хватать возможностей типовых анализирующих приборов.

Отличительными особенностями исследовательских приборов и систем являются: возможность запоминания больших массивов информации, в том числе и измеряемых сигналов, без искажений и потерь информации, многоканальность с возможностью параллельной записи и анализа сигналов с выхода измерительных преобразователей, возможность проведения большинства существующих видов анализа сигналов.

Большинство таких приборов и систем строятся на базе виртуальных анализаторов, т. е. компьютеров с входными устройствами, поддерживающими различные виды измерительных преобразователей.

Все испытания проводятся в соответствии с программой и методикой испытаний.

Увеличение объема испытаний и трудоемкости их проведения вследствие расширения функциональных возможностей объектов испытаний приводит к необходимости автоматизации испытательных и контрольно-измерительных операций путем широкого внедрения вычислительной техники.

Вопросы для самопроверки

1. Какие два этапа необходимо пройти при осуществлении процедуры технического контроля?
2. Перечислите объекты технического контроля.
3. В чем отличие количественного и качественного контроля?
4. Может ли контроль осуществляться без испытаний?
5. Чем характеризуется качество измерений, качество контроля, качество испытаний?
6. Сформулируйте определение внешних воздействующих факторов.
7. Перечислите основные виды внешних воздействующих факторов.
8. Чем вызываются внутренние воздействующие факторы?
9. По каким признакам классифицируются испытания?
10. Какие существуют способы проведения испытаний?
11. В чем отличие и взаимосвязь вредного и опасного производственных факторов?
12. Что является количественной мерой опасности?
13. Что понимается под надежностью?
14. К каким воздействиям относятся статические, динамические и вибрационные воздействия?
15. Что такое вибрационная установка и из каких основных частей она состоит?
16. Какие методы используются при испытаниях на виброустойчивость?
17. Приведите классификацию оборудования для механических испытаний.

18. На какие типы делят вибродиагностические комплексы?
19. Дайте определение программы испытаний и перечислите ее основные разделы.
20. Дайте определение методики испытаний. Какие положения в ней сформулированы?
21. Перечислите особенности современного мира электронных компьютерных технологий.

КлубОК.net

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в любой области науки, техники и производства невозможно обойтись без измерений, контроля и испытаний. Поэтому проблема изучения данной дисциплины была и будет актуальной.

1. Понятия «измерение», «технический контроль», «испытание» являются взаимосвязанными. В то же время эти процедуры во многом различаются. Результатом измерения является количественная характеристика, а контроля — качественная; измерение осуществляется в широком диапазоне значений измеряемой величины, а контроль — обычно в пределах небольшого числа возможных значений; основной характеристикой качества измерения и испытания является точность, а процедуры контроля — достоверность. Результат испытаний всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточности установления номинальных условий испытания.

2. Большинство физических величин относится к неэлектрическим. Преобразование неэлектрической величины в электрическую осуществляется с помощью измерительных преобразователей — датчиков, преобразующих один вид энергии в другой. Выходной сигнал датчика — аналоговый и недоступен непосредственному восприятию. Различают датчики активного (генераторные), пассивного (параметрические) и комбинированного типов. При построении датчиков используются определенные физические эффекты. Области применения датчиков чрезвычайно разнообразны и непрерывно расширяются благодаря внедрению новых технологий изготовления и использованию новых материалов.

3. При измерениях, испытаниях и контроле всегда используются средства измерений. Средства измерений многообразны. По конструктивному исполнению и форме представления измерительной информации средства измерений подразделяются на эталоны единиц величин, измерительные преобразователи, меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы. По уровню автоматизации все средства измерений делятся на три основные группы: неавтоматические; автоматизированные и автоматические. В настоящее время все большее распространение получают автома-

тизированные и автоматические средства измерений, что связано с широким использованием в средствах измерений электронной, микропроцессорной и компьютерной техники.

4. В последнее время получают распространение приборы, называемые «виртуальными». Они состоят из персонального компьютера, платы сбора данных и программного обеспечения. Плата обеспечивает преобразование аналогового измерительного сигнала в цифровой, а функции обработки последнего выполняет компьютер. Для наглядного отображения информации и удобства управления процессом измерений на экране монитора воспроизводится лицевая панель измерительного прибора со всеми элементами настройки, управление которыми производится при помощи клавиатуры и «мыши».

5. Главная цель испытаний состоит в том, что по их результатам принимается то или другое решение относительно объекта испытаний: о его годности или браковке, о предъявлении на следующие испытания, о возможности серийного выпуска и пр. При любых испытаниях должны быть установлены характеристики объекта испытаний, под которыми понимаются показатели качества или (и) параметры. К объектам испытаний, помимо изделий, относятся также материалы и процессы.

6. Различают два вида параметров и показателей качества объекта испытаний: измеряемые и неизменяемые. Изменяемыми, контролируруемыми и управляемыми являются такие параметры, как температура и тепло, давление и вакуум, влажность и т. д. и т. п. Параметры объекта испытаний могут быть постоянными или случайными величинами, детерминированными или случайными функциями.

7. Характеристики свойств объекта при испытаниях могут оцениваться (если задачей испытаний является получение количественных или качественных оценок) или контролироваться (если задача испытаний заключается только в установлении соответствия характеристик объекта заданным требованиям). В последнем случае испытания сводятся к контролю. Поэтому ряд видов испытаний являются контрольными.

8. При испытаниях технических изделий и материалов предполагается наличие двух основных элементов: воздействие на объект и определение характеристик, которое может производиться как при функционировании объекта, так и без такового. При этом существуют определенные условия испытаний, к которым относятся внешние

воздействующие факторы и внутренние воздействия, возникающие при функционировании объекта (например, нагрев, вызываемый трением или прохождением электрического тока). К условиям испытаний относятся также режимы функционирования объекта, способы и место его установки, монтажа, крепления, скорость перемещения и т. п. Испытания классифицируются по следующим признакам: уровню проведения; цели проведения; месту проведения; характеру внешних воздействий; продолжительности испытаний; влиянию на объект испытаний; определяемым характеристикам; стадиям жизненного цикла изделия.

9. Для проведения испытаний на механические ВВФ необходимо специальное испытательное оборудование, позволяющее искусственно воспроизвести механические воздействия и измерять основные параметры. Оборудование для механических испытаний классифицируется следующим образом: машины для статических испытаний, оборудование для испытаний на удар и постоянное ускорение, вибростенды для испытаний при синусоидальных колебаниях, оборудование для испытаний при воздействии качки, наклона и тряски, оборудование для комбинированных механических испытаний. Оснастка, используемая при испытаниях, не должна препятствовать деформациям (вплоть до разрушения) объекта испытания при его нагружении.

10. Особенностью современного рынка приборов вибродиагностики является то, что при их производстве фирмы-разработчики ориентируются на определенную сферу применения этих приборов. Это может быть решение вполне определенных проблем или, что бывает чаще всего, некоторое универсальное применение прибора. Среди задач вибрационного мониторинга и диагностики встречаются и такие, решение которых требует проведения специальных исследований, для которых может не хватать возможностей типовых анализирующих приборов.

11. Отличительными особенностями исследовательских приборов и систем являются возможность запоминания больших массивов информации, в том числе и измеряемых сигналов, без искажений и потерь информации, многоканальность с возможностью параллельной записи и анализа сигналов с выхода измерительных преобразователей, возможность проведения большинства существующих видов анализа сигналов. Большинство таких приборов и систем строятся

на базе виртуальных анализаторов, т. е. компьютеров с входными устройствами, поддерживающими различные виды измерительных преобразователей. Все испытания проводятся в соответствии с программой и методикой испытаний.

12. Увеличение объема испытаний и трудоемкости их проведения вследствие расширения функциональных возможностей объектов испытаний приводит к необходимости автоматизации испытательных и контрольно-измерительных операций путем широкого внедрения вычислительной техники.

Автор не задавался целью дать исчерпывающие ответы на все вопросы теории и практики измерений, испытаний и контроля. Да это и невозможно в силу ограниченного объема учебного пособия. Хотелось бы более подробно осветить интеллектуальные системы и виртуальные приборы. Однако автор надеется, что студенты и внимательные читатели, освоив материалы данного пособия, смогут, используя новейшую литературу, самостоятельно изучить интересующие их вопросы.

К таким интересным вопросам следует отнести калибровку и (или) поверку измерительных приборов через сеть **Internet**; телеметрические измерения и контроль; измерения в компьютерных сетях; измерения в интерактивном режиме; измерения, испытания и контроль в нанотехнологиях и т. д.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

Тесты для самоконтроля

Тема 1. Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле

1. Измерение — это:

- 1) нахождение значения физической величины (ФВ);
- 2) нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью измерительных преобразователей;
- 3) нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью специальных технических средств;
- 4) нахождение значения физической величины (ФВ) с обязательной оценкой погрешности.

2. Испытание — это:

- 1) экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании;
- 2) экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта при моделировании объекта и (или) воздействий;
- 3) экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий;
- 4) экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта при моделировании воздействий окружающей среды.

3. Контроль — это процесс определения соответствия:

- 1) значения параметра изделия техническим требованиям;
- 2) значения параметра изделия требованиям, регламентированным ГОСТ Р;
- 3) значения параметра изделия техническим условиям;
- 4) значения параметра изделия установленным требованиям или нормам.

4. Какое утверждение верно:

- 1) измерение — это более объемная операция, чем испытание;
- 2) испытание — это более объемная операция, чем измерение;
- 3) испытание явно не связано с измерением;
- 4) испытание можно считать частным случаем измерения, при котором условия измерений не представляют интереса.

5. Результатом контроля является:

- 1) количественная характеристика;
- 2) качественная характеристика;
- 3) наложенное взыскание;
- 4) безопасность для окружающей среды, жизни, здоровья потребителя.

6. Реальные величины делятся:

- 1) на естественные и противоестественные;
- 2) физические и нефизические;
- 3) физические и идеальные;
- 4) физические и математические.

7. Какое утверждение верно:

- 1) к нефизическим относятся величины, присущие технике;
- 2) к нефизическим относятся величины, присущие нефизическим наукам;
- 3) к нефизическим относятся величины, изучаемые в материаловедении;
- 4) к нефизическим относятся величины, изучаемые в химии.

8. Какое утверждение верно:

- 1) физическая величина определена как свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов;
- 2) физическая величина определена как свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них;
- 3) физическая величина определена как свойство, общее в количественном и качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов;
- 4) физическая величина определена как свойство, общее в количественном отношении для множества объектов, физических си-

стем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в качественном отношении для каждого из них.

9. Определяющим признаком понятия «физическая величина» является:

- 1) возможность физической реализации единицы этой величины;
- 2) физическое существование этой величины;
- 3) существование множества значений физической величины, которое путем измерения определить невозможно;
- 4) существование истинного значения физической величины, которое можно определить путем измерений.

10. Какое утверждение верно:

- 1) влияющая физическая величина — физическая величина, непосредственно измеряемая средством измерения и приводящая к искажению результата этого измерения;
- 2) влияющая физическая величина — физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или на объект измерения таким образом, что это приводит к искажению результата измерения;
- 3) влияющая физическая величина — физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или на объект измерения таким образом, что это не приводит к искажению результата измерения;
- 4) влияющая физическая величина — физическая величина, влияющая на объект измерения таким образом, что это приводит к заметному искажению результата измерения.

11. Целью изучения дисциплины «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» является формирование знаний:

- 1) современных принципов, методов и средств измерений физических величин;
- 2) об особенностях проведения измерений при испытаниях и контроле;
- 3) современных принципов, методов и средств измерений физических величин, а также особенностей проведения измерений при испытаниях и контроле;
- 4) современных принципов, методов и средств измерений физических величин, особенностей проведения измерений при испытаниях и контроле, а также оценивании нефизических величин.

12. Главным признаком объекта испытаний является:

- 1) то, что по результатам его испытаний принимается то или другое решение по этому объекту — о его годности или забраковании, о возможности предъявления на следующие испытания, о возможности серийного выпуска и др.;
- 2) наличие нормативно-технической документации;
- 3) возможность его серийного выпуска;
- 4) наличие поверительного клейма и (или) свидетельства о поверке.

13. Важнейшим при проведении любых испытаний является:

- 1) наличие испытательного оборудования;
- 2) задание требуемых реальных или моделируемых условий испытаний;
- 3) наличие программы и (или) методики испытаний;
- 4) наличие сертифицированной лаборатории.

14. Под условиями испытаний понимается:

- 1) перечень воздействующих факторов, указанных в программе испытаний;
- 2) температурно-влажностный режим, указанный в нормативно-технической документации;
- 3) термобарический режим, указанный в нормативно-технической документации;
- 4) совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях.

Тема 2. Измерительные преобразователи (ИП)

15. Какое утверждение не верно? Измерительный преобразователь — это:

- 1) техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи, не подлежащий непосредственному восприятию наблюдателем;
- 2) техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи и доступный непосредственному восприятию наблюдателем;

- 3) датчик;
- 4) устройство, которое, подвергаясь воздействию физической измеряемой величины, выдает эквивалентный сигнал, обычно электрической природы (заряд, ток, напряжение и т. п.), являющийся функцией измеряемой величины.

16. На выходе активных датчиков имеет место:

- 1) заряд, напряжение или ток, пропорциональные входной величине;
- 2) выходное сопротивление, индуктивность или емкость;
- 3) заряд, напряжение, ток, выходное сопротивление, индуктивность, емкость;
- 4) механическое перемещение.

17. Для работы пассивного датчика:

- 1) требуется иметь внешний источник питания;
- 2) требуется химический элемент углерод;
- 3) требуется источник механической энергии;
- 4) требуется обязательное включение его в схему с внешним источником питания.

18. По назначению измерительные преобразователи делят:

- 1) на линейные и нелинейные;
- 2) генераторные и параметрические;
- 3) первичные преобразователи, унифицированные ИП и промежуточные ИП;
- 4) резистивные, электромагнитные емкостные.

19. Чтобы ТЭДС термопары однозначно определялась температурой горячего спая, необходимо:

- 1) температуру холодного спая поддерживать всегда одинаковой;
- 2) температуру холодного спая поддерживать равной комнатной температуре;
- 3) подключить микровольтметр;
- 4) подключить микроамперметр.

20. Для измерения термопарой разности температур измерительный прибор нужно включить:

- 1) в «спай»;
- 2) в «электрод»;
- 3) в электрическую сеть;
- 4) к компенсационным проводам.

21. Для измерения параметров движения используют:

- 1) пьезоэлектрические измерительные преобразователи;
- 2) магниторезистивные;
- 3) термометры сопротивления;
- 4) датчики на эффекте Холла.

Тема 3. Средства измерений

22. Средством измерений (СИ) называют:

- 1) техническое средство, используемое при измерениях в учебных лабораториях;
- 2) техническое средство, используемое при измерениях, воспроизводящее или хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени и имеющее не нормированные метрологические характеристики;
- 3) техническое средство, используемое при измерениях, воспроизводящее или хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени и имеющее нормированные метрологические характеристики;
- 4) автоматизированную систему измерения качества продукции.

23. Меры бывают:

- 1) ввозимые;
- 2) аналоговые;
- 3) цифровые;
- 4) цифро-аналоговые.

24. По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, СИ делятся:

- 1) на метрологические и рабочие;
- 2) неавтоматические и автоматизированные;
- 3) стандартизованные и нестандартизованные;
- 4) основные и вспомогательные.

25. Сигнал измерительной информации представляет собой:

- 1) любой физический процесс, протекающий со скоростью света;
- 2) любой физический процесс, протекающий со скоростью звука;

- 3) некоторый физический процесс, один из параметров которого функционально связан с измеряемой величиной;
- 4) некоторый физический процесс, все параметры которого функционально связаны с измеряемой величиной.

26. К основным видам сигналов, используемых в средствах измерений, не относят:

- 1) непрерывные по информативному параметру и времени акустические сигналы;
- 2) непрерывные по информативному параметру и дискретные по времени сигналы;
- 3) сигналы, непрерывные по времени и квантованные по информативному параметру;
- 4) сигналы, дискретные по времени и квантованные по информативному параметру.

27. В электромеханических и электронных омметрах реализован способ измерения:

- 1) вольтметра-амперметра;
- 2) метод непосредственной оценки;
- 3) мостовой;
- 4) резонансный.

28. Постоянное напряжение нельзя измерить с помощью:

- 1) ферродинамических измерителей;
- 2) термопарных измерителей;
- 3) электростатических приборов;
- 4) мультиметров (тестеров).

29. К измерительным генераторам не относятся:

- 1) резонансные частотомеры;
- 2) генераторы сигналов сложной формы;
- 3) генераторы импульсов;
- 4) синтезаторы частоты.

30. По осциллограммам, получаемым на экране осциллографа, не могут быть измерены:

- 1) частота;
- 2) параметры звука;
- 3) временные интервалы;
- 4) фазовый сдвиг.

31. Любое изменение во времени некоторой периодической функции:

- 1) можно представить в виде конечной или бесконечной суммы ряда гармонических колебаний с одинаковыми амплитудами, частотами и начальными фазами;
- 2) нельзя представить в виде гармонических составляющих;
- 3) можно представить в виде конечной или бесконечной суммы ряда гармонических колебаний с разными амплитудами, частотами и начальными фазами;
- 4) нельзя представить в виде изменения по частоте некоторой периодической функции.

32. По методам сбора и обработки информации измерительные системы делятся:

- 1) на прямые;
- 2) параллельные;
- 3) косвенные;
- 4) прямого преобразования.

Тема 4. Испытания

33. Различают следующие параметры и показатели качества объекта испытаний:

- 1) совместные и совокупные;
- 2) измеряемые и не измеряемые;
- 3) дискретные и непрерывные;
- 4) прямые и косвенные.

34. Для всякого контроля характерно:

- 1) сопоставление информации о фактическом состоянии объекта с требованиями, установленными контролирующими органами;
- 2) получение информации о фактическом состоянии объекта, о признаках и показателях его свойств;
- 3) проверка изделия на воздействующие факторы;
- 4) проверка соответствия обслуживающего персонала предъявляемым требованиям.

35. Объектами технического контроля не являются:

- 1) предметы труда;
- 2) средства труда;

- 3) трудовые процессы;
- 4) средства контроля.

36. К объектам испытаний не относятся:

- 1) изделия;
- 2) материалы;
- 3) процессы;
- 4) воздействующие факторы.

37. К условиям испытаний не относятся:

- 1) совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при их проведении;
- 2) внешние воздействующие факторы;
- 3) способы и место монтажа объекта;
- 4) измерительные процедуры.

38. Измерения входят как составной элемент в процедуры и измерительного контроля, и испытаний:

- 1) нет;
- 2) иногда да;
- 3) да;
- 4) не оказывают заметного влияния.

39. Контроль является частью испытаний:

- 1) всегда;
- 2) иногда;
- 3) они не связаны друг с другом;
- 4) только при сертификационных испытаниях.

40. Термины и определения понятий в области ВВФ установлены:

- 1) в ГОСТ;
- 2) ОСТ;
- 3) СТО;
- 4) РД.

41. Дифферент относится:

- 1) к ВВФ специальных сред;
- 2) механическим ВВФ;
- 3) климатическим ВВФ;
- 4) биологическим ВВФ.

42. Обрастатель относится:

- 1) к биологическим ВВФ;
- 2) термическим ВВФ;
- 3) ВВФ электромагнитных полей;
- 4) ВВФ специальных сред.

43. Аттестационные испытания входят в квалификационный признак испытаний продукции:

- 1) по уровню проведения;
- 2) целям проведения;
- 3) месту проведения;
- 4) характеру внешних воздействий.

44. Целью квалификационных испытаний является:

- 1) оценка готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме;
- 2) определения значений характеристик объекта с заданными значениями показателей точности и достоверности;
- 3) исследование комплексного влияния естественно воздействующих факторов на изменение параметров, свойств и механизмы отказов изделий при их эксплуатации и хранении;
- 4) контроль стабильности качества установленных видов продукции специально уполномоченными организациями.

45. Вредные условия труда — это:

- 1) условия труда, характеризующиеся наличием вредных производственных факторов, превышающих гигиенические нормативы и оказывающие неблагоприятное воздействие на организм работающего и (или) его потомство;
- 2) условия труда, характеризующиеся наличием опасных производственных факторов, превышающих гигиенические нормативы и оказывающие неблагоприятное воздействие на организм работающего и (или) его потомство;
- 3) условия труда, характеризующиеся наличием производственных факторов, которые оказывают неблагоприятное воздействие на организм работающего и его семью;
- 4) условия труда, характеризующиеся наличием производственных факторов, потенциально оказывающие неблагоприятное воздействие на организм работающего.

46. Решающим этапом обработки летательного аппарата, после которого окончательно определяют его основные характеристики, являются испытания:

- 1) приемосдаточные;
- 2) наземные;
- 3) стендовые;
- 4) летные.

47. Особенности испытаний на безопасность любого объекта регламентируются:

- 1) соответствующим нормативным документом;
- 2) только ОСТ;
- 3) только ТУ;
- 4) только СТО.

48. Какое утверждение верно:

- 1) надежность является составной частью качества;
- 2) качество является составной частью надежности;
- 3) надежность не связана явно с качеством;
- 4) надежность характеризуется только долговечностью.

49. К основным требованиям, предъявляемым к виброиспытаниям различных изделий и средствам испытаний, не относят:

- 1) возможность проведения испытаний на гармоническую (синусоидальную и полигармоническую), случайную (узко- и широкополосную) и смешанную (гармоническую и случайную) вибрации;
- 2) обеспечение воспроизводимости результатов испытаний, исключаящей неоднозначность заключения;
- 3) наличие более четырех контрольных точек на вибрационной установке;
- 4) возможность учета особенностей характеристик испытуемого изделия и способов его крепления.

50. При испытаниях на вибрационные и ударные воздействия контрольную точку выбирают в одном из следующих мест:

- 1) на платформе стенда вдали от точек крепления изделия, если последнее крепят непосредственно на платформе;
- 2) на крепежном приспособлении, если изделие крепят на приспособлении;

- 3) вдали от точки крепления амортизатора, если изделие крепят на собственных амортизаторах;
- 4) при испытаниях на воздействие линейных нагрузок контрольную точку, для которой вычисляют величину ускорения, выбирают на расстоянии не более 5 мм от края изделия.

51. Не используется при испытаниях на вибропрочность:

- 1) метод качающейся частоты;
- 2) метод бегущей частоты;
- 3) комбинированный метод;
- 4) метод, реализующий воздействие случайной вибрации.

52. В классификации оборудования для механических испытаний нет:

- 1) испытательных систем;
- 2) оборудования для испытаний на удар и постоянное ускорение;
- 3) вибростендов для испытаний при синусоидальных колебаниях;
- 4) оборудования для испытаний при воздействии качки, наклона и тряски.

53. К средствам изучения и измерения вибрации не относится:

- 1) стетоскоп;
- 2) индикатор часового типа;
- 3) измерительный генератор;
- 4) тастограф.

54. Программа испытаний — это организационно-методический документ:

- 1) рекомендуемый к выполнению, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний;
- 2) обязательный к выполнению, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний;
- 3) рекомендуемый к выполнению при добровольной сертификации, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последова-

тельность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний;

- 4) обязательный к выполнению при обязательной сертификации, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний.

55. Методика испытаний — это организационно-методический документ:

- 1) обязательный к выполнению, включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды;
- 2) рекомендуемый к выполнению при добровольной сертификации, включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды;
- 3) обязательный к выполнению при обязательной сертификации, включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды;
- 4) включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

56. Для современного мира электронных измерительных средств не характерно следующее утверждение:

- 1) компьютер все чаще используется для хранения и обработки данных и результатов измерений, полученных отдельными измерительными приборами, подключенных с помощью различных интерфейсов;
- 2) наблюдается тенденция создания автоматизированных систем управления за счет подключения измерительных приборов различных производителей к персональному компьютеру и соединения их между собой;
- 3) наметилась интеграция нескольких измерительных приборов в одном приборе;
- 4) наметилась тенденция к повсеместному использованию «виртуальных» приборов.

Ключи к тестам для самоконтроля

№ теста	№ ответа	№ теста	№ ответа	№ теста	№ ответа	№ теста	№ ответа
1	— 3	18	— 3	35	— 4	52	— 1
2	— 3	19	— 1	36	— 4	53	— 3
3	— 4	20	— 2	37	— 4	54	— 2
4	— 2	21	— 1	38	— 3	55	— 1
5	— 2	22	— 3	39	— 1	56	— 4
6	— 2	23	— 1	40	— 1		
7	— 2	24	— 1	41	— 2		
8	— 2	25	— 3	42	— 1		
9	— 1	26	— 1	43	— 2		
10	— 2	27	— 2	44	— 1		
11	— 3	28	— 2	45	— 1		
12	— 1	29	— 1	46	— 4		
13	— 2	30	— 2	47	— 1		
14	— 4	31	— 3	48	— 1		
15	— 2	32	— 2	49	— 3		
16	— 1	33	— 2	50	— 2		
17	— 4	34	— 2	51	— 2		

Вопросы к зачету

1. Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле.
2. Измерение физических величин — основа всех направлений человеческой деятельности.
3. Роль измерений, испытаний и контроля в повышении качества продукции, услуг и производства.
4. Структурная схема ИП.
5. Классификация измерительных преобразователей.
6. Измерительные цепи генераторных преобразователей.
7. Измерительные цепи параметрических преобразователей.
8. Определение и классификация средств измерений электрических величин.
9. Сигналы измерительной информации.
10. Измерение параметров элементов электрических цепей (L, C, R). Метод вольтметра-амперметра.
11. Измерение параметров элементов электрических цепей (L, C, R). Метод непосредственной оценки.
12. Автоматизация измерений.
13. Электронные омметры.
14. Измерительные мосты постоянного тока.
15. Измерительные мосты переменного тока.
16. Резонансный метод измерения.
17. Метод дискретного счета. Цифровые приборы.
18. Измерение частоты электромагнитных колебаний. Общие сведения.
19. Измерительные генераторы.
20. Измерение частоты методом сравнения.
21. Резонансный частотомер.
22. Электронно-счетный частотомер.
23. Электронно-лучевой осциллограф.
24. Анализ спектра сигналов.

Вопросы к экзамену

1. Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле.
2. Механические ВВФ.
3. Измерение физических величин — основа всех направлений человеческой деятельности.
4. Климатические ВВФ.
5. Роль измерений, испытаний и контроля в повышении качества продукции, услуг и производства.
6. Биологические ВВФ. ВВФ специальных сред.
7. Структурная схема ИП.
8. ВВФ электромагнитных полей. Внутренние воздействующие факторы (ВВФ).
9. Классификация измерительных преобразователей.
10. Общие сведения о современных испытаниях и их отличие от технического контроля.
11. Измерительные цепи генераторных преобразователей.
12. Термические ВВФ.
13. Измерительные цепи параметрических преобразователей.
14. Виды испытаний.
15. Определение и классификация средств измерений электрических величин.
16. Физическое моделирование.
17. Сигналы измерительной информации.
18. Опасные и вредные производственные факторы.
19. Измерение параметров элементов электрических цепей (L, C, R). Метод вольтметра-амперметра.
20. Особенности испытаний на функционирование.
21. Измерение параметров элементов электрических цепей (L, C, R). Метод непосредственной оценки.
22. Особенности испытаний на безопасность.
23. Автоматизация измерений.
24. Автоматизация испытаний.
25. Электронные омметры.
26. Особенности испытаний на надежность.
27. Измерительные мосты постоянного тока.
28. Испытания на механические воздействия вибрации.
29. Измерительные мосты переменного тока.

30. Испытания на механические воздействия ударов.
31. Резонансный метод измерения.
32. Испытания на механические воздействия линейных ускорений.
33. Метод дискретного счета. Цифровые приборы.
34. Испытания на механические воздействия акустических шумов.
35. Измерение частоты электромагнитных колебаний. Общие сведения.
36. Оборудование для механических испытаний.
37. Измерительные генераторы.
38. Средства измерения вибрации и шума.
39. Измерение частоты методом сравнения.
40. Виброметры.
41. Резонансный частотомер.
42. Современное состояние технических средств анализа вибрации.
43. Электронно-счетный частотомер.
44. Стационарные системы мониторинга и диагностики.
45. Электронно-лучевой осциллограф.
46. Разработка программы испытаний.
47. Анализ спектра сигналов.
48. Разработка методик испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Александровская Л. Н., Круглов В. И., Кузнецов А. Г. и др. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. М.: Логос, 2003.
2. Глудкин О. П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. М.: Высш. шк., 1991.
3. Раннев Г. Г., Тарасенко А. П. Методы и средства измерений. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
4. Строителей В. Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. М.: Европейский центр по качеству, 2002.

Дополнительная литература

1. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002.
2. Брюховец А. А. [и др.]. Метрология / под общ. ред. С. А. Зайцева. М.: Форум, 2009.
3. Вакулин А. А., Шабаров А. Б. Диагностика теплофизических параметров в нефтегазовых технологиях. Новосибирск: Наука. Сиб. Издательская фирма РАН, 1998.
4. Димов Ю. В. Метрология, стандартизация, сертификация. Л.: Питер, 2005.
5. Евдокимов Ю. К., Линдваль В. Р., Щербаков Г. И. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. М.: ДМК Пресс, 2007.
6. Ким К. К., Анисимов Г. Н., Барбарович В. Ю., Литвинов Б. Я. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. СПб.: Питер, 2008.
7. Никитин В. А., Бойко С. В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004.
8. Петрухин В. В., Петрухин С. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. Тюмень: ТюмГНГУ, 2009.
9. Сергеев А. Г., Латышев М. В., Терегеря В. В. Метрология, стандартизация, сертификация. М.: Логос, 2003.
10. Тартаковский Д. Ф., Ястребов А. С. Метрология, стандартизация и технические средства измерения. М.: Высш. шк., 2002.
11. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2008.