Министерство образования и науки Республики Казахстан

Карагандинский государственный технический университет

«Утверждаю»
Первый проректор

_____ А. З.Исагулов
"____" _____ 2009г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ

по дисциплине «Контрольно-измерительные средства электротехнических комплексов и систем»

для докторантов специальности - Электроэнергетика

Институт энергетики, телекоммуникаций и автоматики

Кафедра Автоматизации производственных процессов

2010

Предисловие

Учебно-методический комплекс дисциплины преподавателя разработан:
доктором технических наук, профессором Брейдо И.В.

Обсуждена на заседании кафедры автоматизации производственных процессов

Протокол № от « » _____ 20__г.

Зав. кафедрой _____ Брейдо И.В. « » _____20__г.

Одобрена методическим бюро факультета Институт энергетики, телекоммуникаций и автоматики

Протокол № от « » _____ 20__г.

Председатель _____ Каверин В.В. « » _____ 20___г.

1 Рабочая учебная программа

1.1 Сведения о преподавателе и контактная информация

Ф.И.О. Брейдо Иосиф Вульфович

Ученая степень, звание, должность: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой.

Кафедра автоматизации производственных процессов находится в главном корпусе КарГТУ (Б.Мира, 56), аудитория 131, контактный телефон 56-51-84 (кафедра АПП)

1.2 Трудоемкость дисциплины

Семестр	Количество кредитов	Вид занятий					Количество часов СРД	Общее количество часов	Форма контроля
		количество контактных часов			количество часов СРДП	всего часов			
		аудиторных	Практические/семинарские занятия	лабораторные занятия					
4	3	45	45	-	90	135	90	225	Экзамен

1.3 Характеристика дисциплины

Дисциплина «Контрольно-измерительные средства электротехнических комплексов и систем» является профилирующей (ПД) для докторантов специальности – Электроэнергетика.

1.4 Цель дисциплины

Целью изучения данной дисциплины является формирование специальных знаний, умений, навыков и компетенций применительно к конкретной сфере профессиональной деятельности.

1.5 Задачи дисциплины

Задачи дисциплины следующие:

– изучение физических основ и теории элементов и методов построения различных электрических приборов для измерения электрических и неэлектрических величин, а также основ метрологического обеспечения измерений, методов и способов обработки экспериментальных данных;

– ознакомление с основными направлениями развития метрологических средств систем автоматизации и управления;

– приобретение практических навыков выбора, расчета и применения средств измерения и приборов систем автоматизации и управления.

В результате изучения данной дисциплины докторанты должны:

<u>иметь представление об:</u>

основных направлениях развития метрологии и средств измерений, научно-технических проблемах и перспективах развития отраслей измерительной техники;

знать:
перспективы и тенденции развития информационных технологий управления;
принципы работы, технические характеристики и конструктивные особенности разрабатываемых и используемых средств измерений;
уметь:
использовать методы автоматизированного контроля точности продукции и его оперативного управления;
определять основные характеристики и параметры электрических цепей и сигналов;
использовать пакеты прикладных программ для расчетов, моделирования и автоматизации проектирования измерительных средств и систем автоматизации и управления;
приобрести практические навыки:
выбора средств измерений и контроля параметров систем автоматизации и управления.

1.6 Пререквизиты

Для изучения данной дисциплины необходимо усвоение следующих дисциплин (с указанием разделов (тем)):

1.7 Постреквизиты

Знания, полученные при изучении дисциплины «Контрольно-измерительныесредства электротехнических комплексов и систем», используются при освоении следующих дисциплин: «Управляемые преобразователи электроэнергии», «Методы и средства безопасной и эффективной эксплуатации электротехнических комплексов и систем», «Комплектные электроприводы».

Дисциплина	Наименование разделов (тем)
1 Методы экспериментальных исследований в электроэнергетике	Полный факторный эксперимент. Принятие решения перед планированием эксперимента. Свойства полного факторного эксперимента типа $2^к$. Полный факторный эксперимент и математическая модель.
2 Электромеханические системы	Датчики в электромеханических системах. Комплектные электроприводы постоянного и переменного тока Программно управляемые электроприводы Адаптивные электроприводы Надежность электромеханических системах

1.8 Содержание дисциплины

1.8.1 Содержание дисциплины по видам занятий и их трудоемкость

Наименование раздела (темы)	Трудоемкость по видам занятий, час.				
	семинары	аудиторные	лабораторные	СРДП	СРД
1 Введение. Основные представления о контрольно-измерительных средствах электротехнических комплексов и систем	2	–	–	6	6
2 Классификация измерений	3	–	–	6	6
3 Погрешности измерений	3	–	–	6	6
4 Средства измерений	3	–	–	6	6
5 Измерительные сигналы	3	–	–	6	6
6 Измерение электрических величин	3	–	–	6	6
7 Электромеханические приборы и преобразователи	3	–	–	6	6
8 Электронные аналоговые измерительные приборы	3	–	–	6	6
9 Цифровые измерительные приборы	3	–	–	6	6
10 Измерение неэлектрических величин	3	–	–	6	6
11 Измерительные мосты	3	–	–	6	6
12 Регистрирующие приборы и устройства	3	–	–	6	6
13 Измерительные информационные системы	3	–	–	6	6
14 Учет случайных погрешностей измерения	3	–	–	6	6
15 Исследование характеристик электронно-лучевого осциллографа Правила приближенных вычислений и оценка ошибок округления.	4	–	-	6	6
ИТОГО:	45	-	-	90	90

1.9 Список основной литературы

1 Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. – 526 с.

2 Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. – 119 б.

3 Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для ВУЗов. – М.: Высш. школа, 2001. – 205 с.

4 Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие для втузов. – М.: «Дрофа», 2005. – 415 с.
5 Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К и др. Электрорадиоизмерения: Учебник для ВУЗов. – М.: Форум: Инфра-М, 2004. – 384 с.
6 Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. – 121 с.
7 Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-Заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с.

1.10 Список дополнительной литературы

8 Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
9 Справочник по средствам автоматики / [Б.И. Филиппович, А.П. Шорыгин, В.А. Царьков и др.]; Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
10 Электрические измерения: Учеб. для ВУЗов / Малиновский В.Н., Демидова-Панферова Р.М., Евланов Ю.Н. и др.; Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 416 с.
11 Котур В.И., Скомская М.А., Храмова Н.Н. Электрические измерения и электроизмерительные приборы: Учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
12 Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
13 Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 384 с.
14 Аналоговые электроизмерительные приборы / Бишард Е.Г., Дмитриев Ф.С., Киселева Е.А. и др. – М.: Высшая школа, 1991. – 414 с.
15 Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
16 Шульц Ю. Электроизмерительная техника. 1000 понятий для практиков: Справочник / Пер. с нем.; Под ред. Е.И. Сычева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
17 Карлащук В.И. Электронная лаборатория на *IBM PC*. Лабораторный практикум на базе *Electronics Workbench* и *Matlab*. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.
18 Федорашко И.Н., Дайч Л.И., Федорашко Ю.И. и др. Применение программы схемотехнического моделирования *Electronics Workbench* в процессе обучения электротехническим специальностям. Часть 1: Учеб. пособие. – Караганда, 2003. – 40 с.

1.11 Критерии оценки знаний докторантов

Экзаменационная оценка по дисциплине определяется как сумма максимальных показателей успеваемости по рубежным контролям (до 60%) и

итоговой аттестации (экзамену) (до 40%) и составляет значение до 100% в соответствии с таблицей.

Оценка по буквенной системе	Цифровые эквиваленты буквенной оценки	Процентное содержание усвоенных знаний	Оценка по традиционной системе
A A-	4,0 3,67	95-100 90-94	Отлично
B+ B B-	3,33 3,0 2,67	85-89 80-84 75-79	Хорошо
C+ C C- D+ D	2,33 2,0 1,67 1,33 1,0	70-74 65-69 60-64 55-59 50-54	Удовлетворительно

Оценка «A» (отлично) выставляется в том случае, если докторант в течение семестра показал отличные знания по всем программным вопросам дисциплины, а также по темам самостоятельной работы, регулярно сдавал рубежные задания, проявлял самостоятельность в изучении теоретических и прикладных вопросов по основной программе изучаемой дисциплины, а также по внепрограммным вопросам.

Оценка «A-» (отлично) предполагает отличное знание основных законов и процессов, понятий, способность к обобщению теоретических вопросов дисциплины, регулярную сдачу рубежных заданий по аудиторной и самостоятельной работе.

Оценка «B+» (хорошо) выставляется в том случае, если докторант показал хорошие и отличные знания по вопросам дисциплины, регулярно сдавал семестровые задания в основном на «отлично» и некоторые на «хорошо».

Оценка «B» (хорошо) выставляется в том случае, если докторант показал хорошие знания по вопросам, раскрывающим основное содержание конкретной темы дисциплины, а также темы самостоятельной работы, регулярно сдавал семестровые задания на «хорошо» и «отлично».

Оценка «B-»(хорошо) выставляется докторанту в том случае, если он хорошо ориентируется в теоретических и прикладных вопросах дисциплины как по аудиторным, так и по темам СРД, но нерегулярно сдавал в семестре рубежные задания и имел случаи пересдачи семестровых заданий по дисциплине.

Оценка «C+» (удовлетворительно) выставляется докторанту в том случае, если он владеет вопросами понятийного характера по всем видам аудиторных занятий и СРД, может раскрыть содержание отдельных модулей дисциплины, сдает на «хорошо» и «удовлетворительно» семестровые задания.

Оценка «C» (удовлетворительно) выставляется докторанту в том случае, если он владеет вопросами понятийного характера по всем видам аудиторных занятий и СРД, может раскрыть содержание отдельных модулей дисциплины, сдает на «удовлетворительно» семестровые задания.

Оценка «C-» (удовлетворительно) выставляется докторанту в том случае, если докторант в течение семестра регулярно сдавал семестровые задания, но по вопросам аудиторных занятий и СРД владеет только общими понятиями и может объяснить только отдельные закономерности и их понимание в рамках конкретной темы.

Оценка «D+» (удовлетворительно) выставляется докторанту в том случае, если он нерегулярно сдавал семестровые задания, по вопросам аудиторных занятий и СРД владеет только общими понятиями и может объяснить только отдельные закономерности и их понимание в рамках конкретной темы.

Оценка «D» (удовлетворительно) выставляется докторанту в том случае, если он нерегулярно сдавал семестровые задания, по вопросам аудиторных занятий и СРД владеет минимальным объемом знаний, а также допускал пропуски занятий.

Вид контроля	%-ое содержание	Академический период обучения, неделя															Итого, %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Семинары	20	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20
СРД	40	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	40
Экзамен	40																40
Всего	100															-	100

1.12 Политика и процедуры

При изучении дисциплины «Контрольно-измерительные средства электротехнических комплексов и систем» прошу соблюдать следующие правила:

1. Не опаздывать на занятия.
2. Не пропускать занятия без уважительной причины.
3. Во время лекционных, лабораторных и других занятий выполнять Правила внутреннего распорядка, касающиеся поведения студентов в учебных аудиториях.
4. В ходе внеаудиторной подготовки внимательно и вдумчиво изучать прослушанный накануне лекционный материал, систематически использовать рекомендуемую литературу и другие источники.
5. При подготовке к лабораторным занятиям предварительно ознакомиться с описанием лабораторной работы и используемого оборудования, изучить соответствующий тематике работы раздел теоретической части дисциплины, подготовить соответствующие бланки и заготовки таблиц и графиков.
6. При подготовке к СРСП предварительно изучить соответствующий раздел теоретической части дисциплины и ответить на поставленные преподавателем контрольные вопросы.
7. Активно участвовать в учебном процессе.

1.13 Учебно-методическая обеспеченность дисциплины

Ф.И.О. автора	Наименование учебно-методической литературы	Издатель-ство, год издания	Количество экземпляров	
			в биб-лио-теке	на кафед-ре
1	2	3	4	5
Основная литература				
В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др.	Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / Под ред. проф. В.И. Нефедова.	– М.: Высш. шк., 2003.	18	–
Эм Г.А., Потемкина Е.Б.	Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы.	– Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006.	42	2
Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С.	Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для ВУЗов.	– М.: Высшая школа, 2001.	16	2
Атамалян Э.Г.	Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие для втузов.	– М.: «Дрофа», 2005.	10	–
Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К и др.	Электрорадиоизмерения: Учебник для ВУЗов.	– М.: Форум: Инфра-М, 2004.	6	–
Эм Г.А., Потемкина Е.Б.	Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие.	– Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006.	18	10
Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-Заде А.Ю.	Технологические измерения и приборы: Учеб. для ВУЗов.	– М.: Высшая школа, 1989.	23	2
Дополнительная литература				
В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.	Измерения в электронике: Справочник / Под ред. В.А. Кузнецова.	– М.: Энер-гоатомиздат, 1987.	8	2
Филиппович Б.И., Шорыгин А.П., Царьков В.А. и др.	Справочник по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика.	– М.: Энер-гоатомиздат, 1983.	23	1
Малиновский В.Н., Демидова-Панферова Р.М., Евланов Ю.Н. и др.	Электрические измерения: Учеб. для ВУЗов / Под ред. В.Н. Малиновского.	– М.: Энер-гоатомиздат, 1985.	2	–
Котур В.И., Скомская М.А., Храмова Н.Н.	Электрические измерения и электроизмерительные приборы: Учебник.	– М.: Энер-гоатомиздат, 1986.	2	1

1	2	3	4	5
Баранов В.Я., Безновская Т.Х., Бек В.А.и др.	Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / Под ред. В.В. Черенкова	– Л.: Машиностроение, 1987.	1	2
Болтон У.	Карманный справочник инженера-метролога / Пер. с англ.	– М.: Изд. «Додэка-XXI», 2002.	5	1
Бишард Е.Г., Дмитриев Ф.С., Киселева Е.А. и др.	Аналоговые электроизмерительные приборы.	– М.: Высшая школа, 1991.	20	1
Гутников В.С.	Интегральная электроника в измерительных устройствах.	– Л.: Энергоатомиздат, 1988.	7	5
Шульц Ю.	Электроизмерительная техника. 1000 понятий для практиков: Справочник / Пер. с нем.	– М.: Энергоатомиздат, 1989.	4	2
Карлащук В.И.	Электронная лаборатория на *IBM PC*. Лабораторный практикум на базе *Electronics Workbench* и *Matlab*.	– М.: СОЛОН-Пресс, 2004.	1	1
Федорашко И.Н., Дайч Л.И., Федорашко Ю.И. и др.	Применение программы схемотехнического моделирования *Electronics Workbench* в процессе обучения электротехническим специальностям. Часть 1: Учебное пособие.	– Караганда, Изд-во КарГТУ, 2003.	62	10

2 График выполнения и сдачи заданий по дисциплине

Вид конт-роля	Цель и содержание задания	Рекомендуемая литература	Продол-житель-ность выпол-нения	Форма контроля	Срок сдачи
Семинар №1	Основные понятия о Контрольно-измерительные средства электротехнических комплексов и систем	[1, стр.76-101; 2, стр.13-17; 3, стр.33-45; 4, стр.47-92; 6, стр.13-17]	3 час.	Текущий	3 неделя
Семинар №2	Основы теории погрешностей	[1, стр.104-135; 2, стр.16-20; 3, стр.43-62; 4, стр.71-92]	2 час.	Текущий	4 неделя
Семинар №3	Основы метрологического обеспечения	[1, стр. 246-258; 2, стр.61-66; 3, стр.89-95; 4, стр.172-194; 6, стр.62-67]	3 час.	Текущий	6 неделя
Семинар №4	Общие сведения о ИИТ	[1, стр. 71-76; 2, стр. 17-20; 3, стр.28-33; 4, стр.67-69; 6, стр. 18-21]	0,75 контактн ых часа	Рубежны й	7 неделя
Семинар №5	Измерительные преобразователи	[17, стр.12-36; 18, стр. 3-31]	3 час.	Текущий	8 неделя
Семинар №6	Электромеханические приборы и преобразователи	[1, стр.212-213; 2, стр.32-34; 4, стр.99-109; 6, стр. 33-35]	3 час.	Текущий	9 неделя
Семинар №7	Измерительные мосты и компенсаторы	[1, стр.176-179; 2, стр.68-69; 6, стр.69-70; 17, стр.12-36; 18, стр. 3-31]	3 час.	Текущий	10 неделя
Семинар №8	Электронные аналоговые приборы и преобразователи	[1, стр.180-187; 2, стр.50-72, 76-80; 3, стр.68-79, 201-202; 6, стр.51-73, 78-81]	3 час.	Текущий	11 неделя
Семинар №9	Цифровые приборы и преобразователи	[1, стр. 357-361; 2, стр. 54-57; 4, стр. 293-303; 6, стр. 55-58]	0,75 контактн ых часа	Рубежны й	14 неделя
Семинар №10	Регистрирующие приборы и устройства	[1, стр. 357-361; 2, стр. 54-57; 4, стр. 293-303; 6, стр. 55-58]	2 час.	Текущий	15 неделя

Вид конт-роля	Цель и содержание задания	Рекомендуемая литература	Продол-житель-ность выпол-нения	Форма контроля	Срок сдачи
СРД	Контроль усвоения самостоятельно изученного материала.	В соответствии с тематикой реферата	10 контактн ых часа	Реферат, доклад (текущий)	Со-гласно графика СРД
Экзамен	Проверка усвоения материала дисциплины	Весь перечень основной и дополнительно й литературы	10час	Итоговый	В период сессии

Примечание – номер рекомендуемой литературы, указанный в квадратных скобках, проставляется согласно нумерации списка основной и дополнительной литературы, предлагаемой в рабочей учебной программе (см. п.1).

3 Конспект лекций

Тема 1 Введение. Основные представления о контрольно-измерительные средства электротехнических комплексов и систем

План лекции
1. Обзор развития, современное состояние и значение метрологии
2. Основные понятия и определения
3. Основы воспроизведения единиц физических величин
4. Связь настоящей дисциплины с другими дисциплинами специальности

1. Вся практическая деятельность человека тесно связана с измерениями. Любое современное производство немыслимо без точного, объективного контроля технологического процесса. Развитие науки сопровождается всегда также и прогрессом в развитии *средств измерений*. Появилась отрасль техники, представляющая собой совокупность технических средств, методов и приемов сбора информации и проведения измерений, интерпретации их результатов, называемая *информационно-измерительной техникой (ИИТ)*. Среди различных средств измерений особое место занимают средства *электроизмерительной техники*, получившие широкое распространение благодаря следующим основным преимуществам:

универсальность, позволяющая применение их для измерений как электрических, так и неэлектрических величин, предварительно преобразованных в электрические;

дистанционность, заключающаяся в возможности проводить измерения на значительном удалении от места установки средств измерений;

относительная простота автоматизации измерительных процессов;

возможность измерения быстро изменяющихся величин;

обеспечение высокой чувствительности и точности измерений и т.д.

Первый электроизмерительный прибор (электрометр) был предназначен для изучения атмосферного электричества и построен в 1743 г. русским академиком *Г.В. Рихманом* – соратником великого М.В. Ломоносова.

В 1820 г. *А.Ампер* продемонстрировал первый гальванометр, а в 1837 г. *де ля Рив* изобрел тепловой электроизмерительный прибор.

В первой половине XIX века были заложены основы электротехники (законы *Фарадея*, принцип *Ленца*), разработаны методы электрических измерений – баллистический, компенсационный, мостовой, появились первые гальванометры.

Электроизмерительная техника как отрасль сформировалась во второй половине XIX века. Большой вклад в развитие метрологии и электро-приборостроения внесли российские естествоиспытатели, инженеры и изобретатели – *М.О. Доливо-Добровольский, А.Г. Столетов, Б.С. Якоби* и др. Так, электроизмерительные приборы и методы измерений, разработанные выдающимся электротехником М.О. Доливо-Добровольским, дошли до наших дней (индукционный ваттметр и фазометр, электромагнитные вольтметры и

амперметры, ферродинамический ваттметр, метод измерений потерь в стали и др.). А.Г. Столетов впервые применил баллистический метод в магнитных измерениях, используемый до сих пор. Одни из первых приборов для измерения электрического сопротивления создал академик Б.С. Якоби, с его именем также связаны первые попытки ввести единство в измерения электрических величин.

Для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц различных величин с помощью специальных мер-эталонов в некоторых странах были созданы специальные метрологические учреждения. В России таким учреждением явилось созданное в 1842 г. Депо образцовых мер и весов, преобразованное позднее в Главную палату мер и весов, первым руководителем которой был *Д.И. Менделеев*.

В 1875 г., учитывая необходимость единства измерений в международном масштабе, по инициативе российской стороны 17 странами-учредительницами подписана *Международная* «*Метрическая конвенция*». В настоящее время к этой конвенции присоединилось более 60 стран, которые образовали *Международную Организацию Мер и Весов* (*МОМВ*). Первая система единиц физических величин, установленная в международном масштабе, была принята *Первым конгрессом по электричеству* в 1881 г.

Конец XIX в. характеризовался первыми успехами радиосвязи и радиоэлектроники. Ее развитие привело к необходимости создания средств измерительной техники нового типа, рассчитанных на малые входные сигналы, высокие частоты и высокоомные входы. В этих новых средствах измерительной техники использовались радиоэлектронные компоненты – выпрямители, усилители, модуляторы и генераторы сигналов, электронно-лучевые трубки (при построении осциллографов) и др.

Особенно быстрыми темпами развивались приборостроение и информационно-измерительная техника последние полвека, характеризующиеся созданием качественно новых приборов и измерительных систем, использующих последние достижения науки и техники.

Расширение номенклатуры и качественных показателей средств измерительной техники неразрывно связано с достижениями радиоэлектроники. Одним из современных направлений развития измерительной техники, базирующейся на достижениях радиоэлектроники, являются цифровые приборы с дискретной формой представления информации. Такая форма представления результатов оказалась удобной для преобразования, передачи, обработки и хранения информации. Развитие дискретных средств измерительной техники в настоящее время привело к созданию цифровых вольтметров постоянного тока, погрешность показаний которых ниже 0,0001 %, а быстродействие преобразователей напряжение-код достигает нескольких миллиардов измерений в секунду; верхний предел измерения современных цифровых частотомеров достиг ГГц; цифровые измерители временного интервала имеют нижний предел измерения до долей пикосекунды; а электрические токи измеряются в диапазоне от 10^{-16} до 105 А.

Для комплексных измерений большого числа величин стали применять

измерительные информационные системы и, в том числе, *измерительно-вычислительные комплексы*. Структура современных средств ИИТ, как правило, включает микропроцессоры и микроЭВМ. Благодаря им значительно расширились области применения средств измерительной техники, улучшились их технические характеристики, повысились надежность и быстродействие, открылись пути реализации задач, которые ранее не могли быть решены.

Область измерительной техники, объединяющую измерительные устройства и методы измерений, применяемые в технологических процессах, называют *технологическими измерениями*. Набор измеряемых параметров, включаемых в технологические измерения, весьма различен для различных отраслей промышленности и во многом зависит от специфики технологических процессов.

Любой производственный процесс характеризуется большим числом параметров, изменяющихся в широких пределах. Для поддержания требуемого режима технологической установки необходимо измерение указанных параметров. При этом, чем достовернее осуществляется измерение технологических параметров, тем лучше качество целевого выходного продукта. Современное производство, например, нефтехи-мического профиля с непрерывным характером производства для поддержания качества выпускаемой продукции используют измерение различных физических параметров, таких, как температура, объемный и массовый расход веществ, давление, уровень и количество вещества, время, состав вещества (плотность, влажность, содержание механических примесей и др.), напряжение, сила тока, скорость и др. При этом число требуемых для измерения параметров достигает нескольких тысяч. Так, в атомной энергетике количество требуемых для измерения параметров процессов достигает десятков тысяч.

Это определяет невозможность проведения современных технологических процессов без их *частичной, комплексной* или *полной автоматизации*. Автоматизация технологического производства предполагает, в том числе, *автоматический контроль* технологических параметров.

Автоматический контроль является наиболее старым и важнейшим видом автоматизации. Работа любой системы автоматизации технологического производства строится на основе измерений, осуществляемых датчиками и другими средствами контроля и измерений. Этим определяется первостепенное значение измерений для систем автоматизации любого уровня и сложности.

2. *Измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Принципиальная особенность измерения заключается в отражении размера физической величины числом. При этом з*начение физической величины*, количественная оценка измеряемой величины, должна быть выражена числом именованным. т.е. результат измерения должен быть выражен в определенных единицах, принятых для данной величины.

Результат измерения практически всегда отличается от истинного значения физической величины, поскольку истинное значение определить

невозможно, что объясняется несовершенством средств измерений, способов измерений, ограниченными возможностями человеческого организма и др.

Измерение уменьшает исходную неопределенность значения физической величины до уровня неизбежной остаточной неопределенности, определяемой *погрешностью измерения*. *Погрешность измерения* – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Погрешность измерения является непосредственной характеристикой *точности измерения*. Под *точностью измерений* подразумевают качество измерения, отражающее близость результата измерения к истинному значению измеряемой величины.

Значение погрешности измерения зависит от совершенства технических устройств, способа их использования и условий проведения *измерительного эксперимента*. Под *измерительным экспериментом* понимают научно обоснованный опыт для получения количественной информации с требуемой или возможной точностью определения результата измерений. Проведение измерительного эксперимента предполагает наличие технических устройств, которые могут обеспечить заданную точность получения результата. Технические устройства, участвующие в эксперименте, заранее *нормируются* по показателям точности и относятся к средствам измерений.

При измерениях широко используется термин «*информация*», под которым подразумевают совокупность сведений, уменьшающих неопределенность знаний об объекте. Соответственно, *измерительная информация* – это количественные сведения о свойствах материального объекта, явления или процесса, получаемые с помощью средств измерений в результате их взаимодействия с объектом.

Взаимодействие объекта исследования и средств измерений в процессе эксперимента предполагает наличие сигналов, которые являются носителями информации. Носителями информации могут являться электрический ток, напряжение, импульсы и другие электрические параметры. *Измерительный сигнал* – сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной с заданной точностью.

Метрологическое обеспечение – это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Научной основой метрологического обеспечения является *метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности измерений.

Организационная основа метрологического обеспечения – метрологические службы предприятий, учреждений и организаций, государственные региональные центры стандартизации, метрологии и сертификации (ранее их возглавлял Госстандарт СССР).

Третья составляющая метрологического обеспечения – *техническая основа* – система государственных эталонов; система передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем средствам измерений с помощью образцовых средств измерений и средств поверки; система государственных

испытаний средств измерений; система обязательной поверки или метрологической аттестации средств измерений; система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов и др.

Правовую основу метрологического обеспечения составляет *Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ)*, представляющая собой комплекс нормативно-технических документов, устанавливающих единую номенклатуру стандартных взаимоувязанных правил и положений, требований и норм, относящихся к организации и методике оценивания и обеспечения точности измерений.

3. Большое значение в измерительной технике придается *единству измерений*. *Единство измерений* – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в указанных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Единство измерений позволяет сравнивать результаты различных экспериментов, проведенных в различных условиях, выполненных в разных местах с использованием разных методов и средств измерений. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения установленных единиц физической величины и передачи их размеров применяемым средствам измерения.

Поскольку все физические величины находятся так или иначе в какой-то связи друг с другом, в аналогичной взаимной связи находятся и единицы их измерений. Совокупность этих величин, связанных между собой зависимостями, образуют *систему единиц физических величин*. В системе единиц только так называемые *основные единицы* устанавливаются произвольно, единицы же измерения всех остальных величин являются *производными* от основных. В качестве основных выбирают величины, которые могут быть воспроизведены и измерены с наиболее высокой точностью. В области электротехники таковыми приняты – длина, масса, время и сила электрического тока. Зависимость каждой производной величины от основных отображается ее *размерностью*. Размерность величины представляет собой произведение обозначений основных величин, возведенных в соответствующие степени.

В странах бывшего СССР действуют государственные стандарты, согласно которым введена к обязательному применению международная система единиц *SI* («*System International*»).

Эталоны единиц физических величин – это средства измерений, обеспечивающие воспроизведение или хранение единиц с целью передачи их размеров рабочим средствам измерений. Передача размеров единиц осуществляется с помощью поверочных схем, которые устанавливают методы, средства, точность и соподчинённость средств измерений при передаче размера единицы физической величины от исходного образцового средства до объекта поверки.

В настоящее время действует около 130 эталонов единиц физических величин. Различают эталоны *основных* и *производных* единиц (в соответствии с делением физических величин), а также *первичные* и *вторичные* (по точности воспроизведения единиц и подчиненности). Первичные эталоны воспроизводят

и хранят единицы физических величин и передают их размеры с наивысшей точностью. К вторичным эталонам относят *эталоны-копии, эталоны сравнения* и *рабочие эталоны*. Первые предназначены для передачи размера единицы рабочим эталонам, которые служат для поверки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений. Эталоны сравнения применяются для взаимного сличения эталонов, которые не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Кроме *национальных (государственных)* существуют также *международные* эталоны, предназначенные для поддержания единства измерений в международном масштабе путем периодического сличения.

Следует отметить, что в настоящее время основные метрические единицы измерения системы SI (кроме единицы массы) базируются не на физических объектах, а на физических константах. Так, *эталон метра*, бывший ранее металлическим стержнем, ныне определяется как дистанция (длина пути), которую покрывает луч света за 1 / 299792458 долю секунды. А *секунда* определяется как продолжительность 9192631770 периодов колебаний электромагнитного излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Эти первичные эталоны используются для определения национальных эталонов не только в эталонных единицах измерения, но и в единицах, производных от них. Так, *эталон сопротивления*, воспроизводящий 1 Ом с помощью десяти манганиновых катушек сопротивления, основывается на эталонных единицах измерения длины, массы, времени и тока.

Основными объектами *Государственной системы обеспечения единства измерений* (ГСИ) являются: единицы физических величин; государственные эталоны и поверочные схемы; методы и средства поверки средств измерений; нормы точности измерений, методики выполнения измерений и т.д. Система была создана в СССР и содержит стандарты, обеспечивающие единство измерений и требующие неукоснительного выполнения.

Для обеспечения единства измерений ГСИ требует выражать результаты измерений в единицах физических величин системы SI. В соответствии с этим *основными единицами* являются единицы длины (*метр*), массы (*килограмм*), времени (*секунда*), силы тока (*ампер*), термодинамической температуры (*кельвин*), количества вещества (*моль*) и силы света (*кандела*). К *дополнительным единицам* отнесены *радиан* (единица плоского угла) и *стерадиан* (единица телесного угла). Кроме основных и дополнительных, система единиц предусматривает *производные единицы*, образуемые из основных и дополнительных при помощи определяющих уравнений.

ГСИ содержит более сотни стандартов. Согласно одному из них средства измерений, находящиеся в пользовании, должны периодически подвергаться государственной поверке, ревизии, экспертизе.

Дадим определения некоторым из терминов, принятых в практике метрологического обеспечения.

Поверка – это действия метрологического органа по определению погрешностей средств измерений и установлению его пригодности к применению.

Ревизия – действия по установлению соответствия средств и методик измерений необходимому уровню метрологического обеспечения производства.

Экспертиза – действия по определению соответствия средств и методик их применения техническим условиям. Поверка, ревизия и экспертиза осуществляются государственными или ведомственными метрологическими органами. На средства измерений, прошедшие государственную (ведомственную) поверку, ставится соответствующее клеймо.

Калибровка – специальный вид испытаний, которым устанавливают пригодность испытываемого изделия к применению, а также знак ошибки.

Юстировка – специальный вид работ, имеющий целью доведение погрешности средства измерений до значения, соответствующего техническим требованиям.

Поверочная схема – утверждаемый в установленном порядке документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи размера единицы эталона или образцового средства измерений рабочим средствам измерений.

Схема поверки – схема реальных соединений (электрических, гидравлических, пневматических и др.) образцовых и рабочих средств измерений при поверке последних.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.7-30, 49-63.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.4-8, 21-23.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.6-13, 28-31.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.4-8, 21-24.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Обзор развития и современное состояние метрологических средств

Тема 2 Классификация измерений

План лекции

1. Основные определения
2. Классификация измерений

1. Дадим определения некоторым терминам, которыми будем оперировать в дальнейшем:

принцип измерения – совокупность физических явлений и закономерностей, положенных в основу измерения;

метод измерения – совокупность приемов использования принципов и средств измерений;

способ измерения – практическое осуществление процесса получения

измерительной информации (аналоговый или цифровой). Способ измерения отражает основные аспекты технического построения измерительного устройства, связывающие принцип измерения с методом измерения.

2. На рис.2.1 приведена классификационная структура способов и методов измерения, известных в настоящее время. Рассмотрим подробнее основные из них.



Рисунок 2.1 – Классификация измерений

Прямые методы измерения – это измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных в результате выполнения измерения. Например, измерение вольтметром напряжения и ЭДС источника.

Косвенные методы – методы, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям:

$$X = F(X_1, X_2, X_3,\ldots,X_n), \qquad (2.1)$$

где $X_1, X_2, X_3,\ldots,X_n$ - значения величин, полученные прямыми измерениями.

Например, определение сопротивления резистора R с помощью прямого измерения падения напряжения U и тока I через резистор (закон Ома).

Гораздо реже встречаются методы совместных и совокупных измерений, характерные для прикладных областей метрологии и научных исследований.

Метод совместных измерений предполагает одновременные измерения нескольких неодноимённых величин для нахождения зависимости между ними. При этом решают систему уравнений:

$$\begin{cases} F(X_1, X_2,\ldots, X_n, X_1', X_2',\ldots, X_к') = 0 \\ F(X_1, X_2,\ldots, X_n, X_1'', X_2'',\ldots, X_к'') = 0 \\ F(X_1, X_2,\ldots, X_n, X_1^{(n)}, X_2^{(n)},\ldots, X_к^{(n)}) = 0; \end{cases} \qquad (2.2)$$

где $X_1, X_2,\ldots, X_n$ - искомые величины;

$X_1', X_2',\ldots, X_к', X_1'', X_2'',\ldots, X_к'', X_1^{(n)}, X_2^{(n)},\ldots, X_к^{(n)}$ - значения измеренных величин.

Например, для определения зависимости сопротивления резистора от температуры $R_t = R_0 (1+At+Bt^2)$, составляется система из трех уравнений этого вида (для этого измеряют сопротивление резистора при трех различных значениях температуры), затем, решая систему, находят параметры R_0, A, B.

Метод совокупных измерений предусматривает одновременные измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, составленных из результатов прямых измерений различных сочетаний этих величин. Например, измерение сопротивлений резисторов, соединенных в треугольник, выполняют путем измерения сопротивлений между различными вершинами треугольника; по результатам трех измерений определяют сопротивления.

В зависимости от режима работы применяемых средств измерения разделяют на *статические* (когда выходной сигнал средства, например, отклонение стрелки, остается неизменным в течении времени использования выходного сигнала) и *динамические* (когда выходной сигнал средства изменяется во времени так, что для получения результата измерения необходимо учитывать это изменение).

Аналоговые измерения непрерывны во времени, т.е. на заданном интервале времени число измеряемых мгновенных величин бесконечно, в противоположном случае речь идет о *дискретных* измерениях.

В основе *дифференциальных* методов лежит измерение разности между измеряемой величиной и другой, аналогичной ей по физической природе, значение которой заранее известно и незначительно отличается от значения измеряемой величины.

При методе *совпадения* определяется разность между измеряемой и опорной величинами, для чего используется совпадение шкал или периодических сигналов.

При *нулевом* методе обеспечивается нулевая разность между измеряемой величиной и величиной с известным значением. Применяется в уравновешиваемых измерительных мостах.

При *компенсационном* методе измеряемая величина сравнивается с

однородной, равной по значению, но противоположной по знаку (фазе) величиной. Применяется в компенсаторах.

Метод *непосредственной оценки* характеризуется тем, что значение измеряемой величины здесь определяется непосредственно по устройству индикации измерительного прибора.

Относительные методы - прямые методы, позволяющие определить значения измеряемой величины через отношение этой величины к некоторой однородной величине с известным значением.

Метод перестановки заключается в сравнении измеряемой и замещающей величин, их перестановке и новом сравнении. Применяют для обнаружения систематических погрешностей.

В *методе дополнения* измеряемая величина дополняется аналогичной величиной с известным значением так, что их сумма достигает заданного известного значения.

При *методе замещения* измеряемая величина после первого измерения заменяется величиной с известным значением и измерение повторяется, а результат рассчитывается с использованием обоих полученных при измерениях значений.

Кроме того, по условиям, определяющим точность результата, различают следующие классы измерений:

измерения максимально возможной точности, достижимой при современном уровне развития техники (создание и воспроизведение эталонов, образцовых средств измерений, измерение универсальных физических констант);

контрольно-поверочные измерения, погрешности которых не должны превышать заданного значения (выполняются в основном государственными и ведомственными метрологическими службами);

технические измерения (в том числе, *технологические*) – наиболее распространенный класс измерений, выполняются во всех отраслях промышленности и науки, погрешность результата в них определяется характеристиками средств измерений.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.30-38.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.8-11.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.21-23.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.8-11.

Контрольные задания для СРд [1-4]

1. Основные методы и способы измерений

Тема 3 Погрешности измерений

План лекции
1. Основные понятия и определения
2. Вероятностный подход к описанию погрешности
3. Числовые характеристики законов распределения
4. Обнаружение и исключение систематической погрешности

1. *Погрешность* – это искажение результата измерений. В общем случае погрешность равна измеренному значению минус истинное значение. Погрешность измерений представляет собой сумму всех составляющих погрешности. Чтобы выбрать средство и метод измерений, необходимо точное знание характера погрешности и обеспечение соответствующих условий проведения измерений.

Погрешность измерений может быть представлена в абсолютной и относительной форме.

Абсолютная погрешность (отклонение) – погрешность, выраженная разностью между измеренным X' и истинным X_0 значениями:

$$\Delta X = X' - X_0 \qquad (3.1)$$

Она всегда выражается в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности ΔX к истинному значению X_0:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_0} \qquad (3.2)$$

Под истинным значением здесь следует понимать значение измеряемой величины, полученное с помощью образцовых средств измерения с наибольшей точностью. Относительная погрешность выражается в относительных единицах либо в процентах.

Основной вид представления погрешности в электроизмерительной технике – *приведенная погрешность* средства измерения (отношение максимальной абсолютной погрешности $\Delta X_{мах}$ к конечному значению диапазона измерений $X_к$):

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta X_{мах}}{X_к} \qquad (3.3)$$

Пример 3.1 *Определить относительную погрешность при измерении тока амперметром класса точности 1,5, если номинальный ток амперметра 30 А, а показание на амперметре – 15 А.*

Ответ: наибольшая возможная погрешность при измерении силы тока составит

$$\delta = \pm 1{,}5\ \% \cdot 30\ А / 15\ А = \pm 3\ \%$$

Пример 3.2 *Сравнить погрешности измерений давления в 100 кПа*

манометрами классов точности 0,2 и 1,0 с пределами измерений на 600 и 100 кПа соответственно.

Ответ: Манометр класса точности 0,2 на 600 кПа при измерении 100 кПа будет иметь погрешность $\delta_1 = \pm 1{,}2$ *%, а манометр класса точности 1,0 при измерении в последней точке шкалы* $\delta_2 = \pm 1$ *%. Следовательно, второй прибор в данном случае предпочтительней.*

На рис.3.1 приведена классификационная структура видов погрешности измерений и формы ее представления.

Грубая погрешность – это погрешность, значительно превосходящая по величине погрешность, ожидаемую при данных условиях измерений. Результатом ее является *промах.* Основные причины появления грубой погрешности: неправильное считывание показаний, дефекты средств измерений, сильные внешние воздействия (помехи) и т.д.

Систематическая погрешность обусловлена несовершенством средства измерения, метода измерения. Она имеет для каждого измеренного значения определенное значение и при наличии ряда измерений постоянный знак.

Случайная погрешность возникает при непредвиденных изменениях параметров средств измерений, измеряемых объектов или окружающей среды. Так как она носит случайный характер как по значению, так и по знаку, то скорректировать эту погрешность в отличие от систематической невозможно.

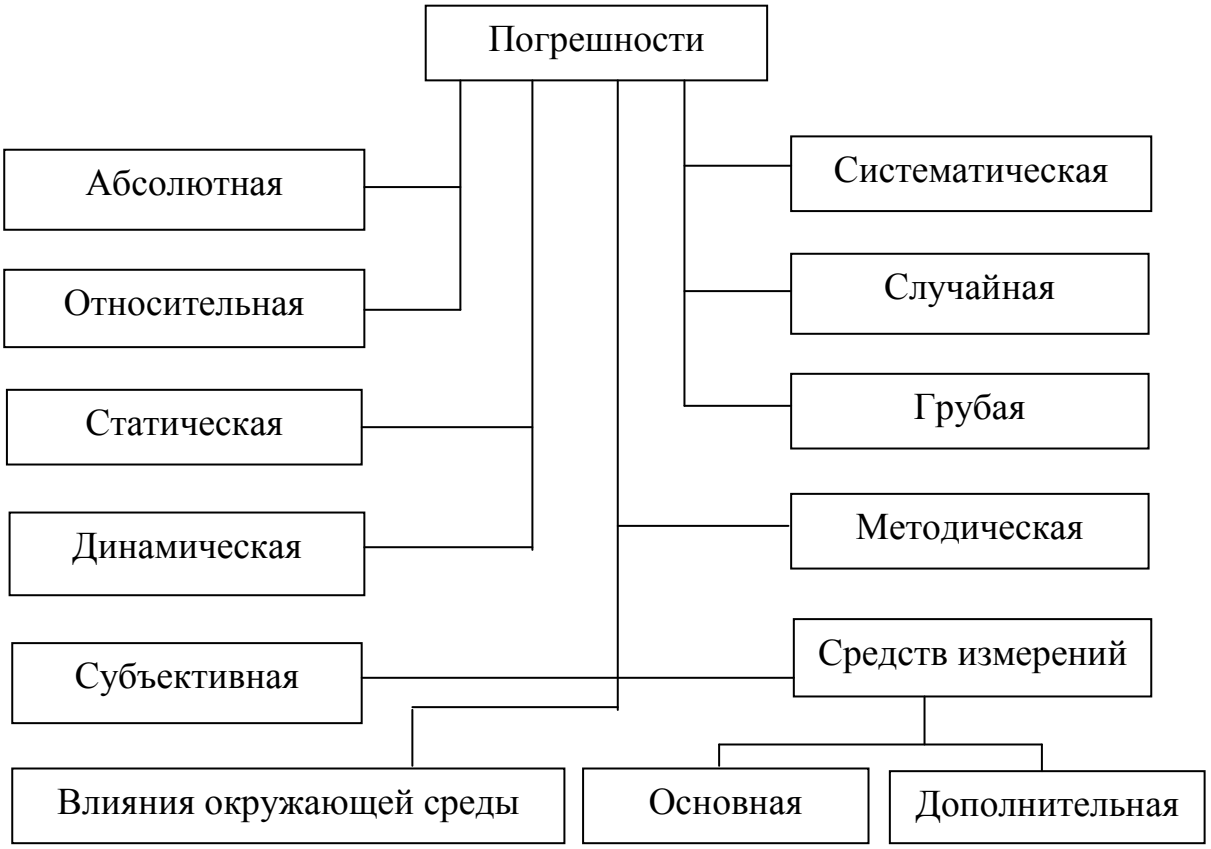


Рисунок 3.1 – Классификация погрешностей

Методическая погрешность обусловлена невозможностью точного установления соотношения между измеряемой величиной и выходным сигналом

средства измерения, по которому оценивается результат измерения, вследствие недостаточной изученности объекта исследования, невозможности точного учета влияния местных факторов, недостаточной разработанности теории физических явлений, приближенных методов и т.д.

Погрешность средств измерений или *инструментальная погрешность* обусловлена несовершенством средства измерений. Это погрешности от трения, некачественных юстировки и калибровки, дрейф нуля и т.д. Инструментальная погрешность имеет определяющее значение для наиболее распространенных технических измерений. В зависимости от условий применения измерительных устройств различают *основную* и *дополнительную* погрешности.

Основной погрешностью средства измерений называют погрешность при использовании его в нормальных условиях.

Нормальными условиями применения средств измерений называют условия, при которых влияющие величины имеют номинальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. Нормальные условия применения указываются в стандартах или технических условиях на средства измерений.

Дополнительной погрешностью средства измерений называют изменение его погрешности, вызванное отклонением одной из влияющих величин от ее нормативного значения или выходом ее за пределы нормальной области значений. Дополнительная погрешность может быть вызвана изменением сразу нескольких влияющих величин.

Субъективная погрешность обусловлена индивидуальными свойствами человека, выполняющего измерения. Причиной ее могут являться также укоренившиеся неправильные навыки выполнения измерений.

Пример 3.3 *Для определения электрической мощности, выделяемой в активном сопротивлении, были измерены: напряжение 125 В вольтметром с номинальным напряжением 150 В класса точности 1,5 и сопротивление нагрузки 20 Ом одинарным мостом с погрешностью 0,2 %. Найти мощность в нагрузке и наибольшую возможную относительную погрешность при ее измерении.*

Ответ: Определим мощность

$$P = U^2 / r = 125^2 / 20 = 781{,}25\ Вт.$$

Относительная погрешность измерения напряжения составит

$$\delta_U = \gamma \cdot U_H / U = 1{,}5 \cdot 150 / 125 = 1{,}8\ \%.$$

Тогда относительная погрешность измерения мощности косвенным методом будет

$$\delta_P = 2 \cdot \delta_U + \delta_R = 2 \cdot 1{,}8 + 0{,}2 = 3{,}8\ \%.$$

2. Результат измерения всегда содержит как *систематическую*, так и *случайную составляющие погрешности*. Причем если первые могут быть в значительной степени уменьшены либо исключены с помощью специальных методов (введением поправок, устранением источников погрешностей и др.), то вторые трудно поддаются анализу, поскольку вызываются сложной совокупностью изменяющихся факторов, и могут быть уменьшены за счет

снижения влияния причин появления их только в случае знания этих причин (например, экранированием цепей от наводок внешнего поля).

Другой способ уменьшения влияния случайных погрешностей (путем их учета) на результат измерения основан на статистической обработке результатов многократных измерений одного и того же значения измеряемой величины с помощью методов теории вероятностей. В этом случае говорят об *ожидаемой погрешности*. Последний способ предполагает либо многократные измерения одними и теми же средствами, либо параллельные одновременные измерения несколькими независимыми средствами измерений.

Отдельное значение случайной погрешности предсказать невозможно. Совокупность же случайных погрешностей какого-то измерения одной и той же величины подчиняется определенным закономерностям, которые являются вероятностными. При этом физическую величину, результат измерения которой содержит случайную погрешность, и саму случайную погрешность рассматривают как случайную величину. При этом систематическую погрешность результата измерения ΔX_C рассматривают как математическое ожидание этой величины, а случайную составляющую ΔX – как центрированную случайную величину:

$$\Delta X = \Delta X_C + \Delta X \qquad (3.4)$$

Для количественной оценки объективной возможности появления того или иного значения случайной величины служит понятие *вероятности*, которую выражают в долях единицы (вероятность достоверного события равна 1, а вероятность невозможного события – 0).

Математическое описание непрерывных случайных величин осуществляется обычно с помощью дифференциальных *законов распределения* случайной величины. Эти законы определяют связь между возможными значениями случайной величины (погрешности) и соответствующими им плотностями вероятностей (непрерывной считают случайную величину, имеющую бесчисленное множество значений, получить которое можно только при бесконечном числе измерений).

В практике электрических измерений встречаются различные законы распределения. Реальные законы распределения даже в простейших случаях отличаются от *теоретических стандартных*, рассматриваемых ниже. Однако практика показывает, что погрешность в 10-20 % при определении самой погрешности вполне удовлетворительна.

Рассмотрим наиболее известные *стандартные законы распределения*.

1. *Нормальный закон (распределение Ф.Гаусса – А.М.Ляпунова)* – один из наиболее распространенных законов распределения, описывается формулой:

$$\omega(\Delta X) = \frac{1}{\sigma[\Delta X]\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\Delta X - \Delta X_C)^2}{2\sigma^2[\Delta X]}\right), \qquad (3.5)$$

где $\omega(\Delta X)$ – плотность вероятности погрешности ΔX;

$\sigma[\Delta X]$ – среднеквадратическое отклонение погрешности;

ΔX_C – систематическая составляющая погрешности.

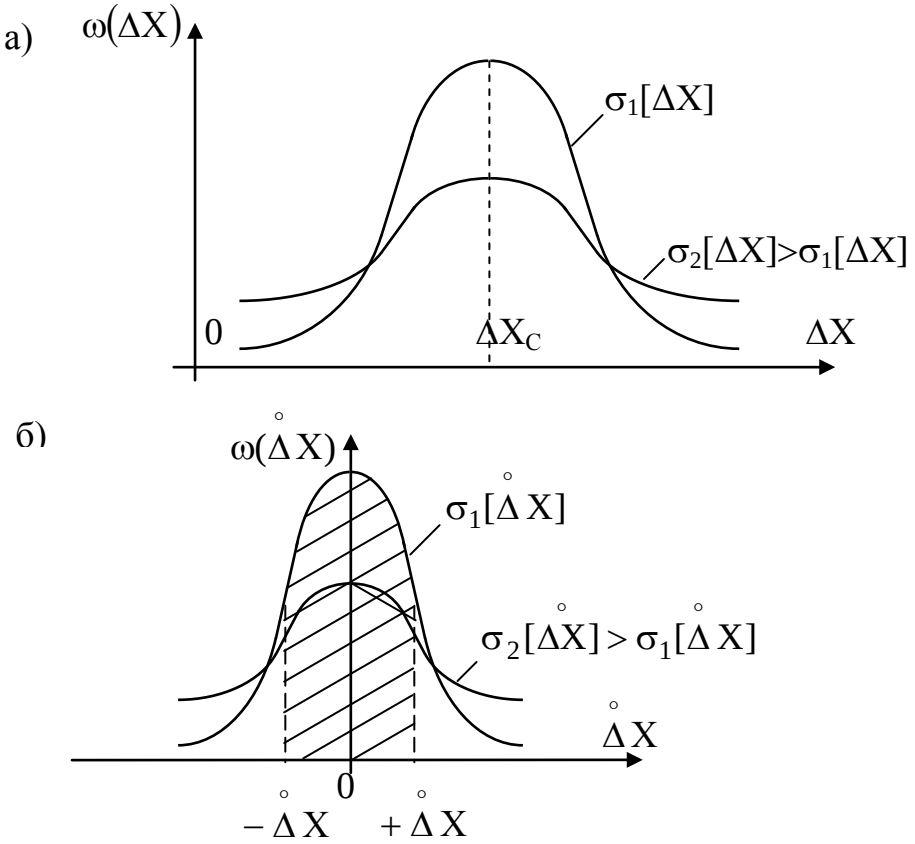


Рисунок 3.2 – График нормального закона распределения погрешности измерений (а) и ее случайной составляющей (б)

При этом *плотность вероятности (или плотность распределения)* характеризует плотность, с которой распределяются значения погрешности в данной точке, а *среднеквадратическое отклонение* характеризует рассеяние результатов отдельных наблюдений относительно математического ожидания, т.е. форму кривой распределения плотности вероятности, площадь под которой всегда равна единице.

Поскольку $\Delta X=\Delta X-\Delta X_C$, то закон распределения случайной составляющей погрешности примет вид:

$$\omega(\Delta X)=\frac{1}{\sigma[\Delta X]\cdot\sqrt{2\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{(\Delta X)^2}{2\sigma^2[\Delta X]}\right) \qquad (3.6)$$

На основании закона Гаусса получены аксиомы случайных погрешностей:

А. *Аксиома случайности (свойство симметрии)* – при большом числе измерений случайные погрешности, численно равные по абсолютному значению, но противоположные по знаку, встречаются одинаково часто.

В. *Аксиома распределения (свойство концентрации)* – чем больше случайные погрешности по значению, тем меньше вероятность их появления.

2. *Равномерный закон распределения* – такому закону подчиняется погрешность дискретности в цифровых приборах, погрешность от трения в опорах электромеханических преобразователей и т.д.

$$\begin{cases} \omega(\Delta X) = \dfrac{1}{2 \cdot \Delta X_1} \quad \text{при } -\Delta X_1 \le \Delta X \le +\Delta X_1 ; \\ \omega(\Delta X) = 0 \quad \text{при} \quad \Delta X < -\Delta X_1 \quad \text{и} \quad \Delta X > +\Delta X_1 \end{cases} \tag{3.7}$$

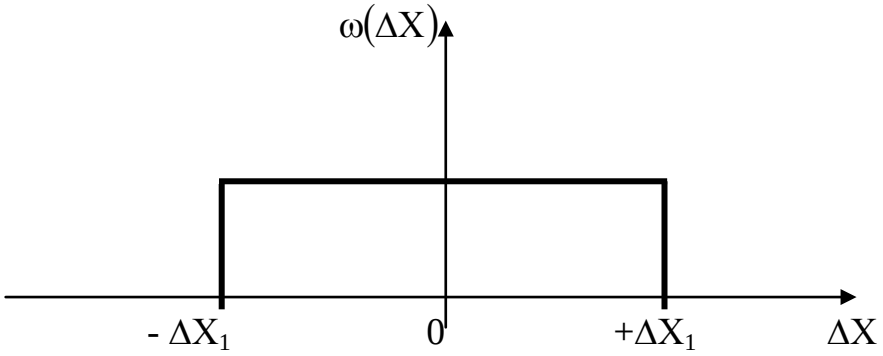
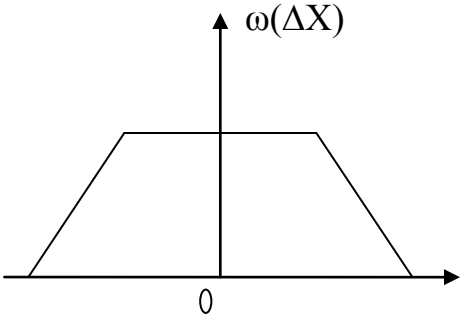


Рисунок 3.3 – График равномерного распределения

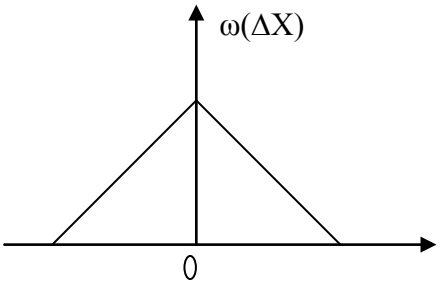
3. *Трапециевидный закон распределения*



Характеризует погрешность, образуемую из двух независимых составляющих, каждая из которых имеет равномерный закон распределения, но ширина интервала этих законов различна.

Рисунок 3.4

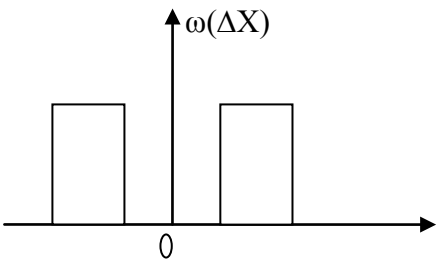
4. *Треугольный закон (Симпсона)*



Частный случай трапециевидного, когда составляющие имеют одинаковые равномерные законы распределения.

Рисунок 3.5

5. *Двухмодальный закон*



Характерен для приборов с гистерезисом при перемагничивании деталей прибора, для приборов, имеющих люфт кинематических механизмов и т.д.

Если погрешность измерения образуется из пяти и более составляющих, среди которых нет существенно преобладающих, то принимают обычно нормальный закон распределения результирующей погрешности.

3. Из *Теории вероятностей* известно, что законы распределения можно охарактеризовать числовыми характеристиками, которые используются и для количественной оценки погрешности.

К основным числовым характеристикам законов распределения относят:

математическое ожидание погрешности измерений – это неслучайная величина, относительно которой рассеиваются другие значения погрешностей при повторных измерениях –

$$M[\Delta X] = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta X \cdot \omega(\Delta X) \cdot d(\Delta X), \qquad (3.8)$$

M[ΔX] характеризует систематическую составляющую погрешности измерения: $M[\Delta X] = \Delta X_C$;

дисперсия погрешности характеризует степень рассеивания отдельных значений погрешности относительно математического ожидания. Чем меньше дисперсия, тем меньше разброс и точнее выполнены измерения –

$$D[\Delta X] = \int_{-\infty}^{+\infty} \{\Delta X - M[\Delta X]\}^2 \cdot \omega(\Delta X) \cdot d(\Delta X); \qquad (3.9)$$

среднеквадратическое отклонение – числовая характеристика точности измерений, выражаемая в единицах погрешности

$$\sigma[\Delta X] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta X_i)^2}{n}}\ ; \qquad (3.10)$$

доверительный интервал – интервал, за границы которого погрешность не выйдет с некоторой вероятностью. Границы интервала при этом называют *доверительными значениями* погрешности, а вероятность, характеризующую доверительный интервал – *доверительной вероятностью*.

Доверительный интервал выбирают в зависимости от конкретных условий измерений. При нормальном законе распределения случайных погрешностей со среднеквадратическим отклонением $\sigma[\Delta X]$ часто пользуются доверительным интервалом от $+3 \cdot \sigma[\Delta X]$ до $-3 \cdot \sigma[\Delta X]$, для которого доверительная вероятность составляет 0,9973. Это означает, что в среднем из 370 случайных погрешностей только одна погрешность по абсолютному значению будет больше $3 \cdot \sigma[\Delta X]$. Поскольку на практике число отдельных измерений редко превышает несколько десятков, то можно утверждать, что все возможные случайные погрешности измерения, распределенные по закону Гаусса, практически не превышают по абсолютному значению $3 \cdot \sigma[\Delta X]$.

Последнее утверждение принято называть правилом *«трех сигм»*.

4. Выявление и оценка систематических погрешностей являются наиболее трудным моментом любого измерения и часто связаны с необходимостью проведения исследований.

Если причины возникновения систематической погрешности известны, то в первую очередь необходимо постараться исключить или уменьшить влияние этих потерь. При невозможности устранения источников погрешности необходимо на основании теоретического анализа или путем постановки специальных экспериментов получить количественные оценки систематических погрешностей. Например, путем предварительной поверки используемых средств измерений можно выявить систематическую погрешность этих средств при разных значениях измеряемой величины. Анализируя влияние внешних факторов, можно составить таблицы или графики зависимости систематической погрешности от внешних факторов, что позволит вводить поправки в получаемые результаты.

Общепринятыми методами обнаружения и исключения систематической погрешности являются следующие:

– устранение источников погрешности до начала измерений;

– использование дополнительных измерений;

– внесение поправок в результаты измерений;

– оценка границ систематических погрешностей в случае невозможности их исключения;

– использование специальных методов измерения.

Последние из перечисленных методов определяют одно из перспективных направлений измерительной техники.

Устранение источников систематических погрешностей до начала измерений является одним из наиболее радикальных путей, так как позволяет полностью или частично освободиться от необходимости применения других из названных выше способов, а также ускорить процесс измерения.

Под устранением источника погрешностей понимают удаление источников тепла, вибрации, электромагнитных полей и др. от средств измерений или защиту последних от указанных источников, если по условиям применения средств измерений они не могут быть удалены от источников погрешности.

Надежным средством обнаружения систематических погрешностей является использование дополнительных измерений, а именно:

– измерения, основанного на ином методе или принципе;

– измерения, выполняемого с помощью второго средства измерения, аналогичного основному или иного по принципу действия;

– измерения, выполненного с помощью более точного средства измерений.

Исключение систематической погрешности из результата измерений осуществляется путем применения *поправок* или *поправочных множителей*.

В первом, наиболее распространенном случае осуществляется алгебраическое сложение результата измерения и поправки. Под поправкой при этом понимают систематическую погрешность, взятую с обратным знаком.

Во втором случае результат измерения умножают на поправочный множитель, который может быть больше или меньше единицы. Поправочный множитель обычно применяется тогда, когда систематическая погрешность является мультипликативной.

В обоих случаях высокая точность результата достигается при условии, что поправка мала по сравнению с измеренным значением или поправочный множитель близок к единице. Само значение поправок и поправочных множителей находят указанными выше способами, а также путем поверки средств измерений. Поправки для учета влияния тех или иных влияющих величин, при известных функциях влияния, определяют на основе вспомогательных измерений этих величин.

В некоторых случаях исключить систематическую погрешность из результата измерения оказывается нецелесообразным из-за технической сложности. В этих случаях по известному значению систематической погрешности средства измерений оценивается погрешность выполненного измерения. Оценка границ систематической погрешности осуществляется обычно и при внесении поправок.

Систематическая погрешность, остающаяся после введения поправок, включает в себя ряд элементарных составляющих, называемых *неисключенными остатками* систематической погрешности. Они связаны в основном с погрешностью определения поправок и погрешностью, зависящей от точности измерения влияющих величин, входящих в функцию влияния.

Для определения границ неисключенной систематической погрешности результата измерения часто предполагается, что неисключенные остатки систематической погрешности являются случайными величинами, распределенными по равномерному закону. На этом основании границу неисключенной систематической погрешности определяют по формуле

$$\Theta = r\sqrt{\sum_{k=1}^{l} И_k^2} \qquad (3.11)$$

где Θ_k – граница k-й неисключенной систематической погрешности;

r – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, равный 1,1 при доверительной вероятности 0,95;

l – общее число неисключенных остатков систематических погрешностей.

При получении измерительной информации о технологических параметрах с помощью систем автоматического контроля, как правило, заранее предусматриваются мероприятия по устранению источников систематических погрешностей или защите от них средств измерений. Если имеются сомнения в показаниях каких-либо средств измерений, то применяют дополнительные измерения, осуществляемые с использованием иных методов, принципов и средств измерений, чем основные, а также с целью контроля выполняются параллельные измерения с помощью более точных средств измерений.

Существуют приемы, позволяющие исключить систематическую погрешность, не производя ее количественной оценки. Наиболее распространены следующие способы исключения из результата измерения постоянной систематической погрешности: *замещения, компенсации и противопоставления.*

Первый метод требует применения регулируемой меры, которую подключают вместо объекта измерения и изменением параметра добиваются точно

такого же результата, что и при объекте исследования. А за окончательный результат измерения принимают значение меры.

Метод компенсации требует измерения одной и той же величины два раза при изменении условий эксперимента второго измерения таким образом, чтобы систематическая погрешность проявлялась в нем с противоположным знаком. Например, для исключения погрешности, обусловленной влиянием постоянного внешнего магнитного поля, измерения проводят два раза при различных положениях прибора в горизонтальной плоскости (угол сдвига – 180°). А затем вычисляют среднее значение этих результатов $X=(X_1+X_2)/2$, которое не содержит систематической погрешности, так как оба результата измерения искажены одной и той же погрешностью (под влиянием внешнего магнитного поля), но с разными знаками.

Метод противопоставления также предполагает двукратное измерение одной и той же величины. Условия экспериментов должны различаться так, чтобы по известным закономерностям возникновения систематической погрешности ее можно было исключить. Например, результат измерения сопротивления с помощью одинарного моста $R_x=R_2 \cdot R_3/R_4$ может содержать систематическою погрешность из-за отличия сопротивлений R_3 и R_4 от их номинальных значений. Эту погрешность можно исключить, если при тех же резисторах R_3 и R_4 поменять местами плечи R_x и R_2 и снова уравновесить мост резистором R_2. При этом $R_x=R'_2 \cdot R_4/R_3$, где R'_2 – сопротивление R_2 при новом равновесии плеч. Исключив из полученных выражений отношение плеч R_3/R_4 и, следовательно, систематическую погрешность, обусловленную неточностью этого отношения, получим

$$R_x = \sqrt{R_2 \cdot R'_2}\,.$$

Получили распространение также и различные методы, базирующиеся на совместных или совокупных измерениях. Сущность таких методов применительно к уменьшению систематических погрешностей, состоит в том, что в процессе этих измерений изменяют параметр, отвечающий за возникновение систематической погрешности, или осуществляют измерение физической величины совместно и последовательно с несколькими вспомогательными мерами. В результате получают систему независимых уравнений, из решения которой определяют значения измеряемой физической величины уже с учетом систематической погрешности.

Одним из наиболее радикальных путей повышения точности измерений при прочих равных условиях является использование более точных средств измерений. Появление и развитие микроэлектронной и микропроцессорной техники, обеспечивающие возможность практически полной автоматизации самых сложных измерительных процессов, позволили использовать для увеличения точности средств измерений рассмотренные выше методы повышения точности измерений. Наряду с этими методами для повышения точности средств измерений применяется ряд традиционных методов.

Метод многократных наблюдений используется для уменьшения случайной составляющей погрешности средства измерений. Метод заключается в том, что

за некоторый постоянный интервал времени, отведенный для измерения, выполняют несколько наблюдений, а затем с помощью вычислительного устройства, входящего в состав данного средства измерений, вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины и оценку среднеквадратического отклонения результата измерения.

Метод многоканальных измерений аналогичен методу параллельных измерений. Средства измерений, с помощью которых реализуется данный метод, содержат несколько идентичных по характеристикам параллельных измерительных цепей (каналов) и вычислительное устройство. Последнее, получая измерительную информацию по этим каналам, вычисляет среднее арифметическое значение измеряемой величины и оценку среднеквадратического отклонения результата измерения. Такой метод позволяет уменьшить и случайную составляющую погрешности средства измерений.

Метод параметрической стабилизации, называемый еще конструктивно-технологическим, состоит в стабилизации статической характеристики средств измерений. Параметрическая стабилизация реализуется:

– путем изготовления средств измерений из точных и стабильных элементов, параметры которых мало подвержены внешним влияниям;

– за счет термостабилизации;

– стабилизацией параметров питания средств измерений;

– экранированием средств измерений от магнитных и электрических полей и т.п.

Данный метод является классическим в приборостроении.

Структурные методы основаны на включении в состав средств измерений дополнительных узлов, элементов и мер, обеспечивающих повышение точности этих средств измерений за счет информации, полученной с их помощью.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.65-92, 104-136.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.11-20.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.24-69.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.11-21.

Контрольные задания для СРд [1-4]

1. Способы уменьшения влияния случайной погрешности
2. Методы обнаружения и исключения систематической погрешности

Тема 4 Средства измерений

План лекции
1. Классификация средств измерений
2. Метрологические характеристики средств измерений
3. Нормирование метрологических характеристик
4. Показатели надежности средств измерений

1. *Средство измерений* – это техническое средство, предназначенное для выполнения измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики.

По метрологическому назначению средства измерений подразделяют на *эталоны, образцовые* и *рабочие*.

Эталоны – средства измерений (комплекс средств измерений), обеспечивающие воспроизведение и хранение единиц физических явлений.

Образцовые средства измерений предназначены для передачи размера единиц от эталонов к рабочим средствам измерений и поверки рабочих средств измерений. К образцовым средствам измерений относятся *образцовое вещество* и *стандартный образец*, которые принадлежат к мерам.

Рабочие средства предназначены для измерений, не связанных с передачей размера единиц физических величин. В этой группе выделяют более точные средства – *лабораторные* и менее точные – *технические.* Технические средства измерений служат для непосредственных практических измерений.

По функциональному назначению средства измерений принято делить на *меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и информационно-измерительные системы*.

Рассмотрим названные классы средств измерений подробнее.

Меры – это средства измерений, воспроизводящие определенное значение или ряд значений физической величины.

К мерам относят *эталоны*, рассмотренные выше, а также *образцовые* и *рабочие меры*. По точности воспроизведения физической величины образцовые меры бывают *1-го, 2-го* и *3-го разрядов* (наименьшая погрешность у 1-го разряда).

Меры различают также *однозначные* и *многозначные*. К первым относят измерительные катушки сопротивления, измерительные катушки индуктивности, измерительные конденсаторы, нормальные элементы (меры ЭДС и напряжения), стабилизированные источники напряжения и др. К многозначным мерам относят измерительные генераторы, калибраторы напряжения, тока и фазового сдвига, измерительные конденсаторы переменной емкости, вариометры (меры переменной индуктивности), магазины сопротивлений, емкости, индуктивности и др.

*Измерительные преобразовател*и – средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не всегда поддающейся восприятию наблюдателем. Измерительный преобразователь с высокой точностью реализует однозначную

функциональную зависимость между двумя физическими величинами $y = f(x)$, где $x = f(t)$ и $y = f(t)$ – сигналы на входе и выходе измерительного преобразователя.

По методу установки в измерительной цепи измерительные преобразователи делят на *первичные, нормирующие преобразователи* и *вторичные*.

Первичные измерительные преобразователи, размещаемые непосредственно на объекте исследования и удаленные от места обработки, отображения и регистрации измерительной информации, часто называют *датчиками* либо *чувствительными элементами*.

К первичным преобразователям также относят *отборные* и *приемные* устройства. Под *отборными* и *приемными* устройствами понимают устройства, встраиваемые в технологические аппараты и трубопроводы для отбора контролируемой среды и измерения ее параметров.

Основное назначение *нормирующего* преобразователя – преобразование выходного сигнала первичного измерительного преобразователя с естественным выходом сигнала в *унифицированный* электрический или пневматический сигнал для связи с устройствами регулирования, индикации, регистрации и с системами централизованного сбора данных. Примером нормирующего преобразователя может служить преобразователь сигнала постоянного тока в цифровой сигнал интерфейса *RS-485*.

В зависимости от рода измеряемой величины на входе преобразователя различают преобразователи *электрических* и *неэлектрических величин*. К первым относятся усилители напряжения, делители напряжения, электроизмерительные шунты и т.д. К преобразователям неэлектрических величин – терморезисторы, тензопреобразователи, тахогенераторы и др.

В зависимости от видов входного и выходного сигналов различают аналоговые, аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) измерительные преобразователи.

Следующий класс, *измерительные приборы* – средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

В зависимости от места применения и возможности его изменения измерительные приборы можно разделить на *стационарные* и *переносные*. По выполняемым функциям приборы делят на *показывающие*, *регистрирующие* и *контактные* (*контролирующие*). Последний класс приборов характеризуется изменяющимся состоянием выходной цепи при достижении измеряемой (контролируемой) величины определенного значения.

По принципу преобразования различают приборы *прямого преобразования* и приборы *уравновешивающего преобразования*. Приборы прямого преобразования осуществляют одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении. В приборах уравновешивающего преобразования наряду с цепью прямого преобразования имеется цепь обратного преобразования сигнала измерительной информации. Принципы преобразования измерительной информации наглядно объясняются с помощью структурных схем, применяемых в *Теории автоматического управ-*

ления.

Как видно из структурной схемы прибора (средства измерений) прямого преобразования (рис.4.1) входной сигнал X, поступая в первое звено $П_1$ (структурный элемент), претерпевает последовательно несколько преобразований и в конечном итоге на выходе преобразуется в X_n.

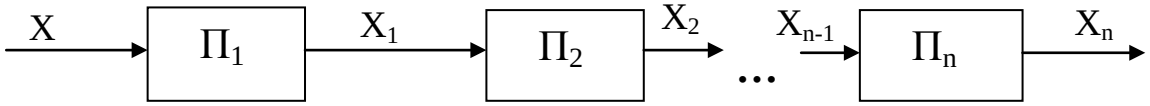


Рисунок 4.1

На рис.4.2. приведена структурная схема измерительного прибора уравновешивающего преобразования.

Сравнивая структурные схемы можно отметить, что последняя содержит кроме цепи прямого преобразования $X \rightarrow \Delta X \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow ... \rightarrow X_{n-1} \rightarrow X_n$ и цепь обратного преобразования (цепь отрицательной обратной связи) $X_n \rightarrow X'_1 \rightarrow X'_2 \rightarrow ... \rightarrow X'_{k-1} \rightarrow X'_k \rightarrow$ элемент сравнения ЭС, где сравниваются сигналы X и X'_k :

$$\Delta X = X - X'_k \qquad (4.1)$$

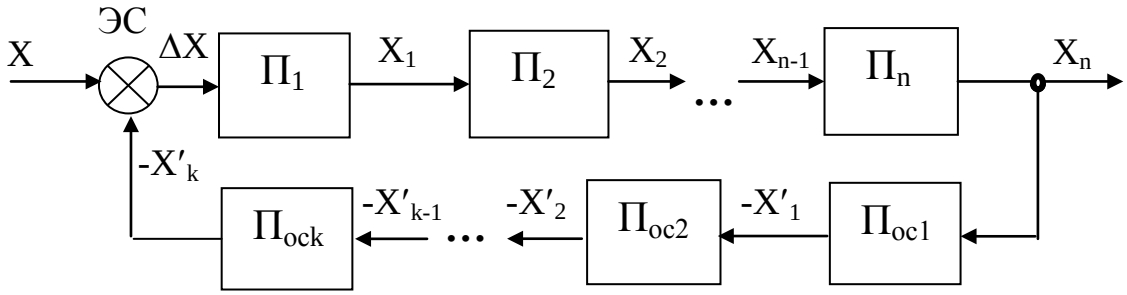


Рисунок 4.2

При подаче на вход сигнала X выходной сигнал X_n, а следовательно, и X'_k, будут возрастать до тех пор, пока X и X'_k не станут равны. При этом по значению X_n можно судить об измеряемой величине X.

В зависимости от применяемых узлов электроизмерительные аналоговые приборы прямого преобразования делят на *электромеханические* и *электронные*.

Кроме того, различают измерительные приборы, дающие показания *мгновенных значений* измеряемой величины, и приборы *интегрирующие*, показания которых определяются интегралом по времени или по другой независимой переменной.

Измерительные установки – класс средств измерений, которые представляют собой совокупность функционально и конструктивно объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенных для рациональной организации процесса измерений.

К ним относится, например, измерительная установка, применяющаяся в центрах стандартизации и метрологии для градуировки и поверки электроизмерительных приборов.

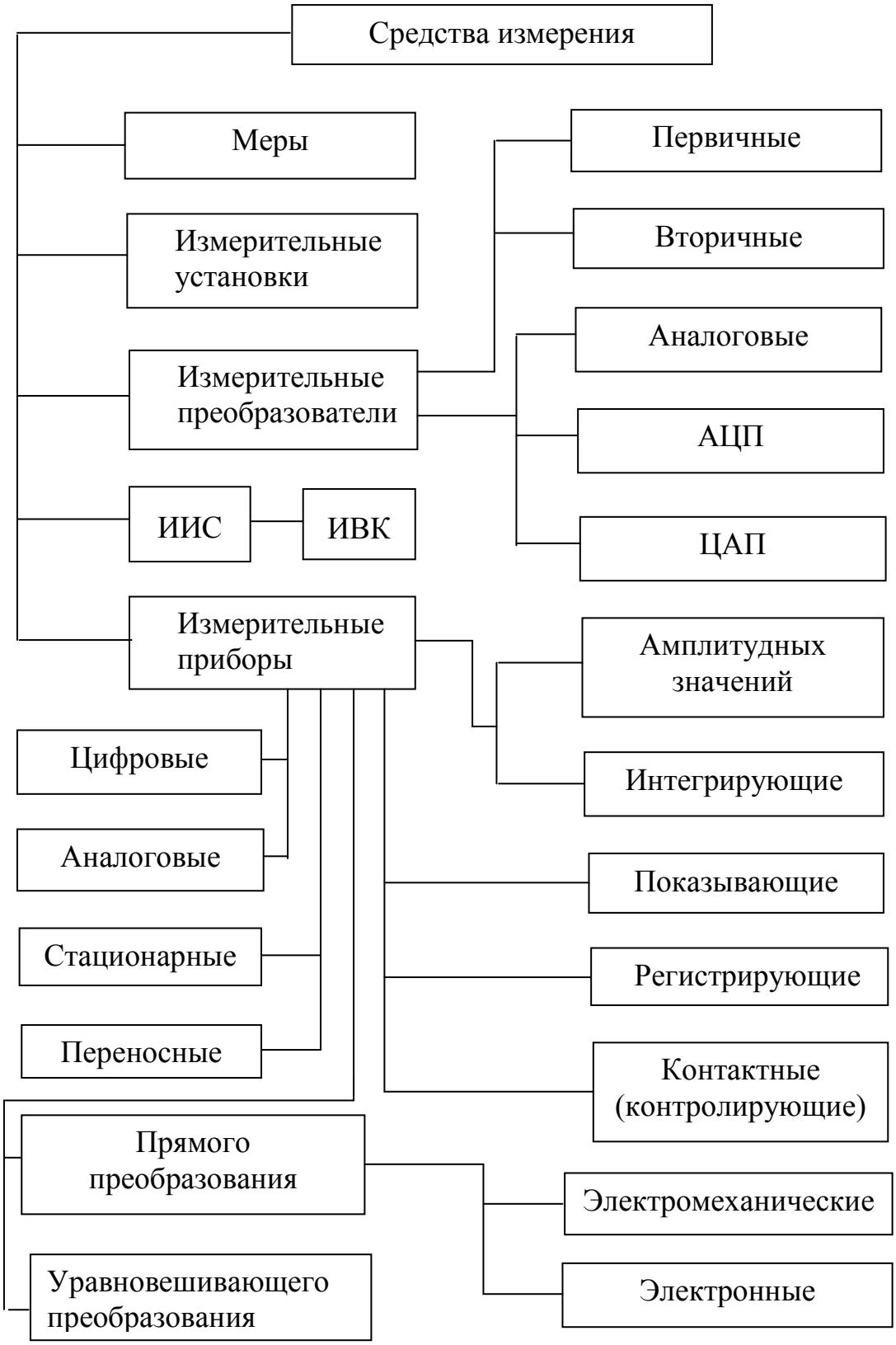


Рисунок 4.3 − Классификация средств измерений

И, наконец, *измерительная информационная система* (*ИИС*) –

совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования с целью представления в необходимом виде либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностирования, идентификации.

ИИС применяются в тех случаях, когда необходимо измерять большое количество физических величин, производить обработку измерительной информации, воздействовать на объект в ходе технологического процесса и т. п.

Частным случаем ИИС является *измерительно-вычислительный комплекс* (ИВК) – комплекс автоматизированных средств измерений и обработки измерительной информации. ИВС характеризуется наличием программируемой ЭВМ, которая используется для управления процессом измерения, обработки результатов измерения и, нередко, для управления регулирующим воздействием на объект измерения. В таких системах ЭВМ часто заменяется микропроцессорами или микроконтроллерами.

2. Свойства средств измерений оценивают характеристиками, среди которых выделяют комплекс метрологических, которые необходимы при оценке точности результатов измерений. Рассмотрим основные *метрологические характеристики*.

Функция преобразования – это статическая характеристика, которая представляет собой функциональную зависимость между информативными параметрами выходного и входного сигналов средства измерений. Как правило, функцию преобразования представляют в виде графика либо таблицы. Функция преобразования, устанавливаемая на данное средство в научно-технической документации, называется *номинальной*. Из-за несовершенства конструкции и технологии изготовления *реальная* функция преобразования измерительного устройства отличается от номинальной. Это отличие и определяет погрешность данного измерительного устройства. Отклонения реальной характеристики от номинальной различны и зависят от значения измеряемой величины. В нормальных условиях эксплуатации прибора реальная функция преобразования не должна выходить за пределы допустимых значений.

Вариация показаний прибора определяется как разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины. Она определяется при плавном подходе стрелки к проверяемой отметке шкалы от начальной и конечной отметок шкалы. Вариация показаний характеризует степень устойчивости показаний прибора в одних и тех же условиях измерения одной и той же величины.

Чувствительность средства измерений – это отношение приращения выходного сигнала ΔY средства измерений к вызывающему это приращение изменению входного сигнала ΔX. При линейной статической характеристике чувствительность постоянная, а приборы с постоянной чувствительностью имеют равномерную шкалу, т.е. длина делений шкалы одинакова.

Принято различать *абсолютную* и *относительную чувствительность*.

Абсолютная чувствительность

$$S_X = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX} \qquad (4.2)$$

Для линейной градуировочной характеристики $S_X = Y/X$.

Относительная чувствительность выражается в единицах входной величины:

$$S_{X0} = \frac{\Delta Y}{\Delta X / X}. \qquad (4.3)$$

Постоянная прибора – это характеристика прибора, часто указываемая в паспортах аналоговых измерительных приборов и обратная чувствительности:

$$C = 1/S \qquad (4.4)$$

Порог чувствительности – наименьшее значение изменения входной величины, обнаруживаемое с помощью данного средства измерений и выраженное в единицах входной величины. Современный уровень электроизмерительной техники позволяет получить для рабочих средств измерений порог чувствительности по напряжению 10^{-8} В и по току 10^{-16} А.

К важнейшим характеристикам средств измерений относятся также *абсолютная, относительная* и *приведенная относительная погрешности*, рассмотренные ранее. Погрешность определяют при поверке, при этом вместо *истинного значения* используют *действительное*, получаемое экспериментальным путём с помощью образцовых средств измерений.

Рабочая область частот – область значений частот переменного тока, в пределах которой нормируется дополнительная частотная погрешность средства измерений.

Диапазон измерений – это область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средств измерений. Диапазон измерений задается через начальное и конечное значения.

Для каждого средства измерений характерен свой *диапазон показаний* - диапазон значений измеряемой величины, который может быть индицирован данным средством измерений. Он не всегда соответствует диапазону измерений. Для аналоговых средств измерений со шкалами диапазон показаний соответствует диапазону шкалы. Для шкальных измерительных приборов важна характеристика, называемая *ценой деления шкалы* – разность значений величины, соответствующих двум соседним градуировочным отметкам шкалы. Она показывает, насколько изменится значение измеряемой величины при изменении показания на одно деление или применительно к цифровой шкале – на один шаг дискретности. Таким образом, измеренное значение определяют умножением цены деления на количество отсчитанных по шкале делений.

Для оценки влияния средства измерений на режим работы объекта исследования указывают *входное полное сопротивление* средства, значение которого пропорционально мощности, потребляемой от объекта исследования средством измерения. А для оценки допустимой нагрузки на средство измерений необходимо знать *выходное полное сопротивление* средства – чем меньше его значение, тем больше допустимая нагрузка.

В зависимости от полноты описания динамических свойств средств измерений различают *полные* и *частные динамические характеристики*, описывающие инерционные свойства средств измерений, т.е. зависимости выходного сигнала средства измерения от меняющихся во времени параметров входного сигнала, внешних влияющих величин или нагрузки. К полным динамическим характеристикам относят *переходную характеристику, импульсно-переходную (весовую) характеристику, амплитудно-фазовую характеристику, передаточную функцию* и т.д. К частным динамическим характеристикам – *коэффициент демпфирования (степень успокоения), время установления показаний прибора, время установления выходного сигнала* (для измерительных преобразователей) и др.

3. Для метрологических характеристик средств измерений принято их *нормирование* – установление номинальных значений и границ допускаемых отклонений реальных метрологических характеристик от их номинальных значений. Этим вопросам посвящен соответствующий государственный стандарт «Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений». Существует также ГОСТ «Классы точности средств измерений. Общие требования», определяющий нормирование пределов допускаемых погрешностей для большинства электрических средств измерений, используемых в статическом режиме.

Рассмотрим подробнее обобщенную метрологическую характеристику – *класс точности*. Это количественная оценка гарантированных границ погрешности средства измерений, указанная обычно в процентах при обеспечении нормальных условий эксплуатации данного средства измерений.

Класс точности определяется пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами, влияющими на точность, значения которой устанавливаются ГОСТом.

При этом пределы допускаемых погрешностей средства измерений выражаются в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей.

Абсолютная выражается $\Delta = \pm a$ либо

$$\Delta = \pm(a + bx), \qquad (4.4)$$

где a и b – некоторые положительные числа. Коэффициент **a** определяет постоянную составляющую погрешности и носит название *аддитивной*. Составляющая погрешности, линейно зависящая от значения измеряемой величины, определяется коэффициентом **b** и называется *мультипликативной*.

Относительная погрешность выражается $\delta = \Delta X / X$ либо

$$\delta = \pm[c + d(|X_K / X| - 1)], \qquad (4.5)$$

где X_K – конечное значение диапазона измерений;

c – коэффициент, численно равный относительной погрешности на верхнем пределе измерения;

d – коэффициент, численно равный погрешности на нижнем пределе измерения, выраженной в процентах от верхнего предела.

Первый способ выражения относительной погрешности применяется для

нормирования погрешности однозначных мер и масштабирующих преобразователей. В этом случае число, обозначающее класс точности и предел допускаемой основной погрешности в %-х совпадают. Это число заключают в кружок (рис.4.4).

Второй способ используется для некоторых цифровых приборов, в частности, для цифровых вольтметров. В этом случае указывают через дробь два коэффициента – c/d. Например:

$$0{,}05 / 4 \cdot 10^{-6} \text{ – для } \delta = \pm[0{,}05 + 4 \cdot 10^{-6}(|X_K / X| - 1)].$$

Приведенная погрешность $\gamma = \pm \Delta X / X_H$ выражается в %-х от нормирующего значения (обычно – X_K). Класс точности, присваиваемый по нормированной приведенной погрешности, выбирается из ряда чисел:

$1 \cdot 10^n$; $1{,}5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$,

где n=1; 0; –1; –2 и т.д.

Причем для одного и того же значения показателя разрешается устанавливать не более пяти классов точности.

На электроизмерительных приборах класс точности указывается обычно на шкале. Дополнительный символ (угол, окружность) обозначает нормирующее значение, от которого берется процент.



Рисунок 4.4 − Примеры обозначения класса точности

На рис.4.4 представлены варианты обозначения класса точности на шкале электроизмерительных приборов. Слева направо – значение основной погрешности относительно конечного значения диапазона измерений; значение основной погрешности в процентах от длины шкалы; значение основной погрешности в процентах от действительного значения.

Установлена международная градация классов точности, согласно которой значения классов точности для измерительных приборов составляют:

для образцовых –	0,05	0,1	0,2 (0,3)	0,5
для рабочих –	1	1,5	2,5 (4)	5

Пример 4.1 *Определить чувствительность по напряжению прибора магнитоэлектрической системы с током полного отклонения 3 мА с внутренним сопротивлением 10 Ом и шкалой на 150 делений. Каким сопротивлением должен обладать прибор, чтобы при той же чувствительности по току чувствительность по напряжению составила бы 2 дел/мВ?*

Ответ: Учитывая, что верхний предел прибора по напряжению

$$U = I \cdot r = 3 \cdot 10 = 30 \text{ мВ},$$

чувствительность по напряжению составляет

$$S_U = \alpha / U = 150 / 30 = 5 \text{ дел/мВ}.$$

При чувствительности 2 дел/мВ верхний предел по напряжению составит

$$U = \alpha / S_u = 150 / 2 = 75 \text{ мВ}.$$

В этом случае сопротивление прибора должно быть

$$r = U / I = 75 / 3 = 25 \text{ Ом}.$$

4. Кроме метрологических характеристик, при эксплуатации средств измерений важно знать и неметрологические: *электрическую прочность сопротивления изоляции, устойчивость к климатическим и механическим воздействиям, показатели надежности, время установления рабочего режима* и др.

Следует выделить из них ряд показателей, характеризующих *надежность* работы средства измерения. Изучению вопросов надежности технических средств, в том числе средств измерений, посвящена *Теория надежности.*

Рассмотрим некоторые из терминов *Теории надежности*.

Надежность средств измерений – это способность средств измерений сохранять заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. С понятием надежности тесно связаны понятия:

отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности средства измерений;

сбой – кратковременный самоустраняющийся отказ;

безотказность – свойство средства измерения непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного времени (наработки);

срок службы и *ресурс* – это, соответственно, календарная продол-жительность эксплуатации средства измерений и его наработка от начала до наступления такого предельного состояния, при котором эксплуатация средства должна быть прекращена;

наработка на отказ - отношение наработки (продолжительности работы) средства измерений к количеству отказов в течение этой наработки.

Для количественной характеристики свойств, определяющих надежность средств измерений, используют ряд показателей, в том числе:

интенсивность отказов $\lambda(t)$ – количество отказов в единицу времени, отнесенное к числу элементов, оставшихся исправными к началу рассматриваемого промежутка времени

$$\lambda(t) = \Delta N_{от} / N_u \cdot \Delta t; \qquad (4.6)$$

вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что данное средство измерения будет сохранять свои параметры в заданных пределах в течение определенного интервала времени при определенных условиях эксплуатации

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \qquad (4.7)$$

вероятность отказа $Q(t)$ – вероятность появления хотя бы одного отказа средства измерения в заданном интервале времени

$$Q(t) = 1 - P(t); \qquad (4.8)$$

средняя наработка на отказ – отношение наработки восстанавливаемого

средства измерения к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Надежность средств измерений закладывается в процессе разработки и обеспечивается в процессе его изготовления путем правильного выбора технологии изготовления, контроля качества материалов и комплектующих элементов, контроля режимов и условий изготовления. Надежность сохраняется применением правильных способов хранения средств измерений и поддержанием правильной их эксплуатации, плановым профилактическим обслуживанием, периодическим контролем параметров и ремонтом.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.38-49, 92-101.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.25-32.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.26-45.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.26-33.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Класс точности средств измерений
2. Условные графические обозначения, применяемые для средств измерений

Тема 5 Измерительные сигналы

План лекции

1. Основные понятия и определения
2. Квантование и дискретизация измерительных сигналов
3. Виды измерительных сигналов

1. Взаимодействие объекта исследования и средств измерений в процессе эксперимента предполагает наличие сигналов, которые являются носителями информации. Сигнал как материальный носитель информации представляет собой некоторый физический процесс, один из параметров которого функционально связан с измеряемой величиной. Такой параметр называют *информативным*. Остальные параметры сигнала являются неинформативными. В электрических средствах измерений наиболее часто применяют электрические сигналы, информативными параметрами которых могут быть *мгновенные значения постоянного тока и напряжения, амплитудные, средневыпрямленные* или *действующие значения переменных 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. 5.1 приведена структурная схема прибора, предназначенного для измерения температуры. На выходе термопары *ТП* возникает сигнал измерительной информации – термоЭДС e, которая зависит от измеряемой температуры t (°С). Этот сигнал преобразуется модулятором *М* в прямоугольные импульсы напряжения $U_{\text{М}}$, амплитуда которых пропорциональна термоЭДС. Переменная составляющая сигнала $U_{\text{М}}$ усиливается усилителем $У_{\sim}$ переменного тока и преобразуется в однополярные импульсы $U_{\text{В}}$ выпрямителем *В*. Выходной сигнал выпрямителя подается на милливольтметр *mV*, вызывая отклонение его указателя на некоторый угол α. В данной схеме сигналы e, $U_{\text{М}}$, $U_{\sim}$, $U_{\text{В}}$, α – это сигналы измерительной информации.

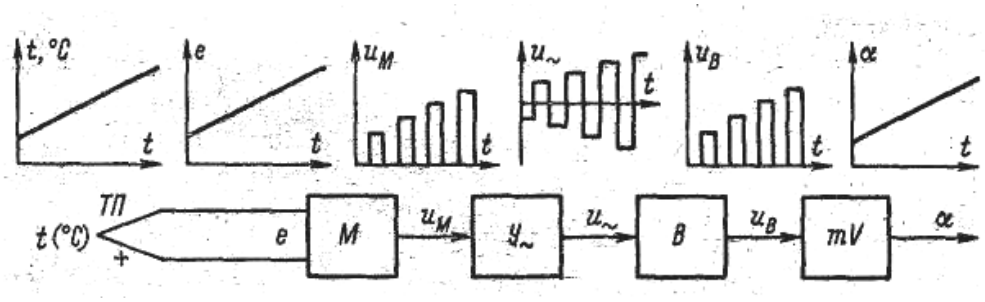


Рисунок 5.1 – Преобразование сигналов измерительной информации

Измеряемая величина (в рассматриваемом примере – температура) является входным сигналом для первичного измерительного преобразователя. Если сформулировать строже, то измеряемая величина является информативным параметром входного сигнала. Так, например, при измерении действующего напряжения силовой сети переменного тока входным сигналом является синусоидальное напряжение, а измеряемой величиной – действующее значение этого сигнала, являющееся в данном случае его информативным параметром.

Необходимым условием различных преобразований сигналов является реализация определенной (чаще линейной) функциональной зависимости между информативными параметрами сигналов y и измеряемой величиной x. Практически 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 др.

Важным классификационным признаком сигналов является характер их изменения во времени и по информативному параметру. По этому признаку различают непрерывные (или аналоговые) и дискретные сигналы. Часто изменение сигнала по информативному параметру называют *изменением по уровню*. Дискретные по уровню сигналы называют также *квантованными сигналами*.

2. В *цифровых измерительных приборах* (*ЦИП*) в соответствии с размером

измеряемой величины образуется цифровой *код*, а затем в соответствии с кодом значение измеряемой величины представляется на дисплее (табло) в цифровой форме.

Цифровой прибор включает в себя обязательные функциональные узлы: *аналого-цифровой преобразователь* (*АЦП*) и *цифровое отсчетное устройство* (*ЦОУ*). АЦП выдает код в соответствии со значением измеряемой величины, а ЦОУ отражает это значение в цифровой форме. Кроме АЦП, к цифровым преобразователям относят ЦАП, предназначенные для преобразования цифрового кода в аналоговую квантованную величину. В настоящее время промышленность выпускает большой ассортимент АЦП и ЦАП в виде интегральных микросхем. В дальнейшем будем оперировать термином *цифровое измерительное устройство* (*ЦИУ*), под которым понимается любое из указанных выше средств измерений.

Для получения кода непрерывная измеряемая величина в ЦИУ *дискретизируется во времени* и *квантуется по уровню*.

Дискретизацией непрерывной во времени величины $X(t)$ называют ее преобразование в прерывную во времени величину, значения которой отличны от нуля и совпадают с соответствующими значениями $X(t)$ только в определенные моменты времени. Промежуток между двумя соседними моментами времени дискретизации называют *шагом дискретизации*, который может быть постоянным или переменным.

Квантованием по уровню непрерывной по уровню величины $X(t)$ называют операцию ее преобразования в квантованную величину $X_К(t)$. Фиксированные значения квантованной величины называют *уровнем квантования*, а разность между двумя ближайшими уровнями – *ступенью* или *шагом квантования*.

Код в ЦИУ вырабатывается в соответствии с квантованной величиной, принимаемой равной измеряемой величине. При преобразовании измеряемой величины в квантованную важное значение имеют правила установления равенства (способ отождествления) измеряемой и квантованной величины. Отождествление может производиться с ближайшим большим или равным, ближайшим меньшим или равным, а также с ближайшим уровнем квантования.

Число возможных уровней квантования определяется устройством ЦИУ. От числа уровней квантования зависит емкость (число возможных отсчетов) отсчетного устройства. Например, если у ЦИП отсчетное устройство имеет максимальное показание 999, то такой прибор бесконечное множество значений измеряемой величины от 0 до 999 отражает всего тысячью различными показаниями, иначе говоря в этом приборе измеряемая величина преобразуется в квантованную, имеющую 1000 уровней квантования.

В результате квантования измеряемой величины по уровню (рис.5.2) возникает *погрешность дискретности* (*квантования по уровню*), обусловленная тем, что бесконечное множество значений измеряемой величины отражается лишь ограниченным числом кодовых комбинаций ЦИУ.

В большинстве случаев измерений наблюдается разность между значениями кодовых комбинаций ЦИУ (показаниями прибора) и размерами измеряемой величины в моменты измерений. Эта разность – абсолютная погрешность.

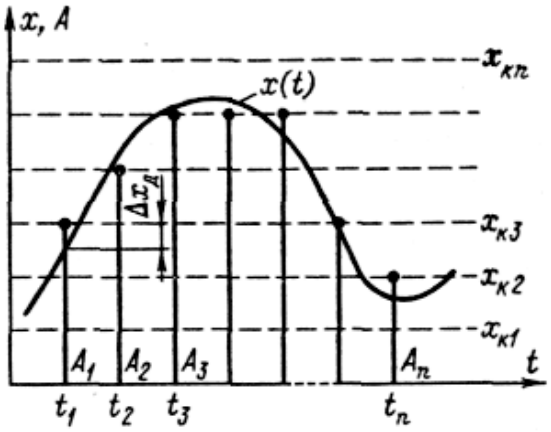


Рисунок 5.2

При идеальном преобразовании измеряемой непрерывной величины в квантованную и в код полученная погрешность равна *погрешности дискретности*. Эта погрешность незначительно препятствует увеличению точности ЦИУ, поскольку соответствующим выбором числа уровней квантования можно добиться достаточно малой погрешности дискретности.

3. Рассмотрим основные виды сигналов, используемые в средствах измерений.

1. *Непрерывные* (*аналоговые*) *по информативному параметру и времени* сигналы определены в любой момент времени существования сигнала и могут принимать любые значения в диапазоне его изменения. В качестве таких сигналов получили широкое 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. На рис. 5.3, б изображен непрерывный сигнал y (ток I или напряжение U), связанный линейной зависимостью $y=kx$ с измеряемой величиной x, здесь 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.

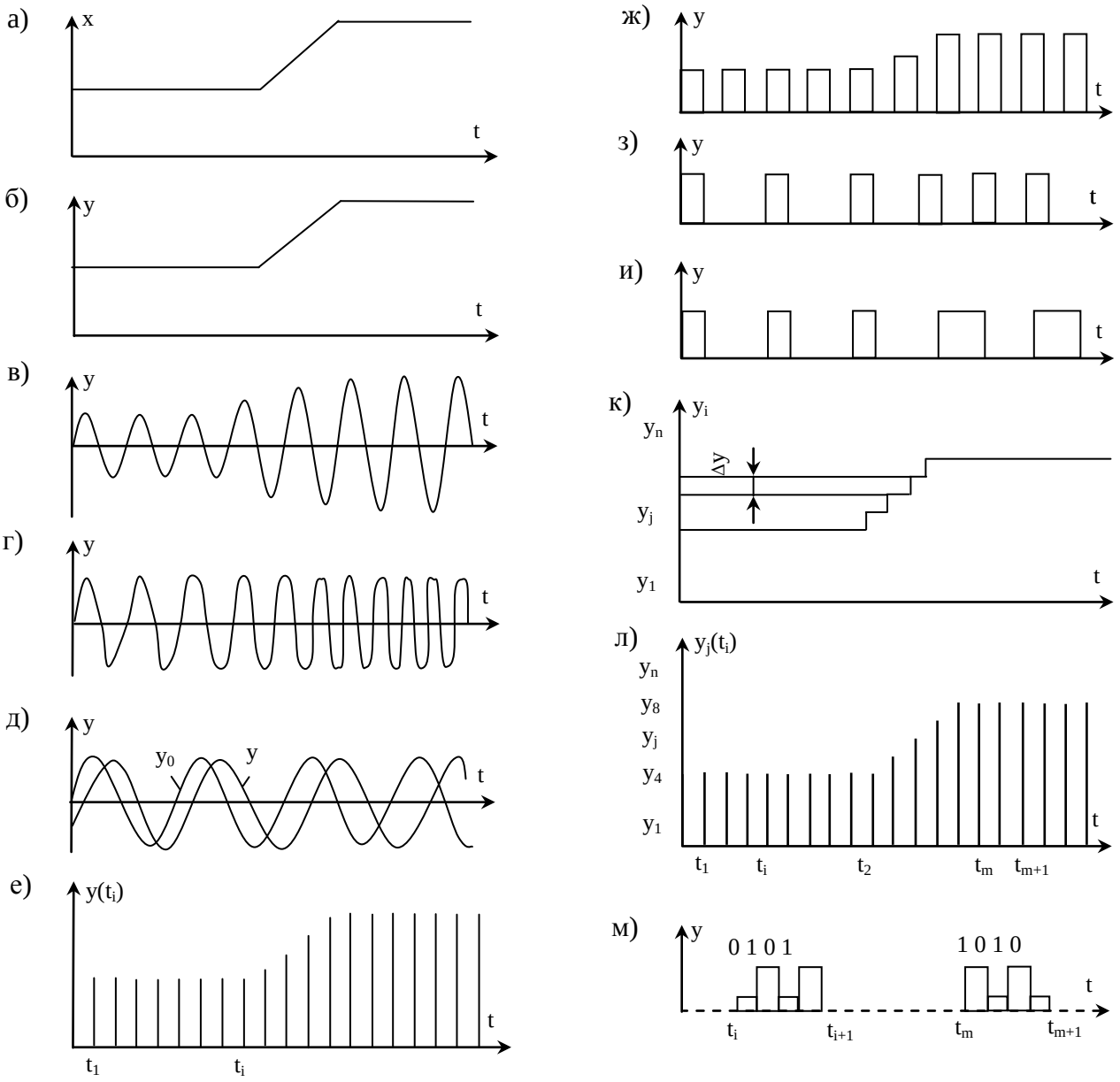


Рисунок 5.3 – Виды измерительных сигналов

Если с изменением x в гармоническом сигнале меняется один из параметров Y_M, ω или φ, то говорят, что осуществляется соответственно амплитудная – АМ (рис.5.3, а, б), частотная – ЧМ (рис.5.3, а, г) или фазовая – ФМ (рис.5.3, а, д) модуляция. При фазовой модуляции фаза сигнала определяется относительно второго (опорного) гармонического сигнала y_0.

2. *Непрерывные по информативному параметру и дискретные по времени* сигналы определены на некотором конечном или счетном множестве моментов времени t_i (или на множестве интервалов времени $\Delta t_i = \tau$.Модель таких сигналов показана на рис.5.3, е, где $y(t_i)$ – последовательность значений непрерывного сигнала $y(t)=kx(t)$ (рис.5.3, б), определенных в моменты времени t_i. В реальных средствах измерений подобным сигналом является периодическая последовательность импульсов постоянного тока (рис.5.3, ж), у которых, в отличие от абстрактной модели, информативными параметрами

могут быть не только амплитуда Y_M, но и частота f или длительность τ этих импульсов. При этом в зависимости от того, какой из этих параметров функционально связан с x, имеет место соответственно амплитудно-импульсная – АИМ (рис.5.3, а, ж), частотно-импульсная – ЧИМ {рис.5.3, а, з) или широтно-импульсная – ШИМ (рис.5.3, а, и) модуляция сигнала.

3. *Сигналы, непрерывные во времени и квантованные (дискретные) по информативному параметру* – в таких сигналах (рис.5.3, б, к) информативный параметр может принимать только некоторые разрешенные уровни y_1, отстоящие друг от друга на конечные интервалы (кванты) Δy. Примером такого сигнала может служить сигнал на выходе цифро-аналогового преобразователя.

4. *Сигналы, дискретные по времени и квантованные по информативному параметру*. Моделью такого сигнала (рис.5.3, л) является дискретная последовательность $y_i(t_i)$ значений непрерывного сигнала $y(t)=kx(t)$ (рис.5.3, б), 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_i устанавливается в соответствие определенный код – комбинация условных сигналов, в частности импульсов постоянного тока высокого уровня, обозначаемых 1, и импульсов низкого уровня, обозначаемых 0. На рис.5.3, м показаны две кодовые комбинации – 0101 и 1010, соответствующие уровням y_4 и y_8 в моменты времени t_1 и t_m.

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

В задачах преобразования сигналов измерительной информации часто возникает необходимость *представления непрерывных сигналов дискретными* и *восстановления сигнала по его дискретным значениям*. При этом непрерывный сигнал $y(t)$ представляется совокупностью дискретных значений $y(t_1)$, $y(t_2)$, …, $y(t_i)$ (рис.5.4, а, б), по которым с помощью некоторого способа восстановления может быть получена оценка $y^*(t)$ исходного непрерывного сигнала $y(t)$.

Восстановление кривой сигнала по дискретным отсчетам осуществляется различными базисными функциями. В качестве таких функций широко применяют различные полиномы, в частности полиномы Лагранжа. Так, на рис. 5.4 показаны исходный сигнал $y(t)$ и восстановленный по дискретным отсчетам сигнал $y^*(t)$, полученный при использовании полиномов Лагранжа нулевой и первой степени. Такое восстановление сигналов называют также *нулевой экстраполяцией* и *линейной интерполяцией*.

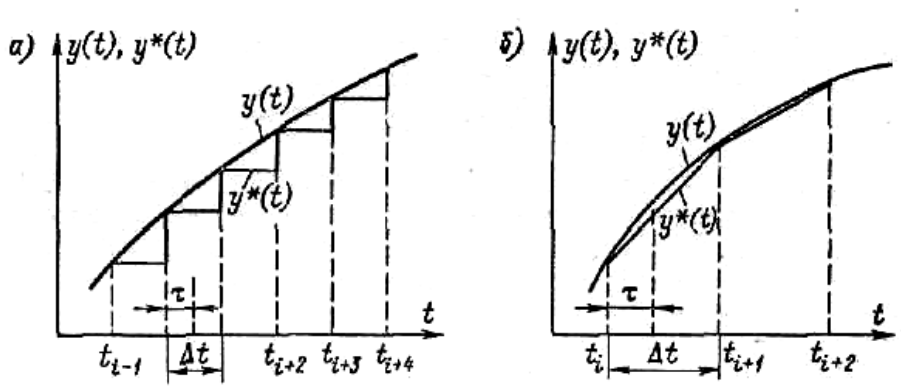


Рисунок 5.4 – Исходная кривая $y(t)$ сигнала и восстановленная (аппроксимирующая) кривая $y^*(t)$ полиномами Лагранжа нулевой (а) и первой (б) степени

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.137-154.
2. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.13-21, 134-138.

Контрольные задания для СРД [1-2]

1. Виды измерительных сигналов средств измерений
2. Восстановление сигнала по его дискретным значениям. Теорема Котельникова

Тема 6 Измерение электрических величин

План лекции

1. Измерение напряжения и силы тока
2. Масштабирующие измерительные преобразователи
3. Измерение электрической мощности

1. В цепях постоянного тока обеспечивается наиболее высокая точность измерений, в цепях переменного тока она понижается с повышением частоты; здесь, кроме оценки среднеквадратического, средневыпрямленного и максимального значений, часто требуется наблюдение формы исследуемого сигнала и знание мгновенных значений тока и напряжения.

Измерители тока и напряжения независимо от их назначения должны при включении не нарушать режима работы цепи измеряемого объекта; обеспечивать малую погрешность измерений, исключив при этом влияние внешних факторов на работу прибора, высокую чувствительность измерения, быструю готовность к работе и высокую надежность.

Выбор приборов, выполняющих измерение тока и напряжения, определяется совокупностью многих факторов, важнейшие из которых: род измеряемого тока; диапазон частот измеряемой величины и амплитудный

диапазон; форма кривой измеряемого напряжения (тока); мощность цепи, в которой осуществляется измерение; мощность потребления прибора; возможная погрешность измерения (ниже будут указаны требования к конкретным приборам).

Измерение напряжения выполняют методами непосредственной оценки и сравнения.

Если необходимая точность измерения, допустимая мощность потребления и другие требования могут быть обеспечены амперметрами и вольтметрами электромеханической группы, то следует предпочесть этот простой метод непосредственного отсчета. В маломощных цепях постоянного и переменного токов для измерения напряжения обычно пользуются электронными цифровыми и аналоговыми вольтметрами. Если необходимо измерить напряжение с более высокой точностью, следует использовать приборы, действие которых основано на методах сравнения.

Измерение тока возможно прямое (методом непосредственной оценки аналоговыми и цифровыми амперметрами) и косвенное. При этом напряжение измеряется на резисторе с известным сопротивлением. Для исследования формы и определения мгновенных значений напряжения и тока применяют осциллографы.

Измерение постоянного напряжения

Метод непосредственной оценки. При использовании данного метода вольтметр подключают параллельно тому участку цепи, на котором необходимо измерить напряжение. При измерении напряжения на нагрузке R в цепи с источником энергии, ЭДС которого E и внутреннее сопротивление R_0, вольтметр включают параллельно нагрузке.

Для уменьшения погрешности измерения напряжения мощность потребления вольтметра должна быть мала, а его внутреннее сопротивление велико.

Напряжение в цепях постоянного тока можно измерить любым измерителем напряжения, работающим на постоянном токе (аналоговыми магнитоэлектрическим, электродинамическим, электромагнитным, электростатическим и цифровым электронным вольтметрами). Выбор измерителя напряжения обусловлен мощностью объекта измерения и необходимой точностью. Диапазон измеряемых напряжений лежит в пределах от микровольт до десятка киловольт. Если объект измерения обладает большой мощностью, используют электромеханические вольтметры, мощность, потребляемую измерительными приборами, не учитывают; если же объект измерения маломощный, то мощность, потребляемую измерительными приборами, нужно учитывать либо использовать электронные вольтметры.

Методы сравнения. Нулевой метод заключается в уравновешивании, достигаемом при подключении к прибору сравнения либо двух электрически не связанных между собой, но противоположных по знаку напряжений или ЭДС, либо двух раздельно регулируемых токов. Разница, полученная в результате такого воздействия, доводится до нуля. Нулевой метод реализуется в схемах компенсации напряжений или ЭДС (рисунок 6.1, а) и токов (рисунок 6.1, б).

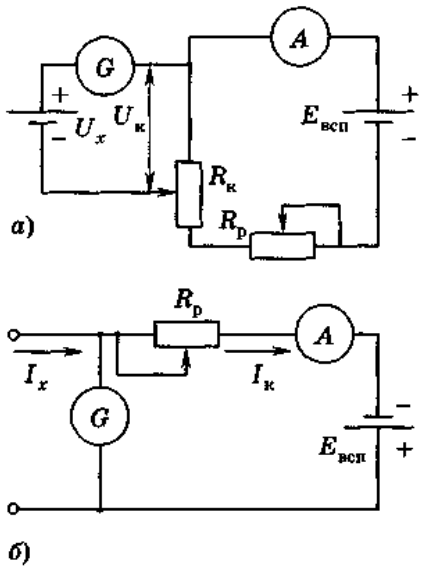


Рисунок 6.1 – Схемы компенсации напряжений (а) и токов (б)

Наибольшее распространение получила схема, показанная на рис. 6.1, а. В ней измеряемое напряжение U_x компенсируется равным, но противоположным по знаку известным напряжением U_K. Падение напряжения U_K создается током на регулируемом компенсирующем сопротивлении R_K. Изменение R_K происходит до тех пор, пока U_K не окажется равным U_x. Момент компенсации определяют по отсутствию тока в цепи магнитоэлектрического гальванометра G; при этом мощность от объекта измерения не потребляется.

Устройства, служащие для выполнения измерений компенсационным методом, называют *потенциометрами* или *компенсаторами*.

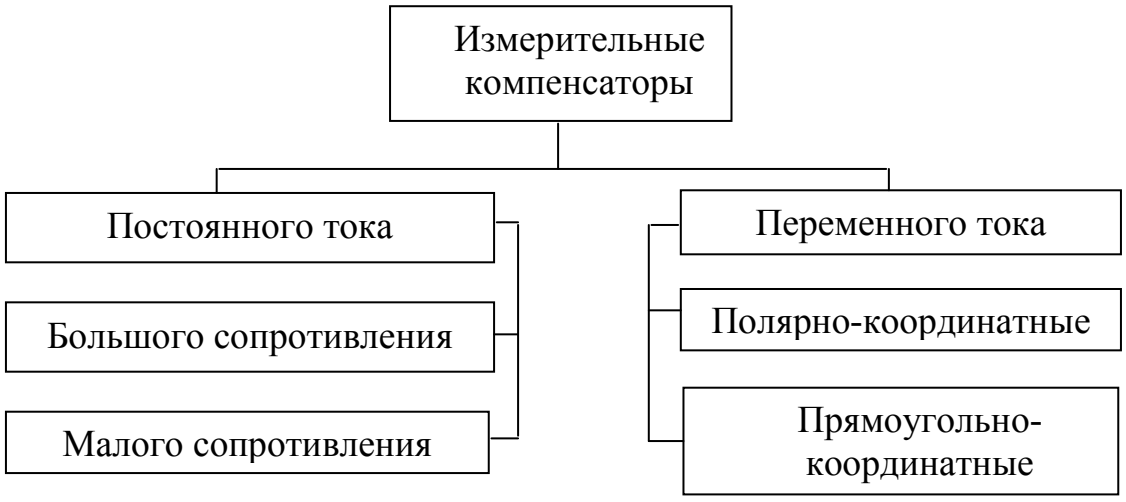


Рисунок 6.2 – Классификация измерительных компенсаторов

В практических схемах компенсаторов для обеспечения необходимой точности измерения ток в рабочей цепи определяют не амперметром непосредственной оценки, а компенсационным методом с помощью эталона ЭДС – *нормального элемента*. Нормальные элементы обеспечивают постоянную во времени ЭДС, равную 1,01865 В при 20 °С, внутреннем сопротивлении 500-1000 Ом, токе перегрузки 1 мкА.

С повышением температуры окружающей среды значение ЭДС уменьшается:

$$E_t = E_{20} - 0{,}00004(t - 20) - 0{,}000001(t-20)^2,$$

где E_t - ЭДС при t °С;

E_{20} - ЭДС при 20 °С.

Использование качественных нормальных элементов и измерительных сопротивлений, а также отсутствие потребления мощности от исследуемого объекта позволяют создавать на основе компенсаторов одни из наиболее высокоточных электроизмерительных приборов и устройств.

Измерительные *компенсаторы постоянного тока* обычно подразделяют на *компенсаторы большого и малого сопротивления*.

Компенсаторы большого сопротивления предназначены для измерения ЭДС с верхним пределом 1,2…2,5 В. Сопротивление рабочей цепи в них достигает 10 кОм на 1 В напряжения питания. Соответственно компенсаторы малого сопротивления используются для измерения малых ЭДС (например, ЭДС термопар). Рабочий ток этих компенсаторов выбирают в пределах от 1 до 25 мА.

Высокую точность компенсаторов постоянного тока характеризует основная допускаемая погрешность *прибора типа Р332* $\Delta U = \pm(5U_X + 0{,}01)\cdot 10^{-6}$ В. Верхний же предел измерений этого прибора составляет 2,1211111 В.

Как и в случае с мостовыми схемами компенсаторы различных схемо-технических решений называют по имени изобретателя (первого исследователя). Например, из компенсаторов постоянного тока наиболее известны *компенсатор Линдека-Роте* (основан на измерении тока) и *компенсатор Поггендорфа* (основан на потенциометрическом принципе), принципиальные схемы которых приведены соответственно на рис. 6.3 и 6.4.

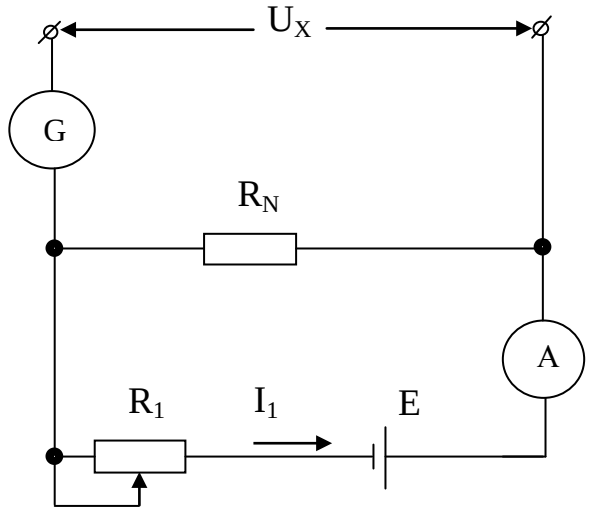


Рисунок 6.3 – Схема компенсатора Линдека-Роте

На схеме компенсатора Линдека-Роте (рис. 6.3):

U_X – измеряемое напряжение;

R_N – образцовое сопротивление;

R_1 – регулировочное сопротивление.

Нулевое показание гальванометра, который используется в качестве нуль-индикатора, свидетельствует о достижении компенсации. При этом $U_X=I_1 \cdot R_N$. Поскольку $R_N=const$, то значение I_1 является мерой искомого напряжения (ЭДС): $U_X \sim I_1$.

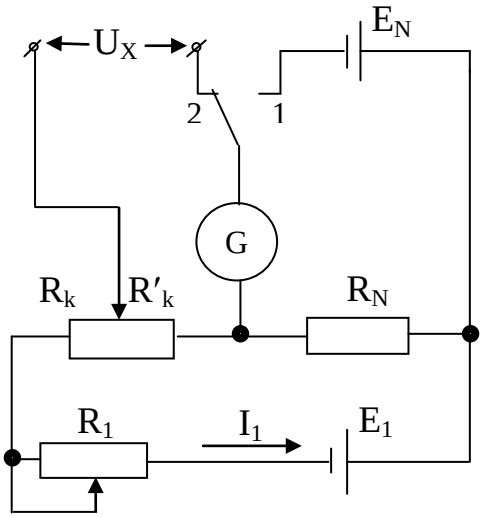


Рисунок 6.4 – Схема компенсатора Поггендорфа

Для компенсатора Поггендорфа (рис. 6.4) существует определенная методика измерения U_X: сначала устанавливается значение рабочего тока I_1 (переключатель – в положении 1) и переменным резистором R_1 изменяют ток до полного его отсутствия в гальванометре G, что возможно при

$$E_N = I_1 \cdot R_N.$$

Затем в режиме измерения переключатель переводится в положение 2, движок реостата R_k перемещают до отсутствия тока в G. Если R'_k обеспечивает нулевое показание гальванометра, то

$$U_x=I_1 \cdot R'_k=R'_k \cdot E_N/R_N$$

В зависимости от значения сопротивления рабочей цепи различают компенсаторы постоянного тока большого сопротивления (высокоомные 10-40 кОм, ток рабочей цепи 10^{-3}-10^{-4}А, порядок измеряемого напряжения 1-2,5 В, погрешность измерения 0,02% измеряемой величины) и малого сопротивления (низкоомные 10-1000 Ом; ток рабочей цепи 10^{-1}-10^{-3}А, порядок измеряемого напряжения до 100 мВ, погрешность измерения 0,5% измеряемого значения).

Высокоомные компенсаторы используют для поверки магнитоэлектрических, электродинамических вольтметров. Для расширения пределов измерения напряжения в компенсаторах применяют высокоомные резисторные делители напряжения, позволяющие уменьшать измеряемое напряжение в п раз (10, 100, 1000) до значения, близкого к верхнему пределу измерения компенсатора. При использовании делителя напряжения от объекта измерения потребляется некоторая мощность, т. е. теряется одно из основных преимуществ компенсационного метода.

При измерении ЭДС источников с большим внутренним сопротивлением или напряжений, действующих в высокоомных цепях, входное сопротивление магнитоэлектрических и электронных вольтметров может быть недостаточно большим, поэтому целесообразно использовать дифференциальный или компенсационный метод.

Дифференциальный метод основан на измерении разности между измеряемым и известным напряжениями при их неполной компенсации. Схема измерения представлена на рис. 6.5. Высокоомный электронный вольтметр V_1 с чувствительным пределом служит для измерения разностного напряжения между измеряемым U_x и известным U_K напряжениями. Магнитоэлектрический аналоговый или цифровой вольтметр V_2 используется для измерения напряжения U_K. Рекомендуется при $U_K = 0$ измерить вольтметром V_1 ориентировочное значение U_x, а уж затем установить по вольтметру V_2 удобное для отсчета напряжение U_K. Измеряемое напряжение U_x при указанной полярности включения вольтметра V_x определяется как $U_x = U_K + AU$.

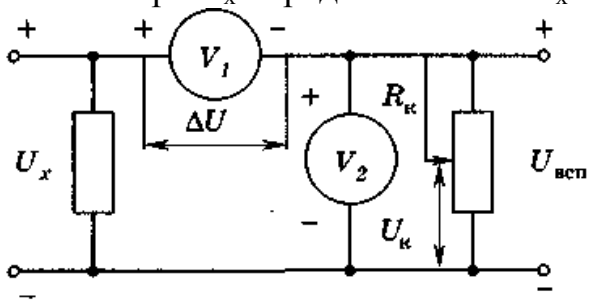


Рисунок 6.5 – Дифференциальный метод измерения напряжения

Дифференциальный метод обеспечивает высокую точность измерения напряжения. Погрешность измерения определяется в основном погрешностью вольтметра, измеряющего U_K.

Для измерения малых постоянных напряжений (порядка 10^{-8} В) используют гальванометрические компенсаторы. Гальванометрический компенсатор имеет высокую чувствительность при высоком входном сопротивлении.

Прямое измерение постоянного тока. Амперметр включается последовательно в разрыв исследуемой цепи.

Последовательное включение амперметра с внутренним сопротивлением R_A в цепь с источником ЭДС E и сопротивлением R (сопротивление нагрузки и источника) приводит к возрастанию общего сопротивления и уменьшению протекающего в цепи тока. Погрешность измерения тем меньше, чем меньше мощность потребления амперметра P_A по сравнению с мощностью потребления цепи P, в которой осуществляется измерение. Поэтому амперметр, включаемый последовательно в цепь измерения, должен обладать малым сопротивлением, т. е. $R_A – 0$.

Диапазон значений постоянных токов, с измерением которых приходится встречаться в различных областях техники, чрезвычайно велик (от токов 1×10^{-17} А до десятков и сотен тысяч ампер). Поэтому методы и средства измерения их различны.

Измерение постоянного тока можно выполнить любым измерителем постоянного тока: аналоговым магнитоэлектрическим, электродинамическим, аналоговым и цифровым электронным амперметром. При необходимости измерения весьма малых токов, значительно меньших тока полного отклонения $/_{и}$ магнитоэлектрического измерителя, последний применяют совместно с усилителем постоянного тока. Усиления тока можно добиться при включении биполярных транзисторов по схеме с общим эмиттером, которая обеспечивает малое входное сопротивление усилителя.

Токи 10^{-9}–10^{-6}А можно измерить непосредственно с помощью высокочувствительных магнитоэлектрических зеркальных гальванометров и гальванометрических компенсаторов.

Косвенное измерение тока. Кроме прямого измерения токов амперметрами возможно косвенное измерение токов с помощью резисторов с известным сопротивлением R_0, включаемых в разрыв цепи, и высокочувствительных измерителей напряжения. Измеряемый ток $I_x = U_0/R_0$, где U_0 - падение напряжения на резисторе R_0, измеренное вольтметром либо компенсатором постоянного тока.

Для получения минимальных погрешностей измерения тока сопротивление резистора R_0 должно быть много меньше сопротивления цепи, в которой измеряется ток. Косвенный способ реализован в электронных аналоговых и цифровых измерителях тока.

Измерение переменного напряжения

Измерение напряжения и тока на промышленной частоте можно выполнить любыми вольтметрами и амперметрами, работающими на частоте 50 Гц. Когда объект измерения мощный, то измерения выполняют электромагнитными и электродинамическими вольтметрами и амперметрами.

Для измерения напряжения на промышленной частоте применяют также *компенсаторы переменного тока,* позволяющтие измерять переменное напряжение (ЭДС) с достаточно высокой точностью как с учетом фазы, так и без него.

Если фазовое положение не имеет значения, то измерение осуществляют после соответствующего преобразования *компенсатором Румпфа* (с помощью термопреобразователей) и *полярно-координатным компенсатором*. Последний содержит фазорегулятор и делитель напряжения, с помощью которых регулируется компенсирующее напряжение по фазе и модулю.

Измерение с учетом фазы предполагает, что в каждый момент времени напряжение компенсации должно быть равно по значению и противоположно по знаку неизвестному U_X , иначе говоря, должны быть одинаковыми амплитуда и частота, а сдвиг по фазе составлять 180°. Такой компенсатор принято называть *компенсатором Ларсена* или *прямоугольно-координатным*. В этих приборах компенсирующее напряжение представляет собой композицию двух компонент, отличающихся друг от друга по фазе на 90°.

При помощи компенсаторов можно измерять не только ЭДС (напряжение), но и косвенно ток, сопротивление, магнитный поток и другие величины.

Компенсаторы переменного тока менее точны по сравнению с компенсаторами постоянного тока, так как отсутствует эталон ЭДС переменного тока.

Измерение напряжения и тока на повышенной и высокой частоте осуществляется вольтметрами (выпрямительными, термоэлектрическими, электростатическими, электронными), работающими в указанном диапазоне частот, а также электронно-лучевыми осциллографами. Осциллографы – приборы, чувствительные к напряжению, поэтому все измерения, выполняемые ими, сводятся к измерению отклонения электронного луча под действием приложенного напряжения. Для конкретного исследования сигнала необходимо правильно выбрать тип осциллографа, выполнив условия согласования, подключить последний к объекту измерения, заземлить, а затем определить вид синхронизации, ее амплитуду, режим развертки, длительность, коэффициенты отклонения. От правильного учета возможных искажений и погрешностей зависит точность полученных результатов измерения.

*Измерение тока в цепях повышенной и высокой частот*ы. С увеличением частоты точность измерения переменного тока электромагнитными и электродинамическими амперметрами падает. Приборы специального исполнения имеют расширенный диапазон частот (примерно до 8-10 кГц) и используются для измерения токов в мощных цепях.

В маломощных цепях повышенной и высокой частоты ток измеряют выпрямительными, термоэлектрическими, электронными цифровыми амперметрами, аналоговыми и цифровыми электронными вольтметрами на резисторе с известным сопротивлением. Амперметр должен обладать минимальными значениями входных величин – сопротивления, индуктивности и емкости. С увеличением частоты в цепи измерения тока влияние паразитных емкостей возрастает, поэтому для уменьшения погрешностей от токов утечки амперметр следует включать на участке с потенциалами, наиболее близкими к потенциалу земли. Это особенно важно при измерениях на высокой частоте.

В цепях высокой частоты токи преимущественно измеряют термоэлектрическим амперметром (термоамперметром), представляющим собой сочетание термопреобразователя и магнитоэлектрического измерительного механизма. Термопреобразователь состоит из одной или нескольких термопар и нагревателя. При протекании тока по нагревателю, выполненному из материала с большим удельным сопротивлением (нихрома, константана и др.), выделяется теплота, под действием которой нагревается горячий спай термопары, а на ее холодных концах возникает термо-ЭДС - E_T, зависящая от материала проводников термопары и пропорциональная разности температур горячего и холодного ее концов. Значение $E_т$ может составлять около 30-40 мкВ на 1 °С перегрева.

Такой прибор позволяет проводить измерения в цепях как постоянного, так и переменного токов. Шкала прибора градуируется в среднеквад-ратических значениях тока.

Для увеличения чувствительности и более эффективного использования преобразователи соединяют в мостовую схему.

В зависимости от типа преобразователя эти приборы используют для измерения как постоянного, так и переменного токов в диапазоне частот 50 Гц-200 МГц. Но основное назначение термоамперметров – измерение тока в цепях высокой частоты. На высоких частотах проявляются паразитные параметры термопреобразователя и поверхностный эффект в нагревателе. Поэтому каждый прибор рассчитывают на работу до определенной частоты измеряемого тока. При измерениях несинусоидального тока показания термоамперметра будут приближенно соответствовать среднеквадратическому значению тока.

Термоэлектрические амперметры выпускают для измерения токов от 100 мкА до десятков ампер.

Для измерения малых токов до 1 А применяют вакуумные термопреобразователи. Их помещают в специальные стеклянные баллоны, из которых выкачан воздух; при этом благодаря уменьшению потерь на излучение теплоты в окружающую среду чувствительность вакуумных преобразователей повышается. Вакуумные термопреобразователи бывают контактные и бесконтактные.

Для измерения токов 1-50 А используют воздушные термопреобразователи.

К достоинствам термоамперметров относят то, что их показания не зависят от частоты и формы переменного тока, к недостаткам – малую перегрузочную способность (допускаются перегрузки не более чем на 50 %), значительную мощность потребления (на 5 А примерно 1 Вт), ограниченный срок службы, невысокую точность (с изменением температуры изменяется сопротивление нагревателя, с увеличением частоты – паразитные параметры). Классы точности термоэлектрических амперметров – 1,5; 2,5; 4. В термоэлектрических амперметрах, предназначенных для больших токов, в результате выделения значительного количества теплоты подводящие колодки сильно разогреваются. Чтобы устранить влияние перегрева, применяют кроме основной еще и компенсационную термопару, горячий спай которой укреплен на одной из колодок, а термо-ЭДС направлена навстречу термо-ЭДС основной термопары. Термоамперметры различают щитовые и переносные.

Для усиления постоянного тока термопары в термоамперметрах применяют фотоусилители. Термоамперметры с фотоусилителем многопредельны, имеют повышенную способность к перегрузкам, высокую чувствительность и частотный диапазон до 1 МГц

2. Измерительные преобразователи, предназначенные для изменения измеряемой величины в заданное число раз, принято называть *масштабирующими*. К ним относят *электроизмерительные шунты, делители напряжения, усилители напряжения и тока, измерительные трансформаторы тока и напряжения* и др. Рассмотрим подробнее наиболее распространенные из перечисленных преобразователей.

Для измерения больших токов применяют *электроизмерительные шунты*, которые являются по сути преобразователями тока в напряжение. Таким образом, шунты обеспечивают расширение пределов измерения электроизмерительных приборов по току.

Шунт представляет собой четырехзажимный резистор с нормированными показателями погрешности и номинальными значениями входного тока выходного напряжения.

Сопротивление шунта (рис. 6.6) можно представить выражением

$$R_{Ш} = R/(N-1), \quad (6.1)$$

где R – сопротивление средства измерения;

$n = I_1 / I_2$ – коэффициент шунтирования.

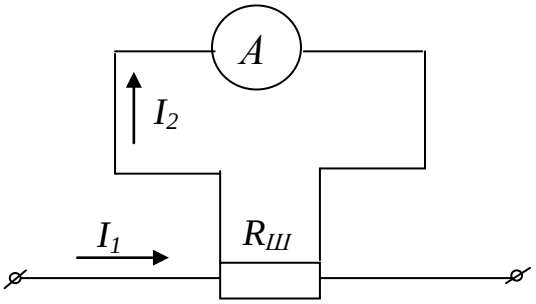


Рисунок 6.6 − Схема включения измерительного шунта

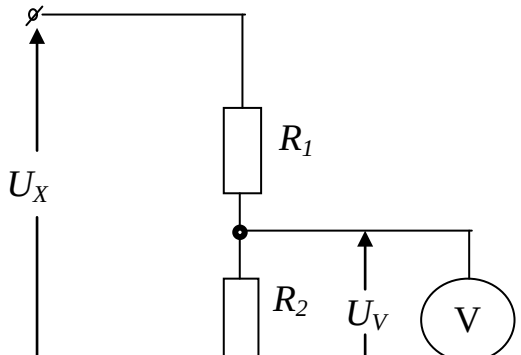
Шунты, как правило, изготовляют из манганина (для слаботочных цепей используют константановую проволоку). В амперметрах до 30 А шунты обычно встраивают в корпус прибора, для измерения больших токов (до 7500 А) применяют наружные шунты. Классы точности шунтов – в диапазоне от 0,02 до 0,5.

Шунты применяются в цепях постоянного тока в основном с магнитоэлектрическими приборами. С приборами других типов они не используются из-за малой чувствительности приборов, что приводит к существенному увеличению размеров шпунтов и потребляемой ими мощности. А на переменном токе возникает дополнительная погрешность от изменения частоты, что объясняется неодинаковым изменением значений сопротивлений шунта и измерительного механизма при изменении частоты напряжения.

Делители напряжения применяются для уменьшения напряжения в определенное число раз. Являются преобразователями напряжения в напряжение (рис.6.7) с номинальным коэффициентом преобразования меньше единицы.

$$k_Д = U_V / U_X = R_2 / (R_1 + R_2) \quad (6.2)$$

Поскольку нагрузка – сопротивление вольтметра, подключенного к делителю напряжения, изменяет коэффициент деления $k_Д$, то необходимо выбирать приборы с достаточно высоким входным сопротивлением. В зависимости от рода напряжения делители напряжения могут быть выполнены на элементах, имеющих активное, емкостное или индуктивное сопротивление.



Серийно изготавливаемые делители напряжения обычно выполняют из манганина. Такие преобразователи, например, предназначенные для расширения пределов измерения компенсаторов постоянного тока, имеют класс точности от 0,0005 до 0,01.

Для увеличения верхнего предела измерения вольтметра наиболее часто применяют *добавочные резисторы*, включаемые последовательно с измерительным прибором (рис. 6.8).

Сопротивления добавочного резистора определяются выражением:

$$R_Д = R_V \cdot (U_X / U_V - 1) \qquad (6.3)$$

где U_X - измеряемое напряжение;

U_V - падение напряжения на приборе;

R_V - внутреннее сопротивление прибора.

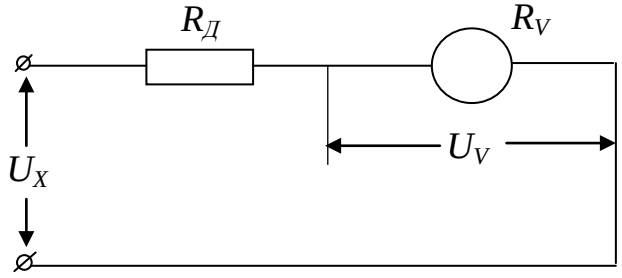


Рисунок 6.8− Схема включения добавочного резистора

Добавочные резисторы используются в цепях как постоянного, так и переменного тока (до 20 кГц). Как и шунты, они бывают встраиваемые в корпус прибора и наружные.

Серийно выпускаются калиброванные добавочные резисторы. Они применяются с любым прибором, имеющим указанный номинальный ток. Класс точности таких преобразователей – от 0,01 до 1. Добавочные резисторы применяют для преобразования напряжения до 30 кВ.

Измерительные усилители применяются для усиления амплитуды слабых сигналов в измерительных цепях передачи, обработки и индикации. Важнейшими параметрами усилителей являются *коэффициент усиления*, *отношение сигнал/шум*, *частотные характеристики*, *коэффициент гармоник*.

Усилители классифицируют по типу усиливаемого сигнала (усилители постоянного напряжения, усилители переменного напряжения), по частоте (усилители НЧ, усилители ВЧ), по ширине полосы пропускания

(широкополосный усилитель, селективный или узкополосный усилитель), по типу основной усиливаемой величины (напряжения, тока, мощности) и т.д. Широко распространенным типом усилителя (обычно в интегральном исполнении) является *операционный усилитель*.

К измерительным усилителям предъявляются следующие требования:

– малый отбор мощности от измеряемой цепи (высокое входное сопротивление);

– достаточная выходная мощность;

– малые отклонения частотной характеристики;

– малый дрейф;

– высокая помехоустойчивость.

Принципиальной особенностью измерительных усилителей является то, что они выполняются с нормированной погрешностью коэффициента передачи.

Измерительные трансформаторы переменного тока применяются для преобразования больших переменных токов и напряжений в определенное число раз с сохранением их фазы и, таким образом, для расширения пределов измерения приборов и гальванического разделения частей измерительной цепи.

Измерительные трансформаторы состоят из двух изолированных друг от друга обмоток: первичной с числом витков w_1 и вторичной – w_2 , помещенных на ферромагнитный сердечник (рис. 6.9). В *трансформаторах тока*, как правило, первичный ток больше вторичного, поэтому у них $w_1 < w_2$. В трансформаторах тока с I_{1H} свыше 500 А первичная обмотка может состоять из одного витка в виде шины, проходящей через окно сердечника.

В *трансформаторах напряжения* первичное напряжение U_1 больше вторичного U_2 , поэтому у них $w_1 < w_2$. Вторичное номинальное напряжение у стандартных трансформаторов составляет 100 или $100/\sqrt{3}$ В при разных значениях первичного номинального напряжения.

Измерительный трансформатор тока является преобразователем тока в ток, первичную обмотку его включают в измеряемую цепь последовательно.

Измерительные трансформаторы тока принято характеризовать номинальным коэффициентом трансформации:

$$k_{1H} = I_{1H} / I_{2H} \qquad (6.4)$$

Номинальные коэффициенты трансформации указываются на щитках трансформаторов в виде отношений токов.

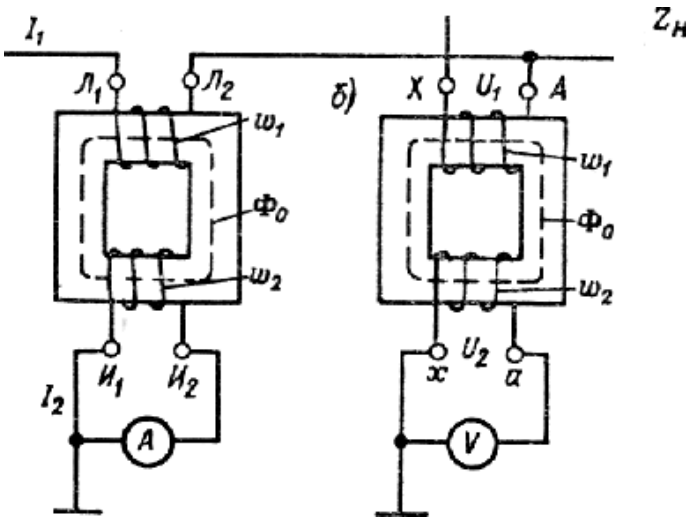


Рисунок 6.9 − Схема включения измерительных трансформаторов

Трансформатор тока работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания, так как в его вторичную обмотку включаются приборы с малым сопротивлением. Соответственно, режим холостого хода для трансформаторов тока недопустим.

Определение измеряемой величины по номинальному коэффициенту трансформации приводит к погрешностям. Относительная погрешность вследствие неравенства действительного и номинального коэффициентов трансформации носит название *токовой*:

$$f_I = \frac{100\cdot(I_1' - I_1)}{I_1} = \frac{100\cdot(k_{1H} - k_I)}{k_I},\ \% \qquad (6.5)$$

где $I'_1 = k_{IH} \cdot I_2$;

$I_1 = k_1 \cdot I_2$.

Для переносных многопредельных измерительных трансформаторов тока установлены классы точности от 0,01 до 0,2. Изготовляют их на частоту от 25 Гц до 10 кГц. Для промышленной частоты 50 Гц переносные трансформаторы тока выполняют на номинальный вторичный ток 1 и 2 А. Стационарные трансформаторы тока для частоты 50 Гц изготавливают на номинальные первичные токи от 1 до 40 кА и номинальные вторичные токи 1; 2; 2,5; 5 А. Классы точности таких преобразователей – от 0,2 до 10.

Измерительные трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к режиму холостого хода. Для них характерна *погрешность напряжения:*

$$f_U = \frac{100\cdot(U_1' - U_1)}{U_1} = \frac{100\cdot(k_{Uн} - k_U)}{k_U},\ \% \qquad (6.6)$$

где $U'_1 = k_{UH} \cdot U_2$;

$U_1 = k_1 \cdot U_2$.

Отметим, что во вторичную цепь нужно включать такое количество приборов, чтобы потребляемая мощность не превышала номинальной мощности трансформатора.

Стационарные трансформаторы напряжения изготавливают на номинальные

первичные напряжения от 220 В до 35 кВ при вторичном – 150, 100 и $100\sqrt{3}$ В для номинальной нагрузки от 5 до 25 В·А с $\cos\varphi$ = 0,8…1,0.

Кроме того, у измерительных трансформаторов имеется *угловая погрешность*, которая образуется из-за неточной передачи фазы первичной величины вторичной величине. Угловая погрешность оказывает влияние на показания приборов, отклонение подвижной части которых зависит от фазового сдвига между токами в цепях этих приборов (например, ваттметров).

Пример 6.1 *Предел измерения милливольтметра составляет 15 мВ, а сопротивление рамки измерительного механизма 125 Ом. Определить сопротивление шунта для предела измерения 0,15 мА.*

Ответ: сопротивление электроизмерительного шунта составит

$$R_ш = \frac{r_{вн}}{\frac{I_1 \cdot r_{вн}}{U_{пр}} - 1} = \frac{125}{\frac{0{,}15 \cdot 125}{15} - 1} = 500 \ Ом.$$

Пример 6.2 *Для электромагнитного вольтметра с током полного отклонения 3 мА и внутренним сопротивлением 30 кОм определить верхний предел измерений и сопротивление добавочного резистора, необходимого для расширения верхнего предела до 600 В.*

Ответ: предел измерения вольтметра составляет

$$U = I_0 \cdot r_{вн} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^3 = 90 \ В.$$

Тогда сопротивление добавочного резистора получим

$$r_Д = \frac{U'}{I_0} - r_{вн} = \frac{600}{3 \cdot 10^{-3}} - 30 \cdot 10^3 = 170 \cdot 10^3 \ Ом.$$

3. Измерение мощности осуществляется в цепях постоянного и переменного токов низкой, высокой частоты, а также в импульсных цепях различной измерительной, электротехнической, радиоприемной и передающей аппаратуры. Диапазон измеряемых мощностей лежит в пределах 10^{-16}-10^{9} Вт.

Методы измерения существенно отличаются друг от друга в зависимости от параметров цепи, в которой производится измерение мощности, предела изменения мощности и частотного диапазона.

В цепях постоянного тока мощность потребления нагрузки определяется произведением тока в нагрузке и падения напряжения на ней: $P = UI = I^2 R$.

В цепях переменного тока мгновенное значение мощности потребления $p(t) = u(t)i(t)$.

Если u(t) и i(t) – периодические функции времени с периодом T, то среднее значение мощности потребления за период называют *мощностью,* или *активной мощностью* P. Мощность P с мгновенным значением мощности p(t) связана выражением

$$P = \frac{1}{t}\int_0^T p(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^T uidt . \qquad (6.7)$$

В цепях однофазного синусоидального тока $u(t) = U\sqrt{2}\sin\omega t$ $i(t) = I\sqrt{2}\sin(\omega t \pm \varphi)$ измеряют *активную* P, *реактивную* Q и *полную* S мощности:

$P = UI\cos\varphi = I^2R$; $Q = UI\sin\varphi = I^2X$; $S = UI = I^2Z$,

где U, I – среднеквадратические значения напряжения и тока в цепи;

φ – сдвиг по фазе между напряжением и током в нагрузке;

R, X, Z – активное, реактивное, полное сопротивления нагрузки.

В цепях несинусоидального периодического тока при условии, что функции u(t) и i(t) можно разложить в ряд Фурье, формулы для определения активной и реактивной мощностей будут иметь вид

$$P = U_0I_0 + \sum_{k=1}^{n} U_kI_k\cos\varphi_k; \quad Q = \sum_{k=1}^{n} U_kI_k\sin\varphi_k ,$$

где U_0, I_0 – постоянные составляющие напряжения и тока;

U_k, I_k – соответственно среднеквадратические значения напряжения и тока k-й гармоники;

φ_k – сдвиг по фазе k-й гармоники.

В цепях, питаемых напряжением в виде периодической последовательности однополярных прямоугольных импульсов, усреднение мощности p(t) осуществляют не только по периоду следования T, но и по длительности импульса $t_И$. При этом мощность, усредненную по периоду T следования импульсов, называют средней мощностью, или мощностью:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^{t_И} p(t)dt ,$$

а мощность, усредненную за время длительности импульса – импульсной мощностью:

$$P_И = \frac{1}{t_И}\int_0^{t_И} p(t)dt .$$

Значения мощностей P и $P_И$ связаны между собой соотношением

$$P_И = \frac{1}{t_И}\int_0^{t_И} p(t)dt = \frac{T}{t_И}\frac{1}{T}\int_0^{t_И} p(t)dt = \frac{T}{t_И}P$$

Обычно среднюю мощность измеряют и, зная скважность импульсов, вычисляют импульсную мощность. При импульсах, отличных от прямоугольной формы, мощность определяют по эквивалентному прямоугольному импульсу той же амплитуды, длительность которого равна интервалу времени между точками огибающей импульса на уровне 0,5 ее амплитуды.

Мощность измеряется в абсолютных единицах – ваттах, производных ватта и относительных единицах – децибелваттах (или децибелмилливаттах)

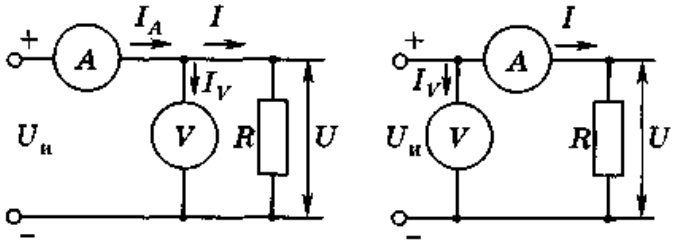
$$\pm\alpha = 10 \lg (P/P_0),$$

где P – абсолютное значение мощности в ваттах (или милливаттах),

P_0 – нулевой (отсчетный) уровень мощности, равный 1 Вт (или 1 мВт), связанный с абсолютными нулевыми уровнями напряжения U_0 и тока I_0 через стандартное сопротивление R_0 соотношением $P_0 = U_0^2 / R_0 = I_0^2 R_0$.

При P_0 = 1 мВт и сопротивлении R_0 = 600 Ом напряжение составит U_0 = 0,775 В.

Мощность в цепях постоянного тока можно определить косвенным путем по показаниям вольтметра и амперметра (рис. 6.9). При таком измерении мощности возникает значительная погрешность измерения, так как погрешности приборов суммируются и, кроме того, возникает погрешность за счет собственной мощности потребления этими приборами.



а) б)

Рисунок 6.9 – Схемы измерения мощности по показаниям вольтметра и амперметра при малых (а) и больших (б) сопротивлениях нагрузки

Мощность потребления нагрузки P = UI.

Мощность, вычисленная по показаниям приборов согласно рис. 6.9, а,

$P_x = U_V I_A = U(I_V + I) = UI_V + UI = P_V + P$,

больше действительного значения мощности потребления нагрузки на значение мощности P_V потребления вольтметра (I_V - ток в цепи вольтметра). Погрешность определения мощности в нагрузке тем меньше, чем больше входное сопротивление вольтметра.

Мощность, вычисленная по показаниям приборов в соответствии с рисунком 6.9, б,

$P_x = U_V I_A = (U_A + U)I = U_A I + UI = P_A + P$,

больше действительного значения мощности потребления нагрузки на значение мощности P_A потребления амперметра (U_A - падение напряжения на амперметре). Погрешность определения мощности в нагрузке тем меньше, чем меньше входное сопротивление амперметра. Поэтому схему, изображенную на рис. 6.9, а, применяют для измерения мощности при малых сопротивлениях нагрузки, а схему, изображенную на рис. 6.9, б, – при больших сопротивлениях.

Для измерения мощности в цепях постоянного и переменного токов применяют электродинамические ваттметры.

Для измерения мощности в цепи однофазного синусоидального тока неподвижную катушку ваттметра включают последовательно с нагрузкой,

мощность которой необходимо измерить, а подвижную катушку – параллельно к нагрузке (рисунок 6.10, а).

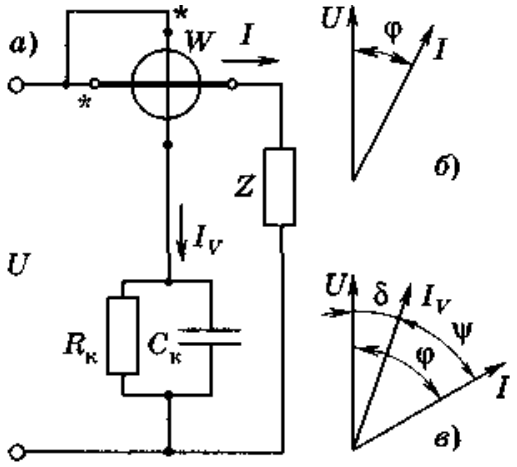


Рисунок 6.10 – Схемы включения электродинамического ваттметра (а) и векторные диаграммы (б, в), поясняющие его работу

В соответствии со схемой включения ток в цепи неподвижной катушки равен току нагрузки $I_1 = I$, а в цепи подвижной катушки (приближенно считая ее сопротивление активным R_{WV}): $I_2 = I_V = U/R_{WV}$. Тогда угол сдвига фаз ψ между $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ равен углу сдвига фаз ψ между $\dot{U}$ и $\dot{I}$, т. е. ψ=φ (рис 6.10, б).

Выражение

$$\alpha = kP = kUI\cos\varphi$$

справедливо для ваттметров переменного и постоянного токов (cos φ = 1).

В реальных условиях подвижная катушка ваттметра обладает небольшой индуктивностью: L_{WV} = 3...10 мГн.

Полное сопротивление обмотки катушки

$$z = \sqrt{(R_{WV} + R_{доб})^2 + (\omega L_{WV})^2},$$

где $R_{доб}$ – добавочное сопротивление, поэтому ток в цепи катушки I_2 отстает от напряжения U на некоторый уголδ = arctg $\omega L_{WV}/(R_{WV} + R_{доб})$. Векторная диаграмма электродинамического ваттметра будет иметь вид, изображенный на рис. 6.10, в. Из диаграммы следует, что ψ = φ-δ. В этом случае угол отклонения подвижной части

$$\alpha = \frac{1}{WZ}\frac{\partial M}{\partial \alpha}UI\cos(\varphi - \delta).$$

Из данного выражения следует, что при одном и том же значении измеряемой мощности, но при различных значениях показания прибора различны. Значения z и δ являются функциями частоты, однако при частоте до 100 Гц погрешность, обусловленная этой зависимостью, незначительна, так как $\omega L_{WV} << R_{доб}$, и ею можно пренебречь. При этом следует учитывать только погрешность, определяемую углом δ, называемую угловой погрешностью измерения мощности:

$$\delta_р = \frac{P_х - P}{P} = \frac{UI\cos(\varphi - \delta) - UI\cos\varphi}{UI\cos\varphi} \qquad (6.8)$$

где P_x – измеренное значение мощности;

P – действительное значение мощности.

Ввиду малости углаδ приближенно можно считать, что $\cos\varphi \cos\delta \approx \cos\varphi$. Тогда после преобразования (6.8) получаем

$$\delta_p = \operatorname{tg}\varphi \sin\delta \qquad (6.9)$$

Из (6.9) следует, что угловая погрешность измерения мощности возрастает с увеличением угла φ.

Для уменьшения угловой погрешности в цепь подвижной катушки включают компенсационную емкость $C_к$ (рис. 6.10, а). При этом компенсация осуществляется в довольно широком диапазоне частот, пока справедливо неравенство $(\omega C_к R_к)^2 << 1$.

В ваттметре при изменении направления тока в одной из катушек изменяется знак угла отклонения подвижной части, поэтому зажимы обмоток прибора, закорачивание которых приводит к правильному отклонению стрелки, называют генераторными и обозначают звездочками. Обычно в цепь подвижной катушки ваттметра вводят переключатель направления тока, позволяющий менять направление вращающего момента и получать отклонение стрелки в правильную сторону.

Включение неподвижной катушки ваттметра последовательно с нагрузкой (рис. 6.10, а) возможно только при токах нагрузки 10-20 А (при больших токах нагрузки неподвижную катушку ваттметра включают через трансформатор тока). При измерении мощности в цепях высокого напряжения (свыше 600 В) подвижную катушку ваттметра включают не непосредственно в измеряемую цепь, а через трансформатор напряжения, а неподвижную катушку ваттметра – через измерительный трансформатор тока (независимо от значения тока нагрузки).

Включение ваттметра через измерительные трансформаторы тока ТрТ и напряжения ТрТ показано на рис. 6.11.

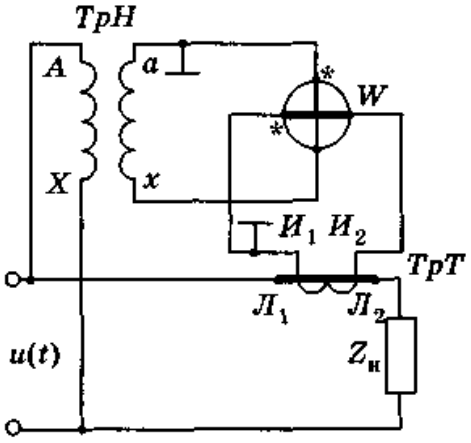


Рисунок 6.11 – Схема включения электродинамического ваттметра через измерительные трансформаторы тока и напряжения

Значение измеряемой мощности определяют по показанию ваттметра, умноженному на произведение коэффициентов трансформации трансформаторов тока и напряжения:

$$P_x = P_W K_{U_{ном}} K_{I_{ном}}$$

где P_x – измеренное значение активной мощности в цепи нагрузки;

P_w – показание ваттметра;

$K_{U_{ном}}; K_{I_{ном}}$ – номинальные коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов напряжения и тока.

Измеренное значение мощности будет отличаться от действительного за счет погрешности в передаче значений напряжения и тока, а также угловых погрешностей трансформаторов. Электродинамические ваттметры изготовляют многопредельными, высоких классов точности (0,1; 0,2) с диапазоном измеряемых мощностей от десятых долей ватта до 3-6 кВт, используют их как лабораторные приборы. При грубых измерениях в качестве щитовых приборов применяют ферродинамические ваттметры.

Пример 6.3 *Вольтметр на 100 В со шкалой 0…500 присоединен к сети через трансформатор напряжения 6000 / 100. Определить напряжение сети, если стрелка вольтметра остановилась на делении 350 В. Определить наибольшую возможную относительную погрешность при измерении приборами класса точности 0,5.*

Ответ: коэффициент трансформации, при котором отградуирована шкала вольтметра составляет

$$k_1 = \frac{500}{100} = 5.$$

А коэффициент трансформации трансформатора напряжения

$$k_2 = \frac{6000}{100} = 60.$$

Коэффициент, на который надо умножать показания вольтметра для получения действительных значений напряжения на первичной стороне:

$$k = \frac{k_1}{k_2} = \frac{60}{5} = 12.$$

При показаниях вольтметра 350 В в первичной обмотке трансформатора

$$U_1 = 350 \cdot 12 = 4200\ В = 4{,}2\ кВ.$$

Определим относительную погрешность, вносимую вольтметром

$$\partial_U = \frac{\partial \cdot U_H}{U_1} = \frac{0{,}5 \cdot 500}{350} = \pm 0{,}71\%.$$

Общая же относительная погрешность составит

$$\partial_{общ} = \partial_U + \partial_{тр} = 0{,}71 + 0{,}5 = 1{,}21\%$$

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.176-214, 312-329.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.32-37.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.231-261.

4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.33-38.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Порядок расчета многопредельного шунта
2. Порядок расчета многопредельного делителя напряжения
3. Схемы включения электроизмерительных преобразователей и приборов

Тема 7 Электромеханические приборы и преобразователи

План лекции

1. Общие сведения
2. Магнитоэлектрический измерительный механизм
3. Электродинамический измерительный механизм
4. Индукционный измерительный механизм

1. Для измерения электрических величин широко применяются *электромеханические приборы* и *преобразователи*. Объектами электрических измерений являются все электрические и магнитные величины: сила тока, напряжение, мощность, энергия, магнитный поток и т.д. Определение значений этих величин необходимо для оценки работы всех электротехнических устройств, чем и определяется исключительная важность электромеханических приборов. Приборы этих систем часто входят в состав и других, более сложных, средств измерений.

По физическому принципу, положенному в основу построения и конструктивному исполнению, электротехнические приборы относятся к группе *аналоговых средств* измерения, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Любой прибор непосредственного отсчета состоит из измерительной цепи, измерительного механизма и вспомогательных элементов. Измерительная цепь служит для преобразования измеряемой величины в другую, непосредственно воздействующую на измерительный механизм. В измерительном механизме электрическая энергия преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части, обычно в угловое перемещение. К вспомогательным элементам относятся стрелка, шкала, корпус прибора и другие устройства.

По принципу действия и конструкции электромеханические измерительные преобразователи делятся на *магнитоэлектрические*, *электромагнитные*, *электродинамические*, *ферродинамические*, *электростатические*, *индукционные*, *термоэлектрические*. Рассмотрим подробнее некоторые типы измерительных механизмов.

2. Принцип действия *магнитоэлектрического* измерительного механизма (рис.7.1) основан на силовом взаимодействии постоянного магнитного поля и проводника с постоянным током.

На концах постоянного магнита *1* закреплены полюсные наконечники *2,* между которыми помещен неподвижный цилиндр *3.* Полюсные наконечники и неподвижный цилиндр выполнены из магнитомягкого материала. Такая

конструкция магнитной системы позволяет получить в зазоре между полюсными наконечниками *2* и цилиндром *3* равномерное радиальное постоянное магнитное поле.

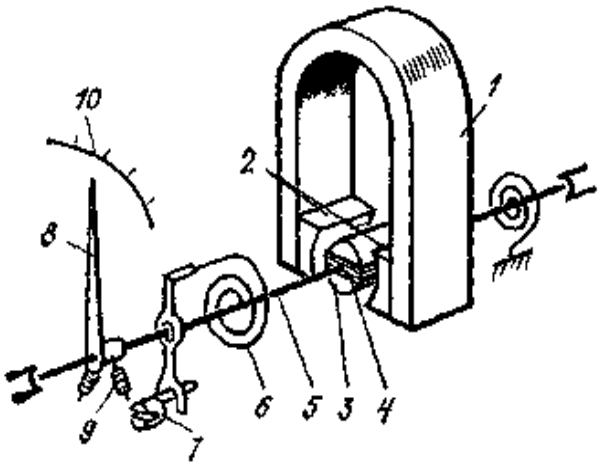


Рисунок 7.1 − Конструкция магнитоэлектрического преобразователя

В этом поле находится подвижная катушка *4,* которая чаще всего наматывается на алюминиевый каркас, одновременно выполняющий роль злектромагнитного успокоителя подвижной части системы. Подвижная катушка *4* крепится на полуосях *5* или растяжках. Измеряемый постоянный ток поступает в катушку через спиральные пружины *6,* которые создают противодействующий момент. Кроме того, в конструкцию магнитоэлектрического измерительного прибора входят вспомогательные элементы:

7 – устройство установки нулевого положения указателя-стрелки;

8 – указатель-стрелка;

9 – балансир;

10 – шкала.

В результате взаимодействия магнитного поля в зазоре с током в катушке создается вращающий момент, под действием которого подвижная катушка поворачивается на полуосях *5*. Отклонение катушки будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент $M_{вр}$ не уравновесится противо-действующим моментом $M_{пр}$. При этом стрелка *8* отклонится на уголα, пропорциональный току в катушке.

Вращающий момент измерительного механизма определяется в соответствии с законом электромагнитной силы:

$$M_{вр} = F_{эм}\, d = B\, S\, \omega\, I, \qquad (7.1)$$

где $F_{эм}$– электромагнитная сила; B – индукция в зазоре; d, l – ширина и длина катушки; S – площадь катушки; ω – число витков катушки; I – ток в катушке.

К достоинствам этих преобразователей следует отнести: высокую чувствительность, малое собственное потребление мощности, достаточно высокую точность, равномерную шкалу. Класс точности выпускаемых магнитоэлектрических приборов составляет 0,1…1,0.

Недостатки приборов рассмотренной системы связаны со сложностью изготовления и низкой перегрузочной способностью.

Магнитоэлектрические приборы получили распространение в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока с пределами измерений от долей микроампера до сотен ампер и от долей вольта до сотен вольт. Магнитоэлектрические механизмы пригодны только для измерений на постоянном токе, для работы в цепях переменного тока они комплектуюся полупроводниковыми выпрямителями.

Преобразователи этой системы также широко применяют в *комбинированных приборах*, представляющих собой универсальные измерительные приборы для измерения постоянного и переменного тока и напряжения, омического сопротивления, иногда электрической емкости.

3. В *электродинамических* измерительных механизмах для создания вращающего момента используется принцип взаимодействия проводников с токами: два параллельных проводника с одинаково направленными токами взаимно притягиваются, с противоположно направленными токами – взаимно отталкиваются.

Измерительный механизм этой системы состоит в основном из неподвижной *1* и подвижной *2* катушек (рис.7.2).

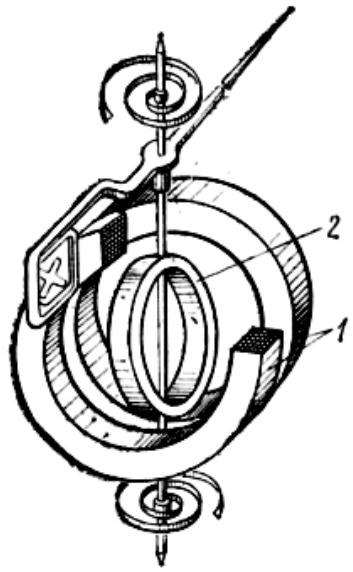


Рисунок 7.2 – Конструкция электродинамического преобразователя

Токи I_1 и I_2 в катушках создают магнитные потоки Φ_1 и Φ_2. В результате действия магнитного поля на подвижную катушку, закрепленную на оси, она стремится занять такое положение, при котором направление ее магнитного потока Φ_2 совпадает с направлением магнитного потока неподвижной катушки Φ_1. Сила, действующая при этом на катушку *2*, создает вращающий момент

$$M_{BP} = dW_M/d\alpha = I_1 \cdot I_2 \cdot dM / d\alpha, \qquad (7.2)$$

где M – взаимная индуктивность катушек.

Вращающий момент электродинамического измерительного механизма пропорционален произведению токов в катушках и скорости изменения взаимной индуктивности M при повороте подвижной катушки, поэтому шкала прибора нелинейная.

Электродинамический механизм, как и другие, включают в цепь для измерения токов и напряжений. Кроме того, такой механизм с двумя катушками можно применять для измерения мощности. На базе электродинамических логометров выпускаются фазометры, частотомеры, фарадметры.

Электродинамические измерительные механизмы могут 6ыть частью точных современных приборов для измерений в цепях переменного тока, посколько у них нет сердечников из ферромагнитных материалов и,

следовательно, исключены погрешности, связанные с появлением вихревых токов и гистерезисом.

Приборы этой системы изготовляются главным образом в виде переносных приборов высокой точности – классов 0,1; 0,2 и 0,5, а в качестве щитовых приборов применяются редко. Их недостатками являются: относительно большое потребление мощности, чувствительность к механическим воздействиям (толчкам, тряске и вибрациям).

4. *Индукционный* измерительный механизм широко применяется в качестве счетчиков активной и реактивной электроэнергии в цепях переменного тока.

Принцип работы индукционного преобразователя (рис.7.3) основан на взаимодействии магнитного поля с вихревыми токами в немагнитном металлическом диске *1*, укрепленном на оси *2*. Магнитный поток электромагнита *3* взаимодействует с вихревыми токами, возбуждаемыми электромагнитом *4*, и наоборот. Постоянный магнит *5* создает тормозной момент.

Один из магнитных потоков пропорционален напряжению цепи переменного тока, другой – току.

Вращающий момент зависит от напряжения, тока и угла сдвига фаз между ними:

$$W=k\cdot U\cdot I\cdot\cos\varphi \qquad (7.3)$$

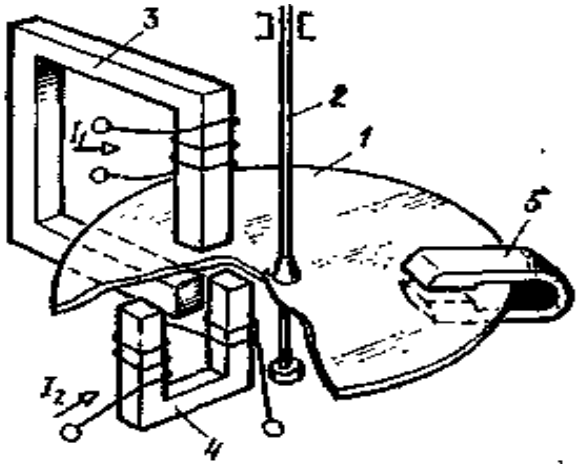


Рисунок 7.3 − Конструкция индукционного преобразователя

Чем больше ток и напряжение, тем больше частота вращения диска *n*, которая пропорциональна активной мощности *P* и времени *t*, в течение которого протекает ток, т.е. пропорциональна расходу электроэнергии

$$W=P\cdot t=c\cdot n, \qquad (7.4)$$

где *c* – коэффициент, зависящий от конструкции счетчика.

Счетчики активной энергии выпускаются классов точности 0,5; 1,0; 2; 2,5; счетчики реактивной энергии – 1,5; 2 и 3.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И.

Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.180-187.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.50-53.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.94-118.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.51-55.

Контрольные задания для СРД [1-4]
1. Виды электромеханических измерительных преобразователей
2. Применение электромеханических измерительных приборов

Тема 8 Электронные аналоговые измерительные приборы

План лекции
1. Общие сведения
2. Электронно-лучевые осциллографы
3. Электронные аналоговые вольтметры
4. Электронные омметры

1. *Электронные аналоговые* измерительные приборы и преобразователи представляют собой большую группу средств измерений, применяющихся для измерения всех электрических величин: силы тока, напряжения, активного сопротивления, емкости, частоты и фазы переменного тока и т.д.

Применение электронных устройств в этих средствах измерений позволяет получить высокий уровень их метрологических характеристик: широкий диапазон измерений, малую потребляемую мощность от измеряемой цепи, высокую чувствительность и т.п.

В настоящее время широкое распространение получили электронные *аналоговые осциллографы, вольтметры, омметры, измерительные генераторы сигналов* и др. В то же время они вытесняются цифровыми приборами соответствующего назначения, что объясняется относительной простотой преобразования измеряемых параметров в кодовый цифровой сигнал, высокой надежностью и малой погрешностью цифровых средств измерений.

2. *Электронно-лучевые осциллографы* (далее – *осциллографы*) предназначены для визуального наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов. Возможность наблюдения изменяющихся во времени сигналов делает осциллографы чрезвычайно удобными для определения амплитудных и временных параметров наблюдаемых сигналов.

В настоящее время выпускается большое разнообразие осциллографов, различающихся назначением, характеристиками и функциональными возможностями. По назначению и принципу действия принято различать универсальные, стробоскопические, запоминающие и специальные осциллографы.

Универсальные (условная индексация в обозначении типономинала

осциллографа, согласно советского ГОСТ – *С1*) – наиболее распространенная группа приборов. Они служат для исследования непрерывных и импульсных сигналов.

Стробоскопические (*С7*) – используются для изучения скоротечных процессов нано- и микросекундной длительности (СВЧ диапазон).

Запоминающие (*С8*) – применяются для детального исследования однократных, редко повторяющихся и периодических сигналов, изображения которых требуется запомнить в течение длительного времени. В аналоговых запоминающих устройствах для записи сигнала используются *электронно-лучевые трубки (ЭЛТ)* специальной конструкции. В цифровых запоминающих осциллографах исследуемый сигнал преобразуется в цифровую форму, а затем записывается в блок памяти и может быть многократно воспроизведен на экране.

Специальные (*С9*) – содержат специфические узлы (специальные усилители, преобразователи, вычислители и др.), необходимые для проведения конкретных измерений, например, в телевизионной аппаратуре.

Большинство осциллографов реального времени построено по структурной схеме, приведенной на рис.8.1.

Основным элементом конструкции является ЭЛТ, внутри которой формируется узкий пучок электронов – электронный луч. Источником электронов служит катод косвенного накала.

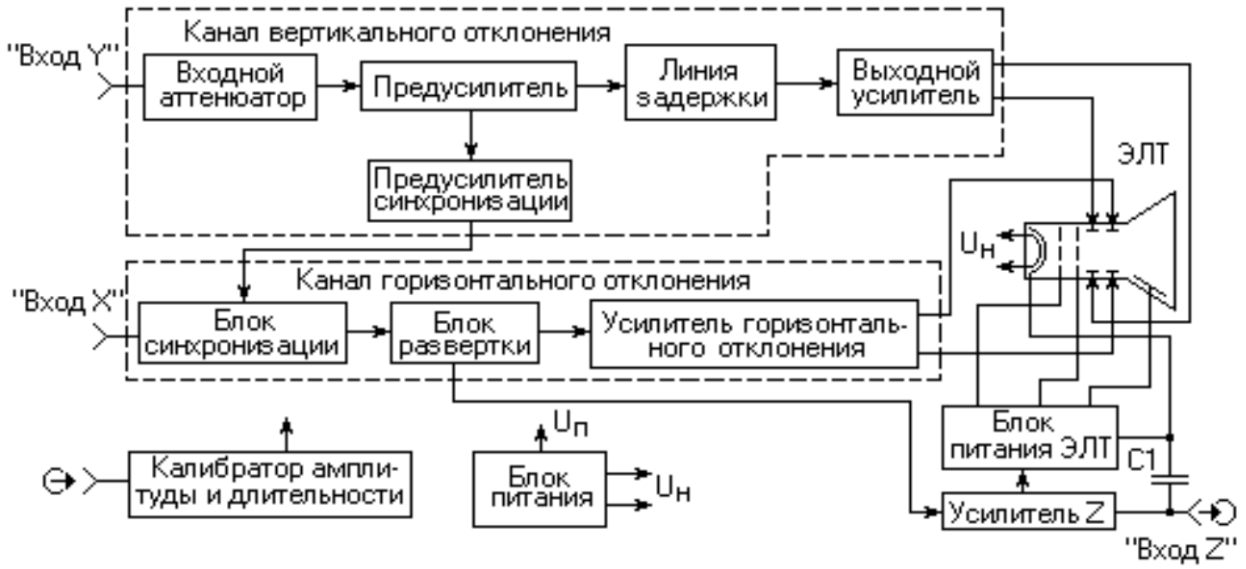


Рисунок 8.1 − Структурная схема универсального электронно-лучевого осциллографа

Эмиттируемые катодом электроны ускоряются, фокусируются и, попадая на слой люминофора на передней рабочей части экрана ЭЛТ, возбуждают его свечение в видимой части спектра.

Для визуального наблюдения исследуемого сигнала экран трубки покрывают одним или несколькими слоями люминофора, состав которого определяет яркость, окраску свечения и продолжительность послесвечения экрана. Современное развитие техники люминесцентных покрытий предлагает

люминофоры, позволяющие выбрать практически любой цвет свечения. Поверх люминофора часто наносят тончайший слой металла (алюминия), обеспечивающего светоотражающую способность и, таким образом, дополнительно повышающего яркость свечения экрана.

Поскольку осциллограммы обычно рассматривают визуально, то целесообразно применять такой цвет, у которого энергетический максимум спектра по возможности совпадал с максимумом спектральной чувствительности глаза. Самым выгодным с этой точки зрения является экран с зеленым либо желтым свечением, несколько хуже человек воспринимает оранжевый, голубой и синий цвета. Для наблюдения однократных или периодических медленно протекающих процессов используют люминофоры с относительно большим временем послесвечения или запоминающие трубки специальной конструкции.

Величиной скорости потока электронов луча (от этого зависит яркость свечения точки на экране), площадью его поперечного сечения в точке соприкосновения с люминофором (размеры светящейся точки) и отклонением луча от центра экрана можно управлять изменением напряжений на соответствующих электродах ЭЛТ.

В электронно-лучевых осциллографах, как правило, применяют ЭЛТ *с электростатическим отклонением луча*. Для этого в ней непосредственно за ускоряющими анодами взаимно перпендикулярно располагают две пары пластин. Этим достигается перемещение луча по экрану в прямоугольной системе координат, что удобно и для управления лучом и при отсчете параметров исследуемой осциллограммы. Исходя из этого, напряжение, соответствующее измеряемой величине, обычно подают на вертикальные отклоняющие пластины – сигнальные (пластины расположены в двух горизонтальных параллельных плоскостях), а на другую пару пластин, временных, подают напряжение, которое равномерно перемещает луч в горизонтальном направлении (расположены в двух вертикальных параллельных плоскостях).

Работа пластин характеризуется величиной линейного отклонения луча на экране в мм при приложении к ним отклоняющего напряжения 1 В. Эта величина называется *чувствительностью пластин к отклонению*. Поскольку пространственное расположение пар пластин в ЭЛТ различно, чувствительность к отклонению горизонтальных и вертикальных пластин различная.

Поток электронов, испускаемый катодом ЭЛТ, обладает ничтожно малой инерционностью и поэтому мгновенно изменяет свое направление под действием электростатического поля отклоняющих пластин. Это свойство, в основном, и послужило причиной широкого применения электронно-лучевых осциллографов в качестве измерительных приборов.

Напряжение на вертикальных отклоняющих пластинах, соответствующее мгновенному значению амплитуды входного сигнала (*"Вход Y"*), формируется каналом вертикального отклонения. А на горизонтальные отклоняющие пластины подают импульсное напряжение специальной формы, которое

смещает луч по экрану слева направо (с точки позиции наблюдателя), формируя ось времени. В результате луч на экране рисует кривую, воспроизводящую изменения исследуемого сигнала во времени.

В зависимости от назначения и конструкции ЭЛТ, минимальная величина отклоняющего напряжения колеблется в пределах от 10 до 100 В. Поэтому при работе с меньшими напряжениями сигналов возникает необходимость в их усилении. В общих чертах *усилитель вертикального отклонения* должен удовлетворять следующим требованиям:

– иметь достаточно большой коэффициент усиления;

– обладать линейной АЧХ во всем рабочем диапазоне частот осциллографа;

– не вносить заметных фазовых сдвигов гармонических составляющих сигнала;

– изменения напряжения на вертикальных отклоняющих пластинах всегда должны быть пропорциональны изменениям напряжения входного сигнала.

Полоса пропускания выходного усилителя должна превышать полосу пропускания тракта вертикального отклонения в 1,6...1,7 раза. В осциллографах с полосой пропускания не более 10 МГц наиболее употребительной стала конструкция двух однотактных усилителей с соединенными цепями эмиттеров. Отрицательная обратная связь по току в эмиттерных цепях транзисторов позволяет уменьшить нелинейные искажения и корректировать частотную характеристику в области средних и высоких частот полосы пропускания. Современный уровень развития интегральной схемотехники позволяет строить усилители с полосой пропускания до нескольких сотен МГц.

Одним из важнейших параметров усилителя вертикального отклонения является его *чувствительность*. Она соответствует минимальному значению коэффициента отклонения луча на экране: мВ/дел. Ограничение повышения чувствительности связано с уровнями внутренних шумов входных устройств (аттенюатор и входные узлы усилителя вертикального отклонения) и внешних наводок.

Входной аттенюатор служит для регулирования амплитуды сигнала на экране осциллографа. Его выполняют по схеме частотно-компенсированного делителя.

Для наблюдения переднего фронта коротких импульсов на выходе *предусилителя* включена *линия задержки*, которая обеспечивает задержку исследуемого сигнала на время, затрачиваемое генератором развертки на образование начала рабочего хода.

Для удобного визуального наблюдения осциллограммы на экране к *усилителю подсвета* (*"Вход Z"*) подают специальные импульсы. Они обрабатываются усилителем-инвертором и подаются на модулятор ЭЛТ во время прямого хода, обеспечивая повышение яркости свечения луча в этот период развертки.

Напряжение, необходимое для создания горизонтальной (временной) развертки, может поступать на пластины ЭЛТ либо от *внутреннего генератора* (*генератор развертки*), либо от внешних источников периодических колебаний через специальный разъем (*"Вход X"*). Форма сигнала, используемого для

создания горизонтальной развертки, может быть любой в зависимости от цели измерений. Однако для обеспечения равномерного перемещения луча по экрану необходимо, чтобы развертывающее напряжение изменялось линейно во времени. Характерный для осциллографов вид развертывающего напряжения представлен на рис.8.2: $\tau_п$ – прямой ход, интервал времени, за который луч пробегает всю рабочую часть экрана в горизонтальном направлении; $\tau_о$ – длительность обратного хода; $\tau_{бл}$ – длительность блокировки, интервал времени между моментом окончания обратного хода предыдущего периода и началом прямого хода следующего периода; $T_р$ – период повторения импульсов; U_0 – начальный уровень напряжения развертки; U_m – амплитуда напряжения развертки.

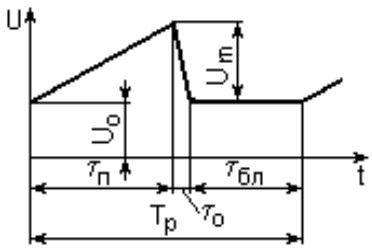


Рисунок 8.2

В большинстве конструкций осциллографов внутренний задающий генератор выполнен по схеме *интегратора Миллера*. Структурно такое звено представляет собой усилитель постоянного тока, охваченный глубокой отрицательной обратной связью через конденсатор. Если на вход интегратора подать прямоугольный импульс напряжения длительностью $\tau_и$, то на выходе получим линейный пилообразный импульс практически той же длительности (рис.8.3).

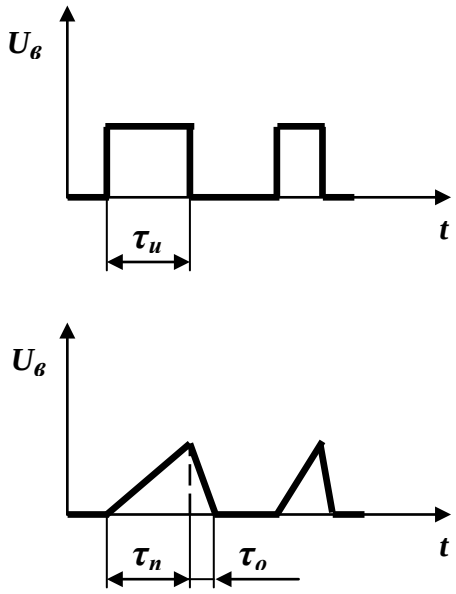


Рисунок 8.3

Неподвижное изображение исследуемого периодического процесса можно получить лишь в том случае, если частота развертывающего напряжения равна или в целое число раз меньше частоты исследуемого сигнала. Поскольку такое соотношение без специальных регулировок редко реализуется, изображение на экране при подаче сигнала равномерно перемещается вправо или влево («плывет»). Устойчивости и четкости изображения достигают регулировкой частоты развертки – *синхронизируют* два колебательных процесса.

Для обеспечения *синхронизации* из канала вертикального отклонения на генератор развертки подают часть сигнала. Такая синхронизация называется *внутренней*. При *внешней* синхронизации сигнал подают в канал горизонтального отклонения непосредственно через разъем *"Вход X"*. В осциллографах предусматривают еще один вариант синхронизации – *от сети* (точнее, от цепи переменного тока вторичной обмотки трансформатора питания с частотой сети и амплитудой 1 В). Такой вид синхронизации легко реализуется и необходим в работе по исследованию аппаратуры, в которой за основу

длительностей периодических процессов выбраны частота сети и ее гармоники (магнитофоны, телевизоры, видеомагнитофоны и другие устройства).

Различают три режима запуска развертки луча – *автоколебательный, ждущий* и *однократный*. В автоколебательном режиме задающий генератор развертывающего устройства работает постоянно и сигнал синхронизирующего импульса к нему поступает периодически. В этом случае очень важно соблюдение условия, при котором длительность прямого хода развертки больше времени периода исследуемого сигнала, иначе на экране будет воспроизводиться только часть осциллограммы сигнала.

Режим ждущей развертки характеризуется тем, что импульс развертки вырабатывается в момент поступления исследуемого сигнала на генератор блока развертки.

В режиме однократного запуска работа генератора развертки аналогична работе рассмотренных выше режимов. Однако после каждого цикла развертки последующие запускающие импульсы блокируются до тех пор, пока не будет нажата кнопка *"Готов"*.

Верхний предел частотного диапазона исследуемых колебаний определяется минимально возможной для данного типа осциллографа длительностью прямого хода τ_n. В осциллографах длительность прямого хода задают в виде коэффициентов развертки $K_p = \tau_n / l$, где l – длина отрезка горизонтальной оси, соответствующая длительности τ_n. Численные значения коэффициентов указывают на лицевой панели прибора. Скорость развертки выбирают переключателем *"ВРЕМЯ/дел"* и переключателем, изменяющим коэффициент передачи усилителя горизонтального отклонения.

В качестве примера рассмотрим техническую характеристику современного *универсального осциллографа С1-127* компании БЕЛВАР (рис.8.4):

Число каналов……2
Полоса пропускания, МГц……50
Входное сопротивление, МОм……1
Входная емкость, пФ……25
Коэффициент отклонения, В/дел……10^{-3}…5
Коэффициент развертки, мкс/дел……0,005…$2 \cdot 10^5$
Погрешность ……±3 % (5 мВ/дел…5 В/дел)
±4 % (1 мВ/дел…2 мВ/дел)
Диапазон рабочих температур……-30…+50 ^0C
Потребляемая мощность……50 В ·А (сеть 220 В)
30 Вт (от источника постоянного тока 27 В)
Размеры рабочей части экрана, мм……60 ×80
Масса, кг……6



Рисунок 8.4

3. В настоящее время приборостроительной промышленностью стран СНГ выпускается большой ассортимент различных типов вольтметров. В соответствии с действовавшим в СССР ГОСТ 15094-86 вольтметры подразделяют на следующие подгруппы:

В1 – установки или приборы для поверки вольтметров;

В2 – вольтметры постоянного тока;

В3 – вольтметры переменного тока;

В4 – вольтметры импульсного тока;

В5 – вольтметры фазочувствительные (вектометры);

В6 – вольтметры селективные;

В7 – вольтметры универсальные и т.д.

Приведем некоторые пояснения.

Приборы подгруппы В1, кроме поверки электронных вольтметров, могут также использоваться как источники калиброванных напряжений для градуировки вольтметров, усилителей, генераторов, осциллографов и др.

Приборы подгруппы В5 предназначены для измерения величин комплексных составляющих напряжений на выходе исследуемого четырёхполюсника по отношению к опорному напряжению.

К подгруппе В6 относят вольтметры, позволяющие раздельно (избирательно) измерять уровни спектральных составляющих сигнала в известной полосе частот, ширина и положение которой может изменяться.

В подгруппу В7 входят *комбинированные приборы*, позволяющие измерять значения различных физических величин (силу тока, напряжение постоянного или переменного тока, сопротивление постоянному току и т.п.). Приборы этой подгруппы являются одними из наиболее распространенных электроизмерительных средств.

В качестве отсчетного устройства в аналоговых вольтметрах используют в основном электромеханические приборы магнитоэлектрической системы.

Погрешности измерения в приборах данной группы обусловлены погрешностью показания отсчетного устройства, дрейфом смещения нуля, неравномерностью амплитудно-частотной характеристики усилителя, неточностью установки коэффициента деления входных аттенюаторов.

Суммарная величина данных слагаемых приводится в технических характеристиках конкретного вольтметра в виде основной погрешности прибора и выражается в процентах от конечного значения установленного предела измерения.

Структурная схема таких приборов, на примере *вольтметра В3-43*, показана на рис.8.5. Широкий диапазон частот у них обеспечивается тем, что сигналы детектируются непосредственно на входе прибора. Однако вольтметры данного типа имеют небольшую чувствительность и обеспечивают нормированные технические характеристики только для синусоидальных сигналов с коэффициентом гармоник не более 10..20 %.



Рисунок 8.5

Большей чувствительностью обладают *приборы среднеквадратических значений*. Структурная схема приборов данного типа, на примере *микровольтметра В3-40*, показана на рис.8.6.

Исследуемый сигнал поступает во *входной блок*, состоящий из *входного делителя, преобразователя импедансов, аттенюатора*. Функциональное назначение блока – формирование требуемого входного сопротивления микровольтметра на установленном пределе измерения прибора.

Широкополосный усилитель усиливает сигнал до значения, необходимого для нормальной работы преобразователя (детектора), назначение которого – преобразование входного переменного напряжения в эквивалентное ему постоянное напряжение или ток.

Усилитель постоянного тока (УПТ) обеспечивает необходимый уровень напряжения для работы измерительного прибора (ИП), который фиксирует результат измерения.



Рисунок 8.6

В таких вольтметрах коэффициент усиления принимают $k_{УПТ} \approx 1$, так как повышение чувствительности (за счет увеличения $k_{УПТ}$) наталкивается на технические трудности из-за нестабильности работы усилителя, характеризующейся в первую очередь изменением $k_{УПТ}$ и *дрейфом нуля* (самопроизвольным изменением выходного сигнала) УПТ при больших значениях коэффициента усиления. Основное назначение УПТ в таких схемах –

обеспечение высокого входного сопротивления вольтметра. В связи с этим верхний предел измерений таких вольтметров не бывает ниже десятков или единиц мВ.

Для создания высокочувствительных микровольтметров постоянного тока применяют схему «*модулятор-демодулятор*» (*М-ДМ*), представленную на рис.8.7.

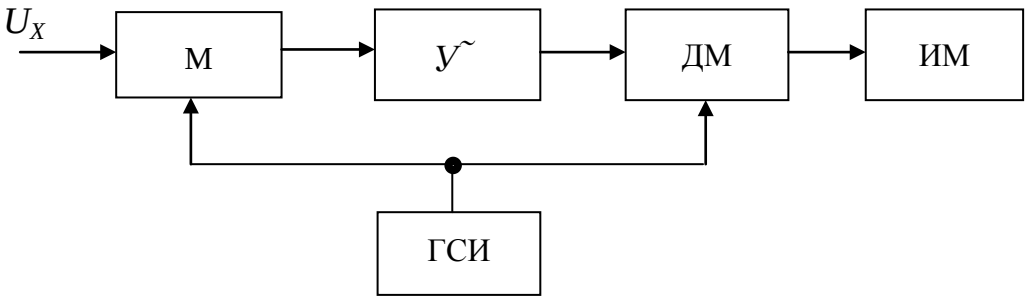


Рисунок 8.7

Здесь: *М – модулятор, ДМ – демодулятор, ГСИ – генератор синхронизирующих импульсов, ИМ – измерительный механизм, $У^{\sim}$ – усилитель переменного тока.*

Усилители переменного тока не пропускают постоянную составляющую сигнала и поэтому у них отсутствует дрейф нуля, характерный для УПТ. Генератор управляет работой модулятора и демодулятора, представляющих собой в простейшем случае аналоговые ключи, синхронно замыкая и размыкая их с некоторой частотой. На выходе модулятора возникает однополярный импульсный сигнал, амплитуда которого пропорциональна измеряемому U_X. Переменная составляющая этого сигнала усиливается $У^{\sim}$, а затем выпрямляется демодулятором.

У таких микровольтметров верхний предел измерений при наивысшей чувствительности может составлять единицы мкВ. Так, *вольтметр В2-25* имеет верхние пределы измерений 3, 10…300, 1000 мкВ при основной приведенной погрешности $\pm$ (0,5…6) %.

Шкалы подавляющего большинства аналоговых вольтметров, предназначенных для измерения переменных напряжений, градуируются в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения. Это обусловлено тем, что среднеквадратическое значение электрического сигнала является параметром, характеризующим мощность сигнала. Помимо своей прямой функции – измерение значения переменного напряжения – приборы данной подгруппы могут использоваться как широкополосные усилители переменного напряжения, а также в качестве преобразователей переменного напряжения в постоянное.

Особо хочется выделить подгруппу *комбинированных аналоговых* приборов. Обладая расширенными функциональными возможностями, незначительными габаритами и хорошей точностью измерений, приборы данного типа и сегодня являются неотъемлемым атрибутом любой электроизмерительной лаборатории.

В качестве примера рассмотрим техническую характеристику современного *универсального комбинированного прибора Ц4380М* с автоматической защитой от электрических перегрузок компании БЕЛВАР (рис.8.8):



Рисунок 8.8

Диапазон по напряжению постоянного тока (кл. 1,5),В……..…..... 0-0,075; 0-0,3;0-1,5; 0-6; 0-15; 0-30; 0-150;0-300; 0-600
Диапазон по напряжению переменного тока (кл. 2,5),В……..…..... 0-0,3; 0-1,5;0-6; 0-15; 0-30; 0-150; 0-300; 0-600
Диапазон по постоянному току (кл. 1,5),А……..0-0,006; 0-0,03;0-0,15; 0-0,6; 0-15
Диапазон по переменному току (кл. 2,5),мА…....0-0,006; 0-0,03; 0-0,15;0-0,6; 0-15
Измерение сопротивления, кОм……0,001-0,1; 0,1-10; 1,0-100; 10-1000
Температура окружающего воздуха, ^{0}*С……..……...……..…..–30…+40*
Относительная влажность,%.....80 (при температуре +25 ^{0}*С)*
Масса прибора, кг……1,5

4. Точность *электронных аналоговых омметров*, как правило, невысока: приведенная погрешность составляет единицы процентов и увеличивается до 15% при измерении особо больших сопротивлений (более 10^{12} Ом).

В основе работы электронных омметров лежит преобразование измеряемого сопротивления R_x в функционально связанное с ним напряжение постоянного тока, которое подается на электромеханический измерительный механизм, шкала измерительного механизма градуируется соответствующим образом.

Наибольшее распространение получили схемы омметров, приведенные на рис.8.9 и 8.10.

Здесь *ИСН* – источник стабилизированного напряжения U_0;
УПТ – усилитель постоянного тока;
ИМ – измерительный механизм.

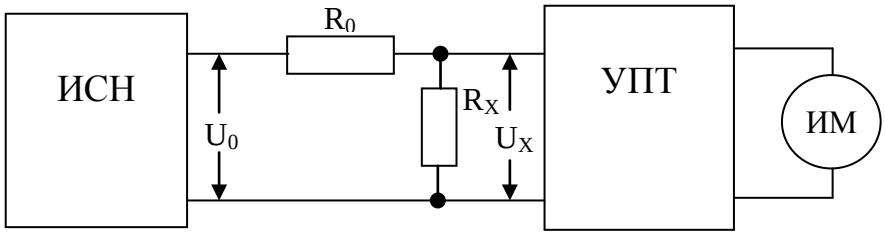


Рисунок 8.9

Поскольку в этой схеме применяют УПТ с большим входным сопротивлением, то пренебрегая им, получаем выражение для величины угла отклонения подвижной части ИМ:

$$\alpha = k \cdot U_X = \frac{k \cdot U_0 \cdot R_X}{(R_0 + R_X)}, \qquad (8.3)$$

где R_0 – известное сопротивление;

R_X – измеряемое сопротивление;

k – коэффициент преобразования УПТ и ИМ.

В широком диапазоне измеряемых сопротивлений шкала таких приборов неравномерна. Для повышения точности отсчитывания весь диапазон разбивают на *поддиапазоны*, каждому из которых соответствует свое значение известного сопротивления R_0. Для уменьшения погрешностей измерения, вызванных нестабильностью работы отдельных узлов омметров (особенно УПТ), в таких приборах предусматривают регулировку «Установка нуля» (при замкнутых входных контактах). Такая схема применяется в комбинированных приборах, наиболее часто – в *универсальных вольтметрах*. *Вольтметр В7-17* имеет в своем составе такой омметр с диапазонами измерений 10 Ом…100 МОм, основная погрешность его не превышает ± 2,5 %.

В схеме, изображенной на рис.8.11, применен операционный усилитель, в цепи отрицательной обратной связи которого находится сопротивление R_X (R_0).

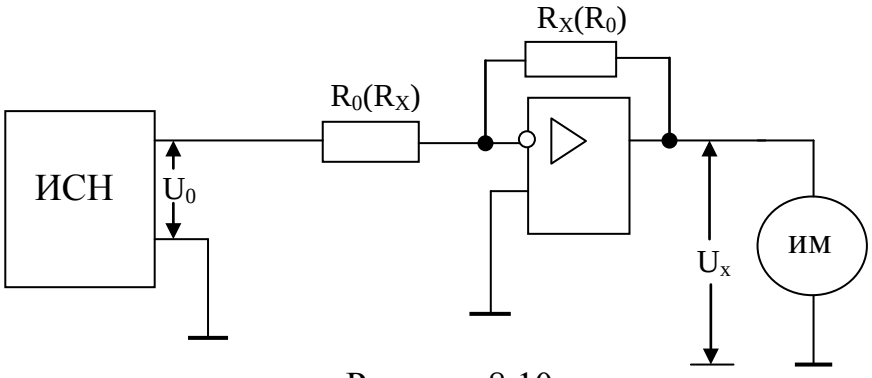


Рисунок 8.10

Здесь возможны два варианта включения R_0 и R_X.

В первом случае

$$U_X = \frac{U_0 \cdot R_X}{R_0}; \quad \alpha = \frac{S_U \cdot U_0 \cdot R_X}{R_0}, \qquad (8.4)$$

где S_U – чувствительность ИМ.

В этом случае омметр имеет равномерную шкалу. Подобная схема применяется в *электронном омметре Е6-10* с диапазоном измерения 10 Ом…1000 МОм и классом точности 2,5.

Во втором случае (обозначения R_X и R_0 на схеме в скобках)

$$\alpha = \frac{S_U \cdot U_0 \cdot R_0}{R_X} \qquad (8.5)$$

и шкала прибора неравномерна. Такая схема включения применяется для определения больших сопротивлений, например, в *тераомметрах Е6-14* с диапазоном измерений 10^7…10^{17} Ом и классами точности 4…10 в зависимости от поддиапазона измерений.

Измерение малых сопротивлений (до 10^{-4} Ом) выполняется электронными миллиомметрами, схемы которых обычно соответствуют рис.8.10. Однако для исключения влияния термоЭДС измерения производят на переменном токе.

В качестве примера укажем *миллиомметр Е6-15*, имеющий диапазон измерений 10^{-4}…10^2 Ом и приведенную погрешность ± 1,5 %.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.189-196, 244-268.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.60-72.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.120-132, 172-211.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.62-73.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Современное состояние и перспективы развития электронно-лучевых осциллографов

2. Современное состояние и перспективы развития аналоговых комбинированных приборов

Тема 9 Цифровые измерительные приборы

План лекции

1. Основные понятия и определения
2. Характеристики ЦИУ
3. Общая характеристика ЦИП
4. Цифровые вольтметры
5. Цифровые осциллографы

1. *Цифровыми приборами* называют приборы, вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представляются в цифровой форме. Как ранее отмечалось, цифровой прибор включает в себя обязательные функциональные узлы: *аналого-цифровой преобразователь*

(*АЦП*) и *цифровое отсчетное устройство* (*ЦОУ*). АЦП выдает код в соответствии со значением измеряемой величины, а ЦОУ отражает это значение в цифровой форме. Кроме АЦП, к цифровым преобразователям относят ЦАП, предназначенные для преобразования цифрового кода в аналоговую квантованную величину. В настоящее время промышленность выпускает большой ассортимент АЦП и ЦАП в виде интегральных микросхем. В дальнейшем будем оперировать термином *цифровое измерительное устройство* (*ЦИУ*), под которым понимается любое из указанных выше средств измерений.

По способу аналого-цифрового преобразования выделяют следующие основные методы:

а) *метод последовательного счета* (*интегрирования, время-импульсного преобразования*), при котором происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины X с известной квантованной величиной $X_К$, изменяющейся во времени скачками, причем каждый скачок соответствует шагу квантования по уровню (рис.9.1). Число ступеней, при котором наступает равенство $X_К(t_И) = X$ (с некоторой погрешностью), равно номеру отождествляемого уровня квантования. В процессе сравнения образуется единичный код, соответствующий уровню отождествляемого уровня квантования.

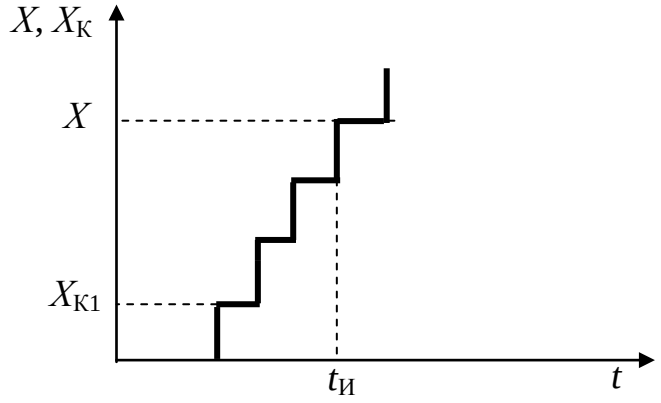
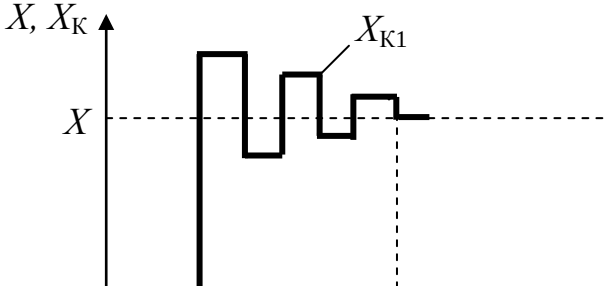


Рисунок 9.1

б) *метод последовательного приближения* (*поразрядного уравновешивания, кодово-импульсного преобразования*), при котором происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины X с известной квантованной величиной $X_К$, изменяющейся во времени скачками по определенному правилу (исключая единичную систему счисления).

Значение известной величины, при которой происходит равенство $X_К(t_И)=X$, соответствует номеру отождествляемого уровня квантования (рис.9.2).

в) *метод считывания* (*параллельного преобразования*), при котором происходит одновременное сравнение измеряемой величины X с известными величинами $X_{К1}$, $X_{К2,...}$, $X_{Кi}$, значения которых равны уровням квантования (рис.9.3).



Известная величина, равная измеряемой $X_{Ki} = X(t_И)$, соответствует номеру отождествляемого уровня квантования, на основании которого образуется код.

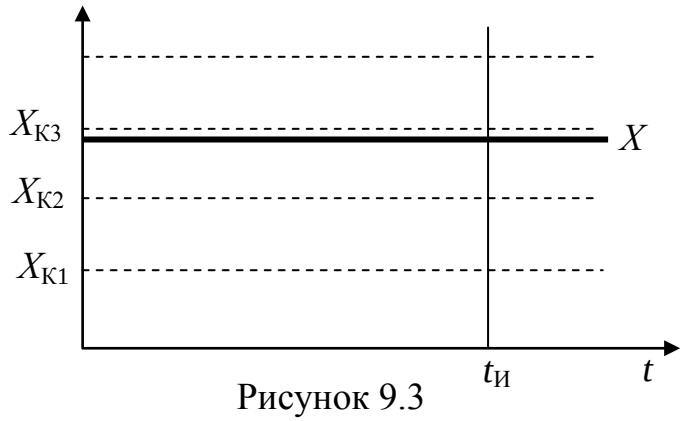


Рисунок 9.3

В соответствии с методами преобразования различают и группы ЦИУ – последовательного счета (*интегрирующие, время-импульсные*), последовательного приближения (*поразрядного уравновешивания*, *кодово-импульсные*), считывания (*параллельного преобразования*). Выделяют также ЦИУ, в которых применяется комбинация из рассмотренных способов преобразования.

2. К основным характеристикам ЦИУ относят *статические характеристики преобразования*, *статические погрешности*, *диапазон измерений*, *число разрядов и вид кода*, *разрешающую способность*, *входное сопротивление*, *помехозащищенность*, *надежность* и др. Рассмотрим некоторые из характеристик.

Входное сопротивление – сопротивление входной цепи ЦИУ. Оно влияет на потребляемую от исследуемого объекта мощность и, в конечном итоге, на результат измерения. Чтобы влияние было минимальным, например – у вольтметров, входное сопротивление делают по возможности большим.

У современных цифровых вольтметров постоянного тока на некоторых поддиапазонах входное сопротивление достигает 10^{10} Ом и более, а при использовании входного делителя – 10^6...10^7 Ом. Входная цепь ЦИУ может являться источником тока. Поэтому для ЦИУ нормируют предельное значение входного тока. Для ЦИУ переменного тока эквивалентную схему входной цепи принимают как параллельно включенные резистор и конденсатор, сопротивление и емкость которых указывают отдельно.

Помехозащищенность – способность ЦИУ к ослаблению действия помех. *Помеха* – величина, вызывающая нежелательное искажающее воздействие на

измерения. Воздействие помехи невозможно или трудно оценить и им управлять. Помехи разделяют на помехи *нормального* и *общего вида*. Помехи нормального вида (например, наводки на соединительные провода) – это помехи, эквивалентный генератор которых $U_{\text{П}}'$ включается последовательно с источником измеряемого напряжения (рис.9.4). Помеха общего вида возникает из-за разности потенциалов между источником измеряемого напряжения U_{x} и точкой заземления прибора (эквивалентный генератор $U_{\text{П}}''$ с внутренним сопротивлением R_{i} на рис.9.4).

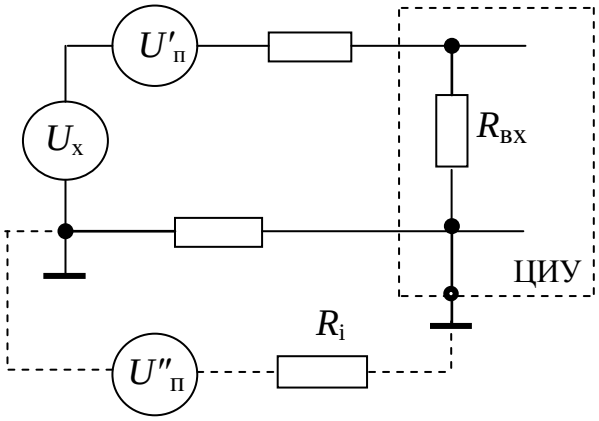


Рисунок 9.4

Для уменьшения действия *помех нормального вида* (главным образом помехи от переменного напряжения промышленной частоты – 50 Гц) применяют фильтры и специальные принципы действия ЦИУ, например, с интегрированием входного сигнала.

Для борьбы с *помехами общего вида* электрическую схему и конструкцию прибора выбирают так, чтобы сопротивление контура для тока помехи через R_{BX} было максимальным. Это достигается, например, изолированием входной цепи прибора от его корпуса.

Ослабление действия помех в цифровых вольтметрах постоянного тока характеризуют *коэффициентом подавления помехи*

$$k = 20 \cdot \lg(U_{\text{П}} / \Delta U), \text{ дБ} \qquad (9.1)$$

где $U_{\text{П}}$ – напряжение источника помехи;

ΔU – изменение показаний прибора под действием помехи.

3. Современные ЦИП, выпускаемые для измерения различных физических величин, имеют высокие метрологические характеристики, как правило, превосходящие характеристики соответствующих аналоговых средств измерений. Это обусловило широкое применение ЦИУ.

К достоинствам ЦИП относят *высокое быстродействие*, *большую точность измерений при полной автоматизации процесса измерений*, *удобство отсчета и регистрации результатов измерений*, *возможность сопряжения с вычислительными комплексами и устройствами*, *возможность дистанционной передачи результатов измерения без потерь точности* и т.д.

В настоящее время в ЦИУ широко применяют *большие интегральные схемы* (*БИС*) *микропроцессоров, оперативных* и *постоянных запоминающих*

устройств (*ОЗУ* и *ПЗУ*) и других элементов микропроцессорной техники.

Область применения ЦИУ постоянно расширяется. Они находят применение как в лабораторных, так и в производственных условиях для измерения различных электрических и неэлектрических величин: напряжения постоянного тока, частоты, временных интервалов, температуры, линейного и углового перемещения, давления и т.д.

4. В *цифровых вольтметрах* (*ЦВ*) в качестве отсчетного устройства используются *цифровые знакосинтезирующие индикаторы* на основе светодиодных матриц (например, *В7-21А*) и жидкокристаллических индикаторов *ЖКИ* (пример – *М830В* фирмы *Mastech*). Дорогие модели мультиметров и скопметров (например, фирмы *Fluke*) могут иметь цветной ЖКИ-дисплей. *Индикаторное табло* (дисплей), помимо непосредственного отражения результата измерений, как правило, индицирует также сигнал перегрузки, знак полярности, род и диапазон измеряемой величины. В целях расширения показаний поддиапазона при измерении физической величины, значение которой несколько превышает конечное значение установленного предела измерений, вводят дополнительный разряд с неполной индикацией. Широкое использование в качестве элементной основы интегральных микросхем позволяет создавать на базе ЦВ многофункциональные приборы – *мультиметры*, способные производить измерения не только тока и напряжения, но и сопротивления, емкости, индуктивности. Цифровые мультиметры в настоящее время являются одними из самых распространенных электроизмерительных приборов.

Поскольку обязательным функциональным элементом ЦВ является АЦП, цифровые вольтметры различают по методу аналого-цифрового преобразования: последовательного счета (с *время-импульсным преобразованием*, с *преобразованием напряжения в частоту – интегрирующие* и *двойного интегрирования*), последовательного приближения (*поразрядного кодирования* или с *кодово-импульсным преобразованием*) и др. Наибольшее распространение получили ЦВ интегрирующие и двойного интегрирования.

Работа интегрирующих вольтметров непрерывного интегрирования основана на методе *преобразования напряжения в частоту*. Частота повторений импульсов, пропорциональная входному напряжению, измеряется *электронно-счетным частотомером*.

Погрешность измерений цифровых вольтметров определяется по формуле $\delta = \pm [c + d\cdot(U_К/U_П - 1)]$, где c и d – постоянные числа, характеризующие класс точности вольтметра; $U_К$ – конечное значение установленного предела измерений; $U_П$ – показания прибора.

Метод *время-импульсного преобразования* в сочетании с *двойным интегрированием* позволяет эффективно ослабить влияние помех, измерить напряжение обеих полярностей, получить входное сопротивление, равное единицам ГОм, и малую погрешность измерения без предъявления особых требований к постоянству линейно изменяющегося напряжения.

На рис.9.5, а представлена структурная схема *цифрового вольтметра двойного интегрирования*.

Принцип действия прибора основан на преобразовании измеряемой величины в пропорциональный ей интервал времени с последующим преобразованием этого интервала в дискретную форму и в цифровой код.

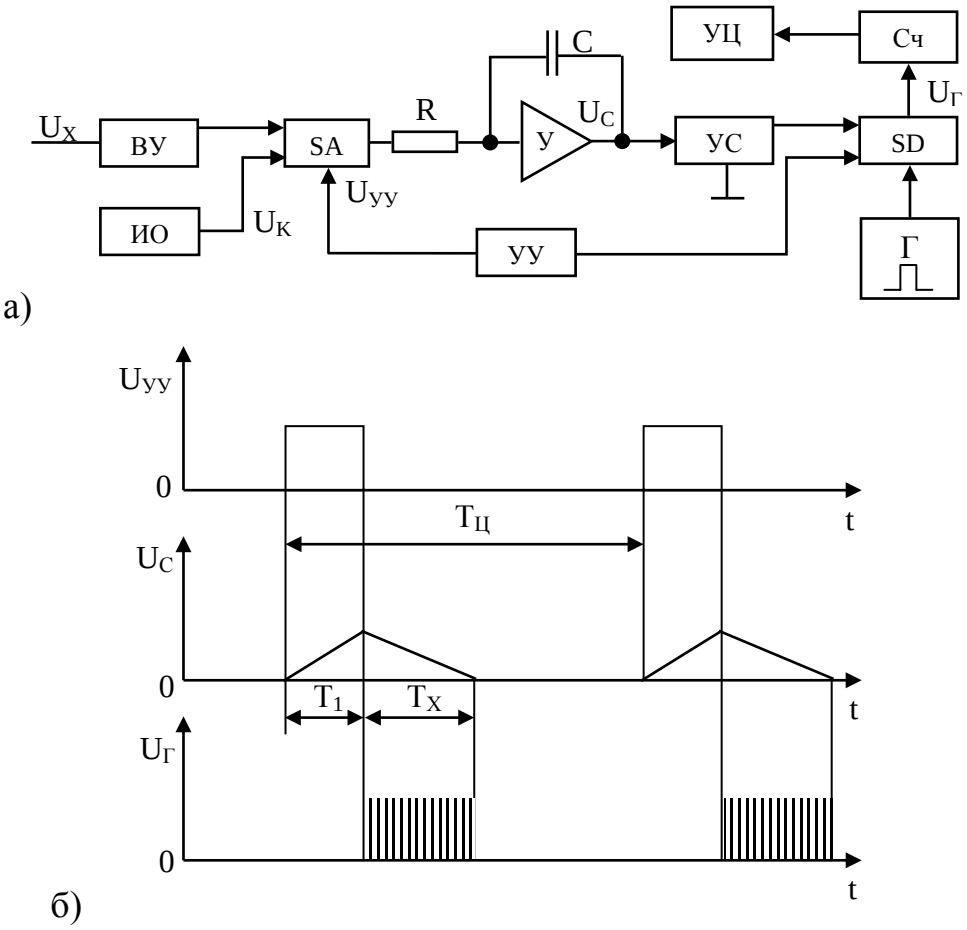


Рисунок 9.5

Управляющее устройство *УУ* задает цикл измерений $T_Ц$ и вырабатывает импульс первого такта длительностью T_1 (рис.9.5, б). В течение интервала времени T_1 электронный ключ *SA* находится в исходном состоянии *и* измеряемое напряжение U_X через входное устройство *ВУ* поступает к интегратору и сообщает конденсатору *С* количество электричества

$$q_З = \frac{T_1}{R} U_X$$

В момент окончания импульса T_1 *УУ* открывает ключ *SD* и на счетчик *Сч* начинают поступать импульсы от генератора *Г*. Одновременно ключ *SA* перебрасывается во второе устойчивое состояние и к интегратору поступает опорное напряжение U_K обратной полярности. Конденсатор в течение интервала времени T_X разряжается до исходного состояния

$$q_Р = \frac{T_X}{R} U_K$$

В момент окончания разряда конденсатора напряжения на обоих входах *УС* оказываются равными нулю, *УС* дает команду на размыкание *SD*, и поступление импульсов на счетчик прекращается. Их количество определяет

T_X. Поскольку количество электричества при заряде и разряде конденсатора одинаково, то получаем

$$U_X = \frac{T_X}{T_1} U_K$$

интервал времени T_X не зависит от постоянной времени интегратора, т.е. для осуществления метода двойного интегрирования не требуются цепи с высокостабильными элементами. Длительность первого такта интегрирования T_1, и значение опорного напряжения U_K могут поддерживаться постоянными с высокой точностью, и поэтому погрешность преобразования напряжения во временной интервал при этом методе незначительна.

Дальнейшее развитие цифровых вольтметров связано с построением их на основе *микропроцессорных* устройств. Введение микропроцессоров позволяет *алгоритмизировать* измерительный процесс, что значительно расширяет технические и функциональные возможности приборов.

Программируемые ЦВ, помимо автоматической установки пределов измерений, способны также выполнять:

– первичную обработку данных (определение параметров исследуемого сигнала, величину отклонений и т. п.);

– хранить значения измеренных параметров в блоке памяти;

– производить различные операции с измеренными величинами (сравнение, сложение, умножение на константу);

– производить автокалибровку;

– управлять работой функциональных узлов прибора, производить их диагностику с индикацией состояний;

– регистрировать и выводить данные в нужной форме и т.п.

В качестве примера рассмотрим характеристики *цифрового универсального вольтметра серии В7-73* Минского приборостроительного завода (рис.9.6):

Индикация: ЖКИ с повышенной яркостью – 5 и 1/2 разряда.

Хранение до 200 результатов измерений во внутреннем ОЗУ.

Математическая обработка результатов измерений по 10 программам, в том числе измерение температуры и мощности, тестирование диодов и т.д.

Интерфейсы IEEE 488 (В7-73/1), RS-232 (В7-73/2).

Диапазон измерения постоянного напряжения – 10 мкВ…1000 В (с погрешностью ± 0,01 %).

Диапазон измерения переменного напряжения (от 20 Гц до 100 кГц) – 1 мВ…700 В (с погрешностью ± 0,3 %).

Диапазон измерения постоянного тока – 100 мкА…2 А (с погрешностью ± 0,1 %).

Диапазон измерения переменного тока (от 20 Гц до 5 кГц) – 10 мА…2 А (с погрешностью ± 0,5 %).

Диапазон измерения сопротивления – 0,1 Ом…2 ГОм (с погрешностью 0,06/0,3).

Диапазон измерения частоты – 20 Гц…1 МГц.(с погрешностью ± 0,02 %).

Потребляемая мощность – 10 В·А.

Масса – 3 кг.



Рисунок 9.6

5. До появления цифровых моделей основной технической характеристикой осциллографа считалась ширина полосы частот. Она определяла предельную частоту сигнала, отображаемую с ослаблением не более 3 дБ, и зависела от частотной характеристики канала вертикального отклонения. *Цифровой осциллограф* (*ЦО*), в отличие от аналогового, регистрирует сигналы путем измерения мгновенных значений аналогового сигнала на входе в установленные моменты времени. Эти выборочные значения преобразуются в цифровую форму и хранятся в памяти.

Исходная форма сигнала может быть восстановлена по содержимой в памяти информации о выборках. Поэтому частотные возможности ЦО зависят от нескольких факторов:

– методики преобразования сигнала;

– частоты выборки, используемой в данной методике;

– полосы пропускания выходного усилителя.

Обобщенная структурная схема ЦО приведена на рис.9.7.

Принцип действия осциллографа основан на дискретизации исследуемого сигнала, квантовании каждой выборки сигнала по амплитуде, их запоминании и последующем отображении на экране осциллографа в координатах «амплитуда-время». Выборки соответствуют мгновенным значениям непрерывного исследуемого сигнала в моменты времени, которые задаются тактовыми импульсами стробирования, поступающими с выхода формирователя временного масштаба (ФВМ). Квантование выборок сигнала по амплитуде производится с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), с выхода которого цифровые коды поступают на вход запоминающего устройства выборок (ЗУВ). При этом каждый цифровой код с выхода АЦП, соответствующий выборке выходного сигнала, запоминается в отдельной ячейке ЗУВ.

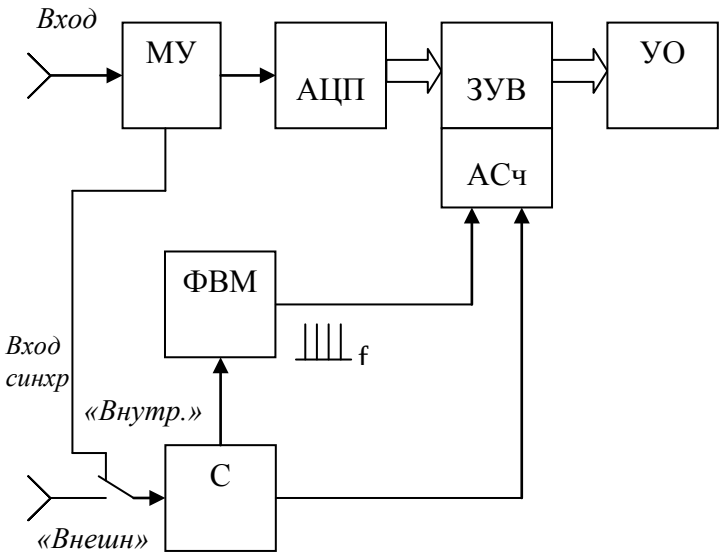


Рисунок 9.7

Переключение ячеек осуществляется с помощью адресного счетчика (АСч), входящего в состав ЗУВ, и происходит в режиме записи сигнала синхронно с появлением каждой новой выборки под воздействием тех же импульсов, которыми стробируют АЦП. Нарастающий по значению выходной код адресного счетчика (адрес) выполняет здесь ту же роль, что и пилообразное напряжение в развертке в аналоговом осциллографе. При этом скорость изменения адреса во времени устанавливает временной масштаб развертки ЦО и определяется частотой следования стробирующих импульсов с выхода формирователя временного масштаба.

После заполнения ЗУВ оно переключается в режим считывания и информация переписывается в память устройства отображения (УО). При этом следует отметить, что передача данных из ЗУВ в устройство отображения производится с неизменной частотой считывания, которая не зависит от скорости дискретизации входного сигнала, т.е. от частоты следования стробирующих импульсов. Таким образом, ЗУВ служит для сопряжения, в соответствии с длительностью исследуемого сигнала, временного масштаба развертки ЦО с неизменным временным масштабом устройства отображения, который необходим для сохранения постоянной яркости изображения на экране ЦО. Согласование амплитудного диапазона исследуемого сигнала с входным диапазоном ЦО достигается с помощью масштабирующего усилителя (МУ), установленного на входе АЦП. Синхронизатор (С) осуществляет выбор внешнего или внутреннего источника синхронизации и формирование синхроимпульсов.

Изображение исследуемого сигнала на экране ЦО является результатом последовательного опроса ячеек памяти устройства отображения и формирования на экране яркостной точки, соответствующей каждой ячейке. При этом положение точки по вертикали определяется значением цифрового кода, записанного в соответствующей ячейке памяти, а по горизонтали – значением цифрового кода адреса этой ячейки. Опрос памяти в устройстве отображения ЦО производится с постоянной частотой. Она выбирается таким

образом, чтобы обеспечить отсутствие мерцания изображения на экране. Благодаря этому качество изображения на экране ЦО не зависит от частоты повторения исследуемого сигнала. Это выгодно отличает его от аналоговых осциллографов. Яркость изображения однократного сигнала на экране ЦО не зависит от времени и не отличается от яркости изображения повторяющегося сигнала.

Существует два основных метода дискретизации сигнала по времени.

1. *Выборка в реальном масштабе времени*

В случае однократных или редко повторяющихся событий вся выборочная информация должна быть получена очень быстро, за время действия этого события. Это достигается при осуществлении скоростной выборки в реальном масштабе времени путем получения ряда выборочных значений в пределах одного периода сигнала и построение исходного сигнала по этим выборочным значениям (рис.9.8).

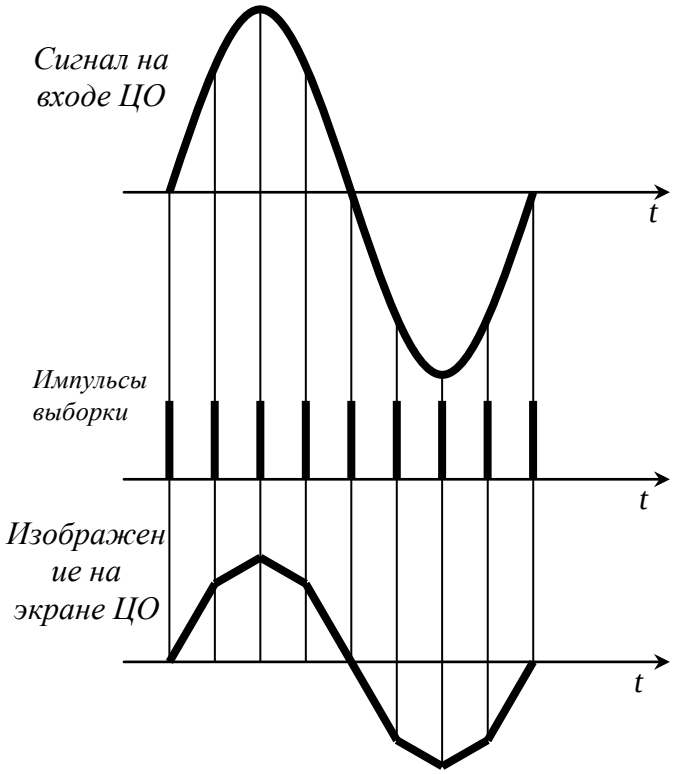


Рисунок 9.8

Наибольшая частота выборочных оценок (скорость выборки) определяет максимальную частоту спектра однократного сигнала, который может быть зарегистрирован и точно воспроизведен. Для правильного восстановления формы синусоидального колебания при точечном представлении его изображения необходимо отобразить на экране не менее 25 точек на период; максимальная частота сигнала оказывается во столько же раз меньше численного значения максимальной частоты дискретизации. Благодаря простоте технической реализации точечное формирование изображения исследуемого сигнала находит применение в простейших ЦО, в сложных приборах для восстановления формы сигнала используют линейную интерполяцию (рис.9.8), функцию *sin x* и др. Обычно принято считать, что для

точного воспроизведения формы колебания требуется не менее десяти выборочных значений одного периода. Следовательно, при частоте выборки 100 МГц в реальном масштабе времени можно зарегистрировать однократные события, имеющие спектр частот до 100 МГц.

2. *Повторная выборка* (*в эквивалентном масштабе времени*)

Если частота периодического сигнала слишком велика для регистрации в режиме однократного анализа, используется метод повторной выборки, при котором вместо регистрации всех отсчетов за один цикл (период) сигнала осциллограф выполняет один или несколько отсчетов в каждом из большого числа периодов, а затем объединяет все данные и синтезирует истинную форму колебания.

Принятый в зарубежной осциллографии термин «*эквивалентный масштаб времени*» в отечественных источниках зачастую именуется как «*трансформированный масштаб времени*» из-за переноса спектра исследуемого сигнала в низкочастотную область. ЦО с эквивалентным масштабом времени позволяют исследовать лишь периодические или повторяющиеся сигналы. В названиях отечественных ЦО такого типа обычно добавляют слово «стробоскопический».

Известны два способа реализации метода повторных выборок: *рандомизированный* и *последовательный*. Наибольшее распространение получила рандомизированная выборка, поскольку она обеспечивает возможность наблюдения сигнала до момента запуска. Суть ее состоит в том, что отсчеты входного сигнала формируются и записываются в память через фиксированные интервалы времени независимо от формы входного колебания и работы схемы запуска. В каждом цикле развертки измеряется временной интервал между моментом запуска и следующим отсчетом. Поскольку тактовый сигнал дискретизации (отсчеты) и входное колебание несинхронны, временные соотношения между ними будут чисто случайными и точки дискретизации будут располагаться произвольно относительно наблюдаемого процесса (рис.9.9). Затем, зная тактовую частоту дискретизатора, можно вычислить моменты, соответствующие всем остальным отсчетам до и после запуска, что позволяет, правильно расположив выборочные значения, реконструировать сигнал.

Реализация рандомизированной дискретизации сигналов с частотой порядка 10 ГГц связана с такой проблемой, как измерение задержек с требуемым субпикосекундным шагом, что труднодостижимо для современной техники. В этих случаях для обработки самых высокочастотных колебаний используется другой метод, получивший название последовательной дискретизации.

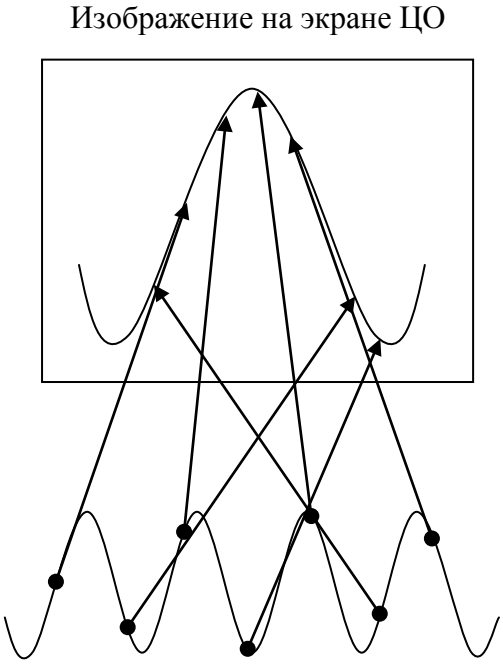


Рисунок 9.9

При *повторной последовательной дискретизации* (рис.9.10) каждая последующая выборка берется в момент, когда начало нового периода запускает схему ЦО плюс увеличивающийся с каждым периодом интервал времени. Таким образом, выборки «стробируются» вдоль сигнала в той последовательности, в какой сигнал поступает в ЦО. Поскольку выборки «запускаются» самим сигналом, то в этом случае скорость выборки устанавливается автоматически. При этом достигается снижение аппаратных затрат и уменьшение энергопотребления, по сравнению с ЦО других типов с такой же полосой пропускания, т.к. в данном случае допустимо использование элементов с ограниченным быстродействием.

В обоих методах повторной выборки максимальная частота периодического сигнала, который может быть зафиксирован цифровым осциллографом, определяется частотной характеристикой усилителей вертикального отклонения осциллографа, а не скоростью выборки.

Одна из тенденций развития современных широкополосных ЦО заключается в создании комбинированных приборов, которые на «медленных» развертках работают в *режиме реального времени*, а на «быстрых» развертках – *в режиме эквивалентного времени*. Этим достигается существенное расширение полосы пропускания при исследовании повторяющихся (периодических) сигналов. При этом, как правило, благодаря высокому уровню автоматизации управления современными комбинированными ЦО, оператор не ощущает разницы между работой в реальном и эквивалентном времени.

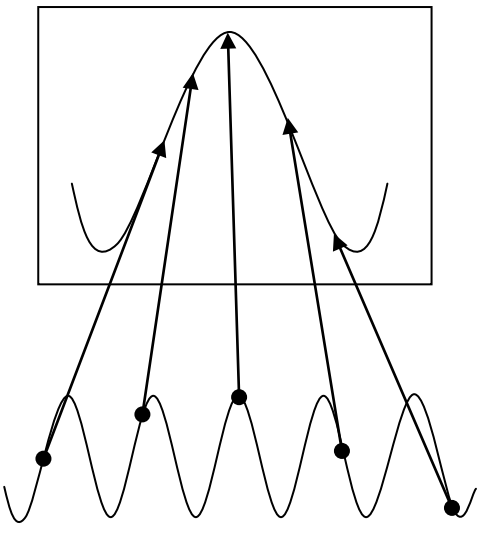


Рисунок 9.10

Разрешающая способность любого осциллографа характеризует его способность раздельно воспроизводить мелкие детали изображения исследуемого сигнала. До появления ЦО увеличение разрешающей способности достигалось путем увеличения размеров экрана ЭЛТ при уменьшении толщины линии луча. Так, например, экран ЭЛТ большинства современных аналоговых осциллографов имеет размеры 80×100 мм при толщине луча 0,4 мм. Это значит, что аналоговый осциллограф способен раздельно отобразить на своем экране не более 100/0,4=250 точек по

горизонтали и 80/0,4=200 по вертикали. При этом разрешающая способность такого осциллографа по горизонтали может быть определена как обратная величина полученного отношения, т.е. $1/250=4\times10^{-3}$, а по вертикали – $1/200=5\times10^{-3}$.

Разрешающая способность ЦО по горизонтали составляет 1/1000 – 1/50000, т.е. по сравнению с аналоговыми осциллографами разрешающая способность ЦО с цифровой разверткой увеличивается в 4…200 раз.

Разрешающая способность ЦО по вертикали определяется количеством уровней квантования исследуемого сигнала 2^N, которое, в свою очередь, зависит от количества двоичных разрядов N аналого-цифрового преобразователя в битах и у современных ЦО составляет от 6 до 15 бит.

Потребность в ЦО с высокой разрешающей способностью возникает при спектральном анализе сигналов и исследовании тонкой структуры сложного сигнала, например, неравномерности вершины импульса большой амплитуды, помех, возникающих при коммутации сигналов, шумов и т.д.

При исследовании однократных процессов преимущества ЦО становятся исключительно важными. Например, переходные процессы при замыкании контактов переключателя или включении источника питания удобно исследовать именно с помощью ЦО. В памяти такого прибора могут записываться и храниться длинные реализации, которые затем могут детально изучаться в течение неограниченного времени. Такие возможности в аналоговых осциллографах просто отсутствуют. Однако главным преимуществом ЦО является возможность исследования «предыстории» однократного сигнала, т.е. запоминания и отображения участка однократного сигнала, предшествующего моменту запуска (режим *предзапуска*). Режим предзапуска позволяет, например, изучать состояние материалов и конструкций непосредственно перед их разрушением (при испытании на прочность), наблюдать сигнал непосредственно перед возникновением сбоя в электронной схеме, исследовать причины возникновения различных явлений в сейсмологии, медицине, биологии и других областях.

Новые, необычные для пользователя возможности предоставляют режим «*выделения пиков*». При этом в памяти ЦО фиксируется последовательность не мгновенных значений исследуемого сигнала в точках дискретизации, а последовательность минимальных и максимальных значений, которые принимает сигнал в течение каждого интервала дискретизации. В этом режиме, в отличие от классического метода дискретизации, не теряется информация об исследуемом сигнале в интервалах между моментами дискретизации. В результате открывается возможность наблюдения огибающей сигнала, регистрации и отображения на экране ЦО практически любых изменений исследуемого сигнала, например, коротких всплесков сигнала длительностью меньше интервала дискретизации. При этом существенно увеличивается разрешающая способность ЦО по времени. Режим «выделения пиков» может использоваться при исследовании как периодических, так и однократных сигналов и удобен при исследовании шумовых характеристик, нестабильности, воздействия кратковременных помех и др.

Большинство ЦО, кроме средств наблюдения процессов, предшествующих моменту запуска, и возможностей анализа зарегистрированных сигналов в течение неограниченного времени, располагает также различными режимами автоматического измерения параметров исследуемого сигнала. Например, для измерения таких параметров, как длительность импульса, время его нарастания или спада, размах сигнала, его частоту, период, величину напряжения или временной интервал между двумя метками и многое другое, достаточно нажатия на панели осциллографа одной клавиши, после чего результат измерения индицируется в удобной форме на экране ЦО.

Исключительно удобный режим работы ЦО, предусматриваемый изготовителями во многих моделях – автоматический поиск сигнала, иногда его называют *автоустановкой* или *автоматическим выбором масштаба*. В этом режиме прибор не только самостоятельно устанавливает масштабы по вертикальной и горизонтальной осям, но и выбирает момент запуска для стабильного отображения на экране ЦО.

В качестве примера рассмотрим характеристики *ЦО с режимом подсвечивания TDS-3000* фирмы *Tektronix* (рис.9.11):



Рисунок 9.11

Вертикальное разрешение 9-бит, max длина записи 10К точек
Чувствительность по вертикали: 1 мВ/дел…10 В/дел, точность по вертикали: ± 2%
Математическая обработка осциллограмм: сложение, вычитание, умножение, деление, инвертирование
21 режим автоматических измерений, режим преобразование Фурье
Память: 4 осциллограммы + 10 профилей настроек управления
Встроенный дисковод 3,5" форматы файлов: set, isf, csv, dat, tj, dj, lj, ibm, img, tif, rle, pcx, bmp, eps
LPT-порт: Centronics, интерфейс RS-232, GPIB: только с модулем TDS3GM, Интерфейс LAN: только с модулем TDS3EM
Дисплей: ЖК 16 цветов 640×480, диагональ 165 мм
Габариты: 375×176×149 мм
Вес:3,2 кг, с аккумулятором 5,2 кг

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.197-209, 269-271.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.72-86.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.134-154, 212-228.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.74-88.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Современное состояние и перспективы развития цифровых вольтметров
2. Современное состояние и перспективы развития цифровых осциллографов. Скопметры и их применение

Тема 10 Измерение неэлектрических величин

План лекции

1. Первичные измерительные преобразователи
2. Измерение температуры
3. Измерение давления
4. Измерение и контроль уровня жидкостей и сыпучих материалов

1. Комплексная автоматизация технологических процессов предполагает контроль и измерение различных физических величин, характеризующих состояние объекта управления (регулирования) – механических, тепловых, оптических и других неэлектрических. Преимущества же электроизмерительных приборов и преобразователей очевидны. Этим обстоятельством объясняется широкое распространение *первичных измерительных преобразователей (датчиков)*, предназначенных для измерений неэлектрических величин и преобразования их в электрические.

Первичные измерительные преобразователи чрезвычайно разнообразны по принципу действия, устройству, видам входного и выходного сигналов, функциональному назначению, метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

В зависимости от выходного параметра первичные измерительные преобразователи разделяют на *параметрические* и *генераторные*. Их классифицируют также по физической природе явлений, лежащих в основе их работы, по принципу действия и др.

Выходной величиной в параметрических преобразователях является параметр электрической цепи – электрическое сопротивление или его составляющие (R, L, C). Для использования параметрического преобразователя необходим дополнительный источник питания, обеспечивающий образование выходного сигнала преобразователя.

К наиболее часто применяемым параметрическим преобразователям

относятся *реостатные*, *тензочувствительные* (*тензорезисторы*), *термочувствительные* (*терморезисторы* или *термометры сопротивления*), *индуктивные*, *емкостные, оптоэлектронные* (*фоторезисторы, фотодиоды* и др.), *ионизационные* и др.

Принцип действия *реостатных преобразователей* основан на изменении электрического сопротивления проводника под влиянием входной величины – механического перемещения. Реостатный преобразователь (рис.10.1) представляет собой реостат, подвижный контакт которого перемешается под действием измеряемой неэлектрической величины. Обмотку преобразователя изготавливают из сплавов (платина с иридием, константан, нихром, фехраль и др.).

Подобные преобразователи обладают статической характеристикой преобразования со ступенчатым характером, поскольку сопротивление измеряется скачками, равными сопротивлению одного витка, что вызывает погрешность

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R},$$

где ΔR – сопротивление одного витка;

R – полное сопротивление преобразователя.

Эта погрешность отсутствует в *реохордных* преобразователях, в которых щетка скользит вдоль оси проволоки.

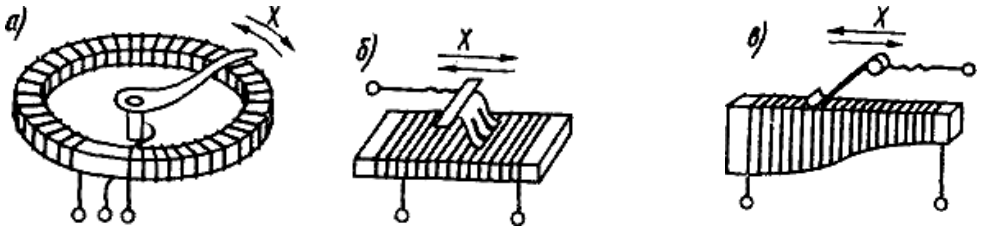


Рисунок 10.1 − Реостатные преобразователи для угловых и линейных перемещений

Для получения нелинейной функции преобразования применяют *функциональные* реостатные преобразователи. Нужный характер преобразования часто достигается профилированием каркаса преобразователя (рис.10.1, в).

Достоинства реостатного преобразователя: относительная простота конструкции, возможность получения высокой точности преобразования и значительных по уровню выходных сигналов. Основной недостаток – наличие скользящего контакта.

Принцип действия *индуктивных преобразователей* основан на зависимости

индуктивности или взаимной индуктивности обмоток на магнитопроводе от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи (рис.10.2).

На рис. 10.2 схематически показаны различные типы индуктивных преобразователей. Индуктивный преобразователь (рис. 10.2, а) *с переменной длиной воздушного зазора* δ характеризуется нелинейной зависимостью L = f (δ). Такой преобразователь обычно применяют при перемещениях якоря на 0,01—5 мм. Значительно меньшей чувствительностью, но линейной зависимостью *L = f (s)* отличаются преобразователи с переменным сечением воздушного зазора (рис. 10.2, *б)*. Эти преобразователи используют при перемещениях до 10…15 мм.

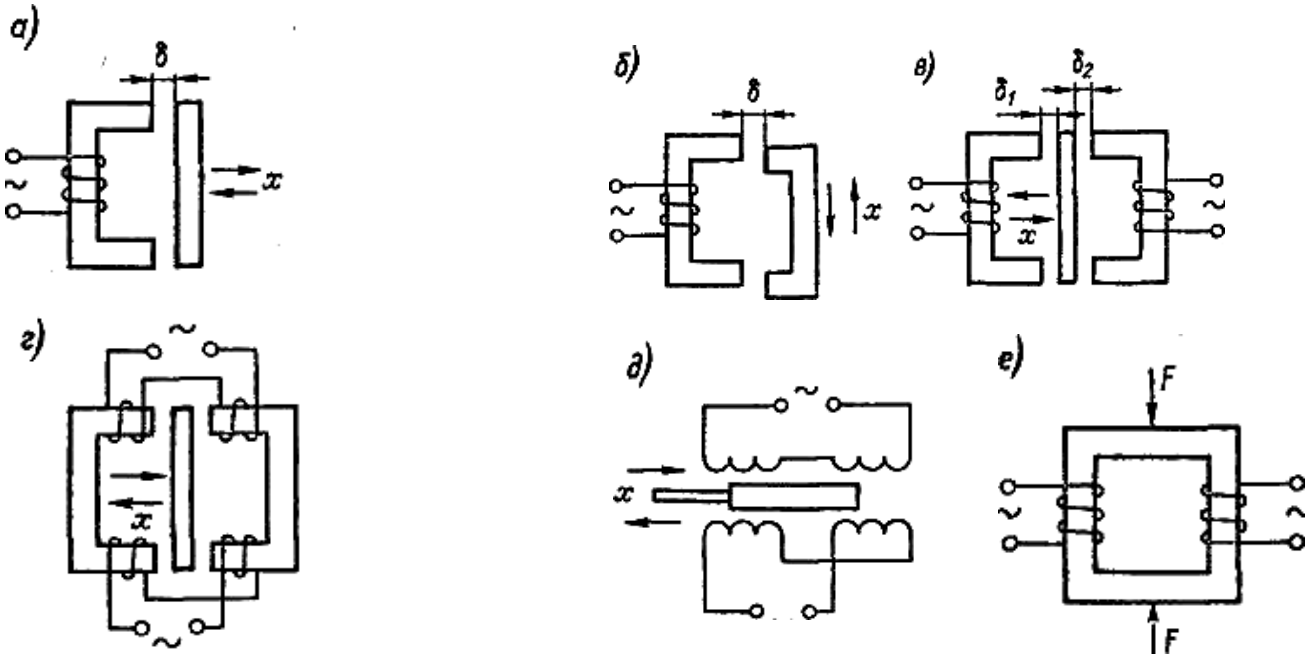


Рисунок 10.2 − Различные конструкции индуктивных преобразователей

Широко распространены *индуктивные дифференциальные преобразователи* (рис. 10.2, *в),* в которых под воздействием измеряемой величины одновременно и притом с разными знаками изменяются два зазора электромагнитов. Дифференциальные преобразователи в сочетании с соответствующей измерительной цепью (обычно мостовой) имеют более высокую чувствительность, меньшую нелинейность характеристики преобразования, испытывают меньшее влияние внешних факторов и сниженное результирующее усилие на якорь со стороны электромагнита, чем недифференциальные преобразователи.

На рис. 10.2, *г* показана схема включения *дифференциального индуктивного преобразователя*, у которого выходными величинами являются взаимные индуктивности. Такие преобразователи называют взаимно-индуктивными или трансформаторными. При питании первичной обмотки переменным током и при симметричном положении якоря относительно электромагнитов ЭДС на выходных зажимах равна нулю. При перемещении якоря на выходных зажимах появляется ЭДС.

Для преобразования сравнительно больших перемещений (до 50…100 мм)

применяют *трансформаторные преобразователи с незамкнутой магнитной цепью* (рис. 10.2, *д)*.

В горной промышленности получили распространение *магнитоупругие преобразователи* (рис. 10.2, *е*), действие которых основано на использовании эффекта зависимости магнитной проницаемости (магнитного сопротивления цепи) от величины механического воздействия (сжатия или растяжения) на ферромагнитный сердечник преобразователя. Различают магнитоупругие датчики *дроссельного* и *трансформаторного* типов. Последние могут контролировать только усилие сжатия, однако обладают большей чувствительностью.

Достоинствами индуктивных и магнитоупругих преобразователей являются простота и надежность в работе, значительная мощность выходных сигналов. Основными недостатками – обратное воздействие преобразователя на исследуемый объект (воздействие электромагнита на якорь) и влияние инерции якоря на частотные характеристики прибора.

Принцип действия *емкостных преобразователей* основан на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок и от значения диэлектрической проницаемости среды между ними. Они представляют собой конденсаторы различных конструкций, преобразующие механические линейные или угловые перемещения, а также давление, влажность или уровень среды в изменение электрической емкости.

Из курса физики известно, что емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\xi_0 \cdot \xi \cdot S}{\delta},$$

где ξ_0 – диэлектрическая постоянная;

ξ – относительная диэлектрическая проницаемость между обкладками;

S – активная площадь обкладок;

δ – расстояние между обкладками.

Исходя из этого выражения можно утверждать, что преобразователь может быть построен с использованием зависимостей $C = f_1(\xi)$, $C = f_2(S)$, $C = f_3(\delta)$.

Преобразователь на рис. 10.3, а представляет собой конденсатор, одна пластина которого перемещается под действием измеряемой величины ***x*** относительно неподвижной пластины. Статическая характеристика преобразования $C=f(\delta)$ нелинейна. Чувствительность преобразователя возрастает с уменьшением расстояния δ. Такие преобразователи используют для измерения малых перемещений (менее 1 мм).

в)

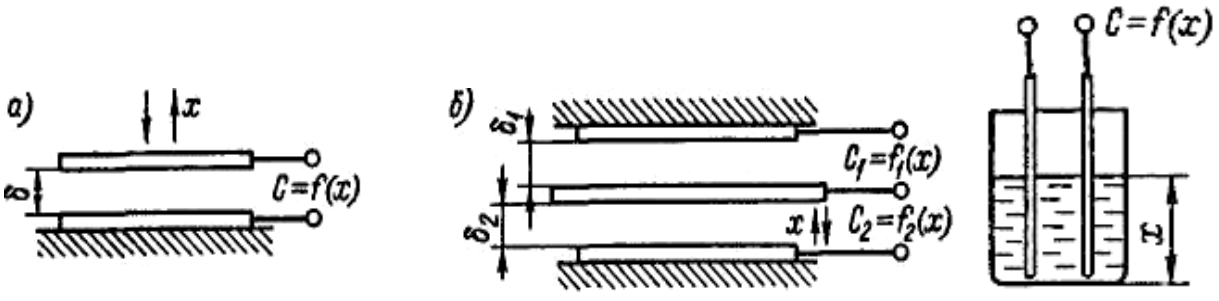


Рисунок 10.3

Применяют также *дифференциальные преобразователи* (рис. 10.3, б), у которых имеется одна подвижная и две неподвижные пластины. При воздействии измеряемой величины $\boldsymbol{x}$ у этих преобразователей одновременно изменяются емкости C_1 и C_2. Такие преобразователи используют для измерения сравнительно больших линейных (более 1 мм) и угловых перемещений. В этих преобразователях легко получить требуемую характеристику преобразования путем профилирования пластин.

Преобразователи с использованием зависимости $C = f_1(\xi)$ применяют для измерения уровня жидкостей, влажности веществ, толщины изделий из диэлектриков и т. п. Для примера (рис. 10.3, в) приведем устройство *емкостного уровнемера*. Емкость между электродами, опущенными в сосуд, зависит от уровня жидкости, так как изменение уровня ведет к изменению средней диэлектрической проницаемости среды между электродами. Изменением конфигурации пластин можно получить желаемый характер зависимости показаний прибора от объема (массы) жидкости.

Для измерения выходного параметра емкостных преобразователей применяют мостовые цепи и цепи с использованием резонансных контуров. Последние позволяют создавать приборы с высокой чувствительностью, способные реагировать на перемещения порядка 10^{-7} мм. Цепи с емкостными преобразователями обычно питают током повышенной частоты (до десятков мегагерц), что вызвано желанием увеличить сигнал, попадающий в измерительный прибор, и необходимостью уменьшить шунтирующее действие сопротивления изоляции.

Достоинства емкостных датчиков: простота конструкции, малые размеры и масса, высокая чувствительность и малая инерционность. Основные недостатки – необходимость в источниках питания повышенной частоты и вредное влияние паразитных емкостей, температуры, влажности и внешних электрических полей.

Полупроводниковые фоточувствительные преобразователи в качестве чувствительного элемента имеют светочувствительный слой, нанесенный на подложку (стеклянную пластинку). Сопротивление этого слоя обратно пропорционально интенсивности светового потока или мощности источника освещения. *Фоторезисторы*, *фотодиоды* и *фототранзисторы* обладают сравнительно высокой стабильностью, хорошей чувствительностью, но их применение ограничивается при наличии пыли, например угольной, препятствующей нормальной работе.

Действие *ионизационных преобразователей* основано на явлении ионизации газа или люминесценции некоторых веществ под действием ионизирующего излучения. В качестве ионизирующих агентов применяют α–, β– и γ–лучи радиоактивных веществ, иногда *рентгеновские лучи* и *нейтронное излучение*. Выбор типа ионизационного преобразователя зависит во многом от ионизирующего излучения. *Гамма–лучи* (электромагнитные колебания малой длины волны – 10^{-8}…10^{-11} см) обладают большой проникающей способностью.

Проходя через вещество лучи ослабляются

$$J = J_0 \cdot \cdot exp\ (-\mu\, d),$$

где J – интенсивность γ–лучей, прошедших через вещество (тело);

J_0 – интенсивность поступающих в вещество (тело) γ–лучей;

μ – коэффициент ослабления;

d – толщина слоя вещества (тела).

Таким образом, с помощью γ–лучей либо другого ионизирующего излучения можно измерять толщину слоя изделий, плотность жидкостей и газов и др.

Конструкции ионизационных камер и счетчиков разнообразны и зависят от вида излучения. В качестве источников ионизирующего излучения обычно используют кобальт-60, стронций-90, плутоний-239 и др.

Преимущества ионизационных преобразователей – в возможности бесконтактных измерений в агрессивных или взрывоопасных средах, средах, имеющих высокою температуру или находящихся под большим давлением. Основной недостаток: необходимость применения биологической защиты при высокой активности источника излучения.

В *генераторных преобразователях* выходной величиной является ЭДС или заряд, функционально связанный с измеряемой неэлектрической величиной. К генераторным преобразователям относят термоэлектрические преобразователи (термопары), пьезопреобразователи, тахогенераторы и др.

Тахогенераторы предназначены для измерения угловой скорости вращающихся объектов. Ротор тахогенераторов механически связывают с валом испытуемого электродвигателя или исполнительного механизма, а об угловой скорости *w* судят по выходной ЭДС генератора.

Из тахогенераторов наибольшее распространение получили *тахогенераторы постоянного тока*, выпускаемые с постоянными магнитами либо с независимым возбуждением. Область их применения весьма разнообразна: прецизионные тахогенераторы постоянного тока используются в авиации, судостроении, станкостроении, металлургической и других отраслях промышленности. К преимуществам этих датчиков относят достаточно высокую точность и наличие выходного сигнала постоянного тока, удобного для последующей обработки. Основным недостатком этих тахогенераторов является наличие коллекторно-щеточного узла, снижающего надежность работы и долговечность преобразователя.

Синхронные тахогенераторы имеют малое внутреннее сопротивление, что позволяет получить от них достаточно большие мощности. При изменении частоты вращения ротора в синхронных машинах изменяется не только амплитуда выходного напряжения, но и его частота. Благодаря механической устойчивости синхронные тахогенераторы нашли применение в трамваях, локомотивах, крановом хозяйстве и др.

Асинхронные тахогенераторы по конструкции подобны двухфазным асинхронным двигателям. Их роторы обычно выполняют в виде тонкостенного металлического цилиндра. Две обмотки статора тахогенератора сдвинуты на

90° относительно друг друга. К одной обмотке подводят напряжение питания, а с измерительной обмотки снимают ЭДС. При подаче напряжения питания постоянной величины и частоты пульсирующий магнитный поток, пересекая ротор, индуктирует в измерительной обмотке ЭДС, пропорциональную угловой скорости *w* ротора, приводимого в движение контролируемой машиной или механизмом. Основное достоинство асинхронных тахогенераторов состоит в том, что независимо от частоты вращения ротора ЭДС переменного тока на выходе такого тахогенератора имеет постоянную частоту.

К основным недостаткам тахогенераторов относят ограниченный частотный диапазон измеряемых величин. В последние годы тахогенераторы постепенно вытесняются *фотоимпульсными* и *индукционными* датчиками, а также специальными *интеллектуальными* преобразователями – *шифраторами углового перемещения (положения)*.

В *фотоимпульсных датчиках* импульсы в оптоэлектронной паре источник излучения – приемник излучения (светодиод – фотопреобразователь) создаются при помощи дисков с прорезями или отверстиями, в некоторых приводах применяют вращающиеся детали машин. В подавляющем большинстве *шифраторов положения* также используют в качестве чувствительного элемента оптоэлектронную пару.

Импульсы *индукционных датчиков* создаются под влиянием пульсирующего или знакопеременного магнитного потока. В качестве тела, модулирующего поток, служат специальные зубчатые колеса либо вращающиеся ферромагнитные детали машин.

В пьезоэлектрических преобразователях используется эффект появления электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов *(кварц, турмалин, сегнетова соль* и др.) под влиянием механических напряжений.

В пьезоэлектрических преобразователях главным образом применяют кварц, у которого пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокой механической прочностью и высокими изоляционными качествами, а также с независимостью пьезоэлектрической характеристики от температуры в широких пределах. Используют также *поляризованную керамику* из титаната бария, титаната и цирконата свинца. Пьезоэлектрические датчики обычно применяют для измерений быстропротекающих динамических процессов при ударных нагрузках, вибрациях, переменных усилиях и т.д.

Рекомендуемая литература

1. Электрорадиоизмерения: Учебник / В.Ю. Шишмарев, В.И. Шанин. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. С.77-91.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.37-48.
3. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.38-50.

Контрольные задания для СРС [1-3]

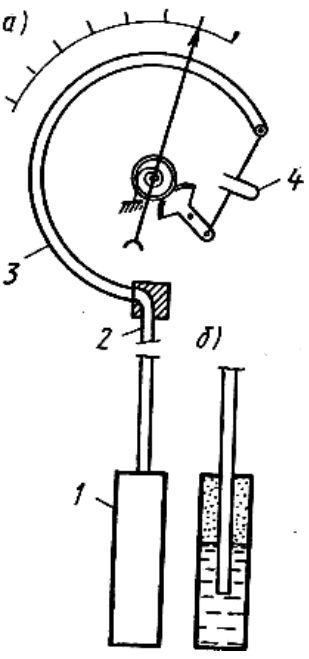
1. Параметрические измерительные преобразователи
2. Генераторные измерительные преобразователи

2. В зависимости от типа используемого термопреобразователя различают *термометры расширения, манометрические термометры, термометры сопротивления*, *термоэлектрические преобразователи* и *пирометры излучения*.

Таблица 10.1 – Наиболее распространенные промышленные средства измерения и контроля температуры

Термометрическое свойство	Наименование средства	Диапазон измерений, °С
Изменение давления рабочего вещества при постоянном объеме	Манометрические термометры: газовые жидкостные конденсационные	 -150÷600 -150÷600 -50÷350
Термоэлектрический эффект (термоЭДС)	Термоэлектрические преобразователи	-200÷2200
Изменение электрического сопротивления	Металлические термометры сопротивления	-260÷1100
	Полупроводниковые термометры сопротивления	-240÷300
Тепловое излучение	Пирометры излучения: квазимонохроматические спектрального отношения радиационные	 700÷6000 1400÷2800 50÷3500

Термобаллон *манометрического термометра* (рис.10.4) представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальной стали, стойкой к химическому воздействию измеряемой среды. Диаметр термобаллона находится в пределах 5-30 мм, а его длина 60-500 мм. Капилляр, соединяющий термобаллон с манометрической пружиной, представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром 0,1-0,5 мм. Длина капиллярной трубки в зависимости от эксплуатационных требований может быть от нескольких сантиметров до 60 м. Медные капилляры имеют стальную защитную оболочку, предохраняющую их от повреждений при монтаже и эксплуатации.



В зависимости от конструкции измерительной системы манометрические системы бывают *показывающими*, *самопишущими*, *бесшкальными* со встроенными датчиками для дистанционной передачи показаний на расстояние.

Манометрические термометры – достаточно простые устройства, позволяющие осуществлять автоматическую регистрацию измерений и передачу показаний на расстояние. В настоящее время промышленностью выпускаются манометрические термометры с унифицированными пневматическим и электрическим (постоянного тока) выходными сигналами классов точности 1; 1,5; 2,5. Важное достоинство этих термометров – возможность использования их на взрывоопасных объектах.

Рисунок 10.4

Принцип действия *терморезистора* основан на зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры. Распространение получили терморезисторы, выполненные из медной и платиновой проволоки. Стандартные *платиновые терморезисторы* применяют для измерения температуры в диапазоне от –260 до +1100 °С, *медные* – в диапазоне от –200 до +200 °С (ГОСТ 6651–78). Низко-температурные платиновые терморезисторы (ГОСТ 12877–76) применяют для измерения температуры в пределах от –261 до –183°С.

На рис. 10.5, *а* показано устройство платинового терморезистора.

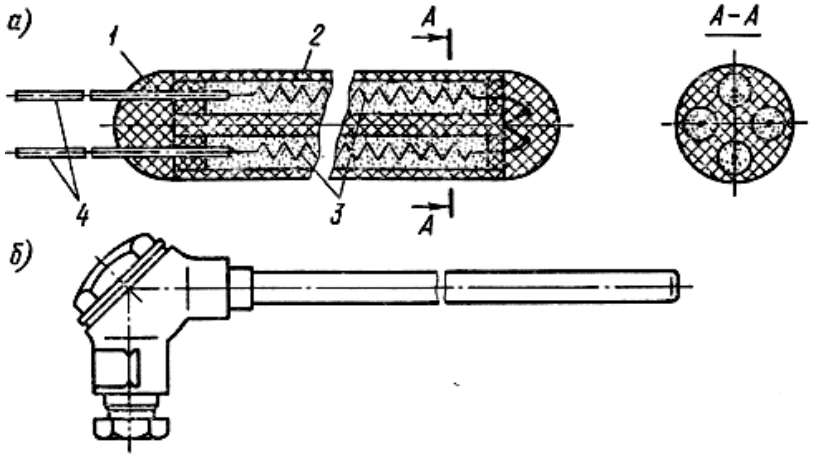


Рисунок 10.5 – Устройство и внешний вид арматуры платинового терморезистора

В каналах керамической трубки *2* расположены две (или четыре) секции спирали *3* из платиновой проволоки, соединенные между собой последовательно. К концам спирали припаивают выводы *4,* используемые для включения терморезистора в измерительную цепь. Крепление выводов и герметизацию керамической трубки производят глазурью *1*. Каналы трубки засыпают порошком безводного оксида алюминия, выполняющим роль изолятора и фиксатора спирали. Порошок безводного оксида алюминия, имеющий высокую теплопроводность и малую теплоемкость, обеспечивает хорошую передачу теплоты и малую инерционность терморезистора.

Для защиты терморезистора от механических и химических воздействий внешней среды его помещают в защитную арматуру (рис. 10.5, *б)* из нержавеющей стали.

Для медных терморезисторов зависимость сопротивления от температуры выражается уравнением

$$R=R_0\cdot(1+\alpha\, t) \quad \text{при} \quad -50\ ^0\text{C} \le t \le +180\ ^0\text{C},$$

где R_0 – сопротивление при t=0 ^{0}C; $\alpha = 4{,}26\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

Для платиновых –

$$R=R_0\cdot[1+A\, t+B\, t^2] \quad \text{при} \quad 0\ ^0\text{C} \le t \le +650\ ^0\text{C},$$

где A=3,968·10^{-3} К$^{-1}$; B=5,847·10^{-7} К$^{-2}$; C=–4,22·10^{-12} К$^{-4}$.

Платина является наилучшим материалом для термометров сопротивления, поскольку легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления и высокое удельное сопротивление.

Платиновые термопреобразователи сопротивления являются наиболее точными первичными преобразователями в диапазоне температур, где они могут быть использованы. Платиновые термопреобразователи сопротивления используются в качестве рабочих, образцовых и эталонных термометров. С помощью последних осуществляется воспроизведение международной шкалы температур в диапазоне от –182,97 до 630,5 °С.

Помимо платины и меди, для изготовления терморезисторов используют также *никель* (в странах дальнего зарубежья).

Для измерения температуры применяют также полупроводниковые терморезисторы (*термисторы* и *позисторы*) различных типов, которые характеризуются большой чувствительностью (температурный коэффициент сопротивления ТКС термисторов отрицательный и при 20°С в 10–15 раз превышает ТКС меди и платины, ТКС позисторов положительный и несколько хуже) и имеют более высокие сопротивления (до 1 МОм) при весьма малых размерах. В качестве материалов для них используются различные полупроводниковые вещества – оксиды магния, кобальта, марганца, титанат меди, кристаллы германия. Недостаток термисторов – плохая воспроизводимость и нелинейность характеристики преобразования.

Термисторы используются в диапазоне температур от –60 до +120° С.

$$R = R_0 \cdot \exp\left[B \cdot \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_0} \right) \right],$$

где R и R_0 – сопротивления терморезистора при температурах соответственно t и t_0;

t_0 – начальная температура рабочего диапазона;

B – коэффициент преобразования.

К термочувствительным преобразователям относят также *термодиоды* и *термотранзисторы*, у которых при изменении температуры изменяется величина сопротивления p-n перехода. Эти приборы обычно применяются в диапазоне от –80° до +150° С. Чаще всего термодиоды и термотранзисторы включают в мостовые цепи и измерительные схемы в виде делителей

напряжения.

К достоинствам таких преобразователей относят высокие чувствительность и надежность, малые габариты, невысокую стоимость и малую инерционность. Основные недостатки: узкий диапазон рабочей температуры и плохая воспроизводимость статической характеристики преобразователя.

Электрический *термометр сопротивления* представляет собой терморезистор, включенный в измерительную цепь, которой в большинстве случаев является уравновешиваемый или неравновесный измерительный мост. Терморезистор может быть включен в мост по двухпроводной или трехпроводной схеме. Для уменьшения погрешности от изменения сопротивления соединительных проводов применяют трехпроводную схему (рис.10.6).

В этой схеме два провода включены в соседние плечи моста, а третий – в диагональ питания. При работе этой цепи в равновесном режиме и при условии, что $R_1 = R_3$, а $R_{Л1} = R_{Л2}$, погрешность от изменения сопротивления проводов отсутствует. При работе же в неравновесном режиме погрешность значительно меньше, чем при двухпроводной схеме включения.

Для измерения температуры с помощью стандартных *медных* и *платиновых терморезисторов* промышленность выпускает *автоматические мосты* классов точности 0,25; 0,5.

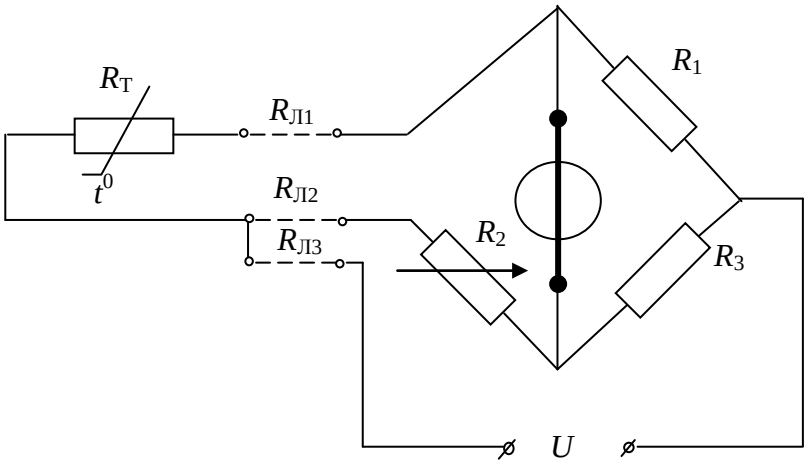


Рисунок 10.6 – Трехпроводная схема измерительного моста термометра сопротивления

Термоэлектрические преобразователи (ТЭП) работают на термоэлектрическом эффекте, возникающем в цепи *термопары*: при разности температур в точках *1* и *2* (рис.10.7) соединения двух разнородных проводников в цепи термопары возникает *термоЭДС*.

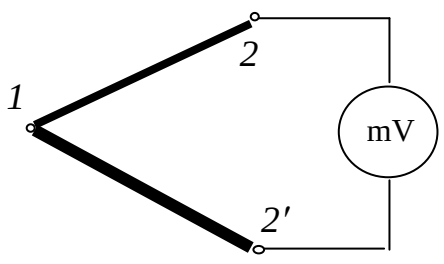


Рисунок 10.7

Точку соединения проводников (электродов) *1* называют рабочим концом термопары, точки *2* и *2'* – свободными концами. Чтобы термоЭДС в цепи термопары однозначно определялась температурой рабочего конца, необходимо температуру свободных концов термопары поддерживать одинаковой и неизменной.

Возникновение термотока или термоЭДС в современной физике объясняется тем, что различные металлы обладают различной работой выхода электронов и поэтому при соприкосновении двух разнородных металлов возникает контактная разность потенциалов. Кроме того, при различии температур концов проводников в них возникает диффузия электронов, приводящая к возникновению разности потенциалов на концах. Таким образом, оба указанных фактора – контактная разность потенциалов и диффузия электронов – являются слагаемыми результирующей термоЭДС цепи, значение которой зависит в итоге от природы термоэлектродов и разности температур спаев ТЭП.

Для удобства стабилизации температуры свободных концов термопару иногда удлиняют с помощью так называемых удлинительных проводов, выполненных либо из соответствующих термоэлектродных материалов, либо из специально подобранных материалов, более дешевых, чем электродные, и удовлетворяющих условию термоэлектрической идентичности с основной термопарой в диапазоне возможных температур свободных концов (обычно от 0 до 100°С). Иначе говоря, удлинительные провода должны иметь в указанном интервале температур такую же зависимость термоЭДС от температуры, что и у основной термопары.

Для предохранения от механических повреждении и вредного влияния объекта измерения термоэлектроды преобразователя помещают в защитную арматуру.

На рис. 10.8, *а* показано устройство стандартного термоэлектрического термометра. В жесткой защитной гильзе *1* расположены термоэлектроды *3* с надетыми на них изоляционными бусами *4*. Спай *2* касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника. К термоэлектродам в головке *8* винтами *6* на розетке *5* подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нем с помощью штуцера *9*. Для обеспечения надежного контакта спай *2* изготавливают сваркой, реже пайкой или скруткой (для высокотемпературных ТЭП).

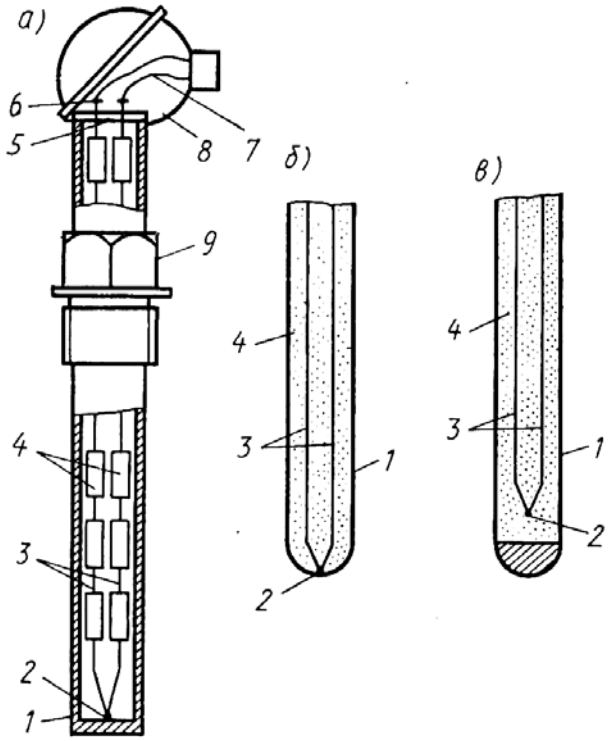


Рисунок 10.8

Защитную гильзу *1* выполняют в виде цилиндрической или конической трубки из газонепроницаемых материалов диаметром примерно 15-25 мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до 2500 - 3500 мм. Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы из тугоплавких соединений, а также кварц и фарфор. Диаметр термоэлектродов составляет 2-3 мм, кроме термоэлектродов платиновой группы, диаметр которых 0,5 мм, что связано с их высокой стоимостью. Стандартные ТЭП выпускают одинарными, двойными и поверхностными — для измерения температуры стенок объекта, когда доступ внутрь объекта затруднителен или невозможен.

В настоящее время широкое применение находят термоэлектрические термометры кабельного типа (рис. 10.8, *б, в)*.

В тонкостенной оболочке *1* размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком *4.* Рабочий спай *2* может иметь контакт с оболочкой (рис. 10.5, *б)* или изолируется от нее (рис. 10.8, *в)*. Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром 0,5-6 мм, длиной 10-30 м. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры можно использовать в интервале температур от –50 до 300°С при давлении в 40 МПа. Внутрь оболочки кабеля помещены от одного до трех ТЭП.

Основной недостаток термопар – значительная инерционность (в обычной арматуре показатель тепловой инерции составляет несколько минут). В настоящее время известны конструкции малоинерционных термопар, у которых показатель тепловой инерции составляет не более 5 с.

В табл.10.2 приведены характеристики термопар в соответствии с ГОСТ 6616–74. Для измерения высоких температур используют термопары типов ТПП, ТПР и ТВР. Термопары из благородных металлов (ТПП и ТПР) применяют при измерениях с повышенной точностью.

Таблица 10.2 – Характеристики стандартных термопар

Тип термо-пары	Материалы электродов термопар	ТермоЭДС (при $t_{р.к.}$=100 ^{0}C, $t_{с.к.}$=0 ^{0}C), мВ	Верхний предел измеряемой температуры, ^{0}C	
			длительно	кратковременно
ТПП	Платинородий (10% родия) - платина	0,64	1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия) – платинородий (6% родия)	13,81 (при $t_{р.к}$=1800 ^{0}C)	1600	1800
ТХА	Хромель (90% Ni+10% Cr) – алюмель (94,83% Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si+ 0.17 Fe)	4,10	1000	1300
ТХК	Хромель – копель (56% Cu + 44% Ni)	6,90	600	800
ТВР	Вольфрамрений (5% рения) – вольфрамрений (20% рения)	1,33	2200	2500

Термоэлектрические термометры состоят из термоэлектрического преобразователя (термопары) и электроизмерительного прибора (милливольтметра или компенсатора).

Показания милливольтметра при постоянных значениях сопротивления проводников и R_{mV} определяются значением ЭДС термопары и, следовательно, измеряемой температурой. Шкала прибора в этом случае градуируется с указанием типа термопары и выбранного значения внешнего сопротивления. Для подгонки внешнего сопротивления до значения, при котором производилась градуировка (0,6; 5; 15 или 25 Ом), используют уравнительный резистор $R_У$.

На рис. 10.9 приведена схема термоэлектрического термометра с милливольтметром, в которой *УП* и *СП* — соответственно удлинительные и соединительные провода; mV — милливольтметр; $R_У$ — уравнительный резистор.

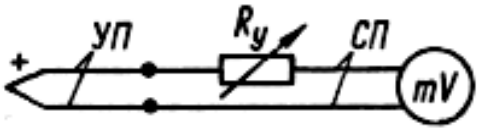


Рисунок 10.9 – Термоэлектрический термометр

Сопротивление проводов изменяется при колебаниях температуры воздуха. Для уменьшения влияния изменения сопротивления термопары и проводов применяют милливольтметры с большим внутренним сопротивлением.

На рис. 10.11 приведена схема термометра с автоматическим введением

поправки на изменение температуры свободных концов термопары. Для этого последовательно в цепь термопары и милливольтметра включают неравновесный мост, в котором резистор R_1 выполнен из меди и находится в зоне, имеющей температуру свободных концов термопары; резисторы R_2, R_3 и R_4 сделаны из манганина.

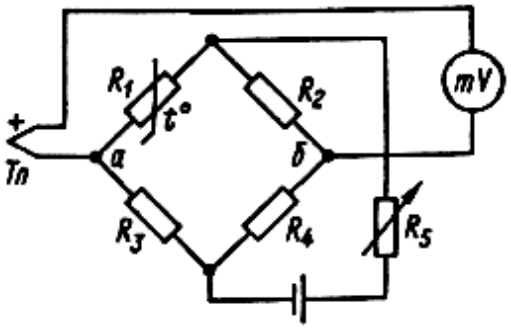


Рисунок 10.11 – Термоэлектрический термометр с автоматическим вводом поправки на изменение температуры свободных концов термопары

При градуировке термометра мост находится в равновесном состоянии. В процессе эксплуатации при отклонении температуры свободных концов термопары от значения, при котором производилась градуировка, на диагонали моста *а-б* появляется разность потенциалов, суммирующаяся с термоЭДС термопары. Параметры моста подобраны так, что изменение термоЭДС от колебаний температуры свободных концов практически полностью компенсируется напряжением, снимаемым с моста. Чувствительность моста регулируют с помощью потенциометра R_5.

В термоэлектрических термометрах для измерения ЭДС термопары используют также автоматические компенсаторы, которые имеют значительно меньшую основную погрешность, нежели милливольтметры.

Пирометрами излучения называют приборы для измерения температуры, работа которых основана на использовании энергии излучения нагретых тел.

Все физические тела, температура которых превышает абсолютный нуль, испускают тепловые лучи. Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое объектом за счет его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции, которая возбуждается внешними источниками энергии).

Ввиду того что интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры тел, пирометры используются в основном для измерения температуры от 300 до 6000°С и выше. Для измерения температур свыше 3000°С методы пирометрии являются практически единственными, так как они бесконтактны, т.е. не требуют непосредственного контакта датчика прибора с объектом измерения. Теоретически верхний предел измерения температуры пирометрами излучения неограничен.

Следует также отметить, что бесконтактные методы измерения обладают тем положительным свойством, что при использовании их не искажается температурное поле объекта измерения. В то же время для тех интервалов температур, где могут применяться и контактные методы, последним отдается

предпочтение из-за их более высокой точности.

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т. е. излучает волны всех длин λ в диапазоне от 0 до бесконечности. Видимое глазом человека излучение, называемое светом, охватывает диапазон длин волн 0,40—0,75 мкм. Невидимые лучи охватывают инфракрасный участок спектра, т. е. диапазон от λ=0,75 до λ~400 мкм, за которым следует постепенный переход в радиоволновой диапазон. Лучи с λ<0,40 мкм также невидимы и относятся к ультрафиолетовому диапазону, за которым следуют рентгеновские и гамма-лучи.

Температурное излучение характеризуют переносимой им энергией. Количество лучистой энергии в лучах длиной волны от λ до λ + Δλ, излучаемой телом с единицы поверхности в единицу времени, называют *монохроматической интенсивностью излучения*. Количество лучистой энергии, излучаемой при данной температуре единицей поверхности тела в единицу времени для длин волн от 0 до ∞, называют *интегральной интенсивностью излучения*.

Для абсолютно черного тела зависимость монохроматической интенсивности излучения от температуры тела и длины волны выражают уравнением

$$J_{\lambda}^{ч} = C_1 л^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1},$$

где C_1 и C_2 – постоянные излучения; K – длина волны, для которой определяют интенсивность излучения; e – основание натуральных логарифмов; T – абсолютная температура. Эта зависимость положена в основу измерения температуры при помощи *оптических пирометров*.

Логарифм отношения интенсивностей излучения при длинах волн λ_1 *и* λ_2 *и* при малых значениях λТ

$$\ln \frac{J_{л_1}^{ч}}{J_{л_2}^{ч}} = \ln J_{л_1}^{ч} - \ln J_{л_2}^{ч} = C_1^{'} - \frac{C_2^{'}}{T},$$

где C'_1 и C'_2 — постоянные, зависящие от λ_1 и λ_2.

Полученная зависимость используется при измерении температуры *цветовыми пирометрами*.

Для абсолютно черного тела интегральная интенсивность излучения

$$S^{ч} = \int_{\lambda=0}^{\infty} C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(лT)} - 1)^{-1} d\lambda = \sigma T^4,$$

где σ — постоянный коэффициент. На этой зависимости основано измерение температуры *радиационными пирометрами*.

Монохроматическая и интегральная интенсивности излучения всякого физического тела всегда меньше, чем у абсолютно черного тела, при одинаковой температуре. Для физических тел

$$J_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} J_{\lambda}^{ч}; S = \varepsilon S^{ч},$$

где ε_{λ} и ε — коэффициенты, соответственно, монохроматического и интегрального излучения, меньшие единицы.

Значения ε_λ и ε различных физических тел различны и зависят от многих трудно учитываемых факторов: от состава вещества, состояния поверхности тела, температуры тела и т.д. Поэтому градуировку пирометров излучения производят по излучению абсолютно черного тела. При измерении температуры физического тела возникает погрешность, которую можно учесть, если известны коэффициенты ε_λ и ε.

Если коэффициенты монохроматического излучения тела в двух длинах волн равны, то логарифм отношения интенсивностей излучения не зависит от ε_λ. Поэтому в цветовых пирометрах при указанных условиях не требуется вводить поправку на неполноту излучения объекта.

В *оптическом пирометре* (рис. 10.12) интенсивность излучения нагретого тела измеряют путем сравнения в монохроматическом свете яркости исследуемого тела с яркостью нити лампы накаливания. Пирометр предварительно градуируют по излучению абсолютно черного тела. Под яркостью понимают отношение силы света в данном направлении к проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную тому же направлению. Два тела, имеющие в одном направлении одинаковую яркость, обладают одинаковой интенсивностью излучения.

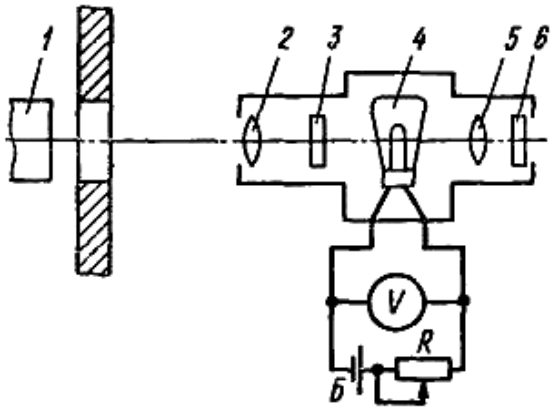


Рисунок 10.12 – Конструкция оптического пирометра

В этом пирометре яркость исследуемого тела *1* сравнивается с яркостью нити фотометрической лампы *4*. Яркость нити лампы, накаливаемой от источника *Б,* регулируют реостатом *R*. Фотометрическая лампа встроена в телескоп, имеющий объектив *2* и окуляр *5*. При измерении температуры телескоп направляют на исследуемое тело *1* и передвижением объектива и окуляра добиваются получения четкого изображения тела и нити фотометрической лампы в одной плоскости. Изменяя ток в фотометрической лампе, добиваются совпадения яркости нити и исследуемого тела. Отсчет показаний в момент совпадения яркости производят по шкале вольтметра, который градуируют в градусах температуры абсолютно черного тела. Иногда для повышения точности измерения тока или падения напряжения на нити лампы применяют компенсатор постоянного тока.

Для того чтобы интенсивности излучения сравнивались в спектре монохроматических лучей, в пирометре предусмотрен красный светофильтр *6*,

пропускающий лучи длиной 0,62 мкм и выше. Человеческий глаз чувствителен к лучам длиной волны до 0,73 мкм. Таким образом, сравнение интенсивностей излучения происходит практически в узком спектре 0,62…0,73 мкм.

Нить фотометрической лампы допустимо накаливать до определенной температуры (1400 °С), а поэтому для увеличения верхнего предела измеряемых температур в пирометре имеется ослабляющий светофильтр *3,* уменьшающий яркость исследуемого тела в определенное число раз.

Промышленностью СССР выпускались различные типы оптических пирометров, например, ЭОП-66, с помощью которых можно производить измерения в достаточно широком диапазоне температур (800…10 000 °С).

В *радиационных пирометрах* (рис. 10.13) интегральная интенсивность излучения воспринимается теплочувствительным элементом.

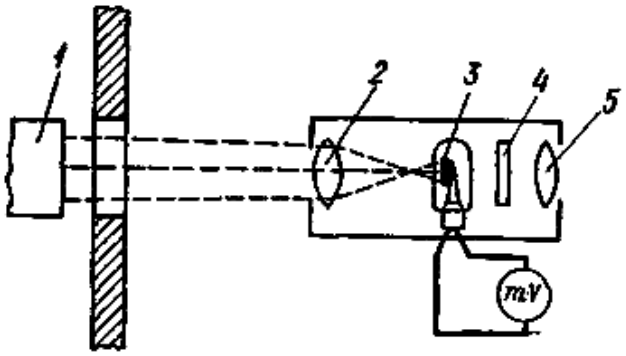


Рисунок 10.13 – Конструкция радиационного пирометра

Внутри телескопа, имеющего объектив *2* и окуляр 5, расположена помещенная в стеклянный баллон термобатарея из последовательно включенных термопар *4.* Рабочие концы термопар находятся на лепестке, покрытом слоем платины. Телескоп наводят на объект *1* так, чтобы лепесток перекрывался изображением объекта и вся энергия излучения падала на рабочие концы термопар. ТермоЭДС термобатареи является функцией мощности излучения, а следовательно, и температуры тела. Для защиты глаза при наводке телескопа предусмотрен светофильтр *4.*

Существуют различные конструкции термобатарей.

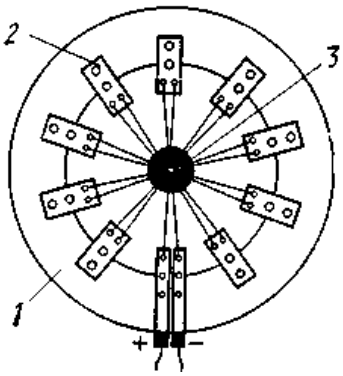


Рисунок 10.14

На рис. 10.14 приведена звездообразная термобатарея, выполненная из десяти последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей, в качестве которых обычно используются хромель-копелевые термоэлектроды диаметром 60—70 мкм. Плоские рабочие концы 3 преобразователей, зачерненные платиновой чернью, образуют венчик. Свободные концы термоэлектрических преобразователей закреплены с помощью металлических пластин 2 на слюдяном кольце 1. Температура свободных концов преобразователя при градуировке равна (20±2)°С. Для компенсации влияния изменения температуры свободных концов

термобатареи параллельно последней подсоединяют катушку из медной или никелевой проволоки. Этот метод компенсации заключается в том, что, например, при увеличении температуры свободных концов термоЭДС термобатареи уменьшается, а сопротивление меди увеличивается и ток, ответвляющийся в измерительный прибор, изменяется незначительно.

Класс точности радиационных пирометров составляет 1,0 и 1,5. Постоянная времени этих приборов – 0,3…1,5 с. При установке телескопа между ним и объектом не должно быть паров влаги, дыма, пыли и т. д., поскольку последние поглощают лучистую энергию, что может привести к дополнительной погрешности измерения.

Радиационные пирометры градуируют по излучению абсолютно черного тела, и для них также (как и для оптических) характерна погрешность от неполноты излучения физических тел. Точность радиационных пирометров ниже точности оптических.

Для измерения температур в широком диапазоне выпускают несколько типов радиационных пирометров. Среди них, например, пирометры типа РАПИР (Россия) для температур 100…4000 °С.

В *фотоэлектрических пирометрах* для измерения интенсивности излучения объекта применяют *фотопреобразователи* (фотоэлементы). На рис. 10.15, *а* приведена упрощенная структурная схема фотоэлект-рического яркостного пирометра. Фотоэлемент *4* освещается с одной стороны от объекта измерения / через диафрагмы *2,3 и* светофильтр *7*, с другой стороны – от лампочки накаливания *9* через ту же диафрагму *3* и светофильтр *7*. Диафрагму *3* перекрывает колеблющийся якорь *8* электромагнита таким образом, что на фотоэлемент попадают изменяющиеся во времени световые потоки Φ_1 и Φ_2 обоих источников излучения; при этом фазы переменных составляющих обоих потоков сдвинуты на 180° (рис. 10.15, б).

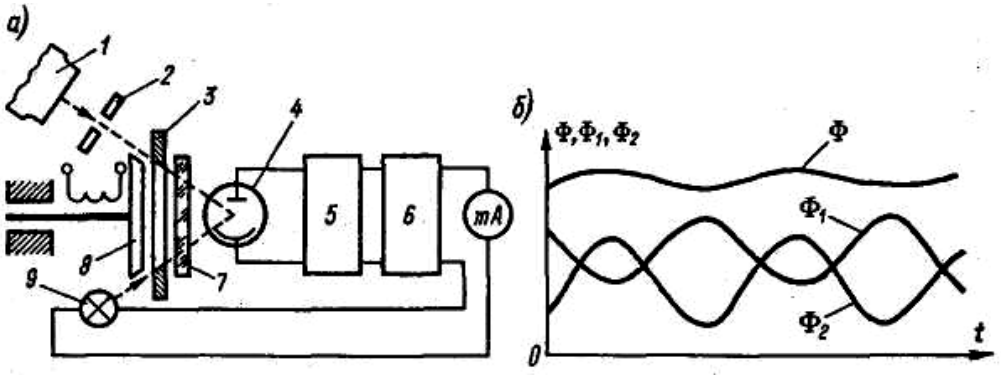


Рисунок 10.15 – Структурная схема и диаграмма световых потоков фотоэлектрического пирометра

Результирующий световой поток Φ, имеющий переменную составляющую, амплитуда которой определяется разностью амплитуд переменных составляющих световых потоков Φ_1 и Φ_2 преобразуется фотоэлементом в фототок. Переменная составляющая фототока усиливается усилителем переменного тока *5*, выпрямляется фазочувствительным выпрямителем *6 и* в виде постоянного тока направляется в миллиамперметр *mA* и лампу накаливания

*9.*Таким образом, в этом приборе осуществляется уравновешивающее преобразование, благодаря чему показания прибора не зависят от нестабильности характеристик фотоэлемента, усилителя и фазочувствительного выпрямителя.

В этом пирометре используется сурьмяно-цезиевый фотоэлемент, который в сочетании со светофильтром делает прибор чувствительным к узкому спектру волн, близкому к спектру, воспринимаемому оптическим пирометром. Это позволяет градуировать фотоэлектрический пирометр по образцовому оптическому пирометру. Пирометр имеет несколько диапазонов измерений. Переход с одного диапазона на другой осуществляют заменой диафрагмы *2*.

Выпускают несколько типов цветовых фотоэлектрических пирометров, предназначенных для автоматического непрерывного измерения и регистрации температуры расплавленных металлов и сплавов. Так, например, пирометр «Спектропир-6» (Россия) работает в диапазоне температур 900…2200°С, основная погрешность прибора составляет ± 1 %.

Рекомендуемая литература

1. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измере-ния и приборы: Учеб.для ВУЗов. – М.: Высш.шк., 1989. с.143-204.
2. Справочник по средствам автоматики / Б.И.Филиппович, А.П.Шорыгин, В.А.Царьков и др.; Под ред. В.Э.Низэ и И.В.Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. с.56, 60, 84-90, 133, 136-138.
3. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская, В.А.Бек и др./ Под общ. ред. В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. с.35-76, 424-441, 483-490.
4. Ланге М.В. Автоматика и автоматизация производственных процессов: Учеб. пособие. – Караганда, КарПТИ, 1983. С.39-42.
5. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. С.79-83, 320-331.
6. Гарсия В. Измерение температуры: теория и практика // Современные технологии автоматизации. –1999. – № 1. – С.82-87.

Контрольные задания для СРД [1, 2, 4-6]

1. Термометры сопротивления
2. Термоэлектрические преобразователи

3. В Международной системе единиц (*SI*), единицей давления принят *паскаль* Па=1 Н/м^2 и его производные – килопаскаль (1 кПа), мегапаскаль (1 МПа). Наряду с системой *SI* при измерениях давления продолжают использовать единицы и других, более ранних систем, а также внесистемные единицы. В технической системе единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда) сила измеряется в килограмм-силах (1 кгс≈9,8 Н). Единицы давления в МКГСС — кгс/м^2 и кгс/см^2; единица кгс/см^2 получила название *технической, или метрической атмосферы (ат)*. В случае измерения в единицах технической атмосферы избыточного давления используется обозначение «*ати*».

В системе единиц СГС (сантиметр, грамм, секунда) единицей силы является *дина* (1 дин=10^{-5} Н). В рамках СГС введена единица давления *бар* (1 бар=1 дин/см^2). Существует одноименная внесистемная, метеорологическая единица *бар* или *стандартная атмосфера* (1 бар=10^6 дин/см^2; 1 мбар = 10^{-3} бар = 10^3 дин/см^2), что иногда, вне контекста, вызывает путаницу. Кроме указанных единиц на практике используется такая внесистемная единица, как *физическая, или нормальная, атмосфера (атм)*, которая эквивалентна уравновешивающему столбу 760 мм рт. ст.

В англоязычных странах широко распространена единица давления *пси* (psi=lbf/in^2) – *фунт силы на квадратный дюйм* (1 фунт = 0,4536 кг). При измерении абсолютного и избыточного давления используются соответственно обозначения *psia* (*absolute* — абсолютный) и *psig (gage* — избыточный).

Для приблизительных оценок и расчетов давления с относительной погрешностью не более 0,5% полезно использовать следующие соотношения:

1 ат = 1 кгс/см^2 = 10^4 кгс/м^2 = 0,97 атм = 0, 98×10^3 мбар = 0,98 бар = 10^4 мм вод.ст. =

= 10 м вод.ст =735 мм рт.ст. = 0,98×10^5 Па == 98 кПа= 0,098 МПа

С ошибкой в 2% можно пренебречь разницей между технической атмосферой, стандартной атмосферой (баром) и десятой частью мегапаскаля (1 ат = 1 бар = 0,1 МПа), а с ошибкой в 3 % — разницей между технической и физической атмосферами (1 ат = 1 атм). На практике из-за использования разнородного гидравлического и измерительного оборудования разных изготовителей и стран, причем нередко давнего года выпуска, потребность перевода одних единиц давления в другие возникает постоянно.

Диапазон давлений, измеряемых в технике, достигает 17 порядков: от 10^{-8} Па в электровакуумном оборудовании до 10^3 МПа при обработке металлов давлением.

Для прямого измерения давления жидкой или газообразной среды с отображением его значения непосредственно на шкале, табло или индикаторе первичного измерительного прибора применяются *манометры* (ГОСТ 8.271-77). Если отображение значения давления на самом первичном приборе не производится, но он позволяет получать и дистанционно передавать соответствующий измеряемому параметру сигнал, то такой прибор называют *измерительным преобразователем давления* (*ИПД*) или датчиком давления. Возможно объединение этих двух свойств в одном приборе (манометр-датчик).

Манометры классифицируют по принципу действия и конструкции, по виду измеряемого давления, по применению и назначению, по типу отображения данных и другим признакам.

По принципу действия манометры можно подразделить на *жидкостные* (измеряемое давление уравновешивается гидростатически столбом жидкости соответствующей высоты), *деформационные* (давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента – мембраны, трубчатой пружины, сильфона), *грузопоршневые* (измеряемое или воспроизводимое давление гидростатически уравновешивается через жидкую

или газообразную среду прибора давлением веса поршня с грузоприемным устройством и комплектом образцовых гирь), *электрические* (давление определяется на основании зависимости электрических параметров: сопротивления, емкости, заряда, частоты чувствительного элемента от измеряемого давления) и др. В промышленности при локальных измерениях давления энергоносителей в большинстве случаев используются *деформационные манометры* на основе одновитковой трубчатой пружины (*трубки Бурдона)* для прямопоказывающих стрелочных приборов или с многовитковыми пружинами для самопишущих манометров, но в последние годы они вытесняются электрическими манометрами с цифровым индикатором и развитой системой интерфейсов.

По виду измеряемого давления манометры подразделяют на приборы измерения избыточного и абсолютного давления – собственно *манометры*, разрежения – *вакуумметры*, давления и разрежения – *мановакуумметры*, атмосферного давления – *барометры* и разностного давления – *дифференциальные манометры* (*дифманометры*). Манометры, вакуумметры и мановакуумметры для измерения небольших (до 20-40 кПа) давлений газовых сред называют соответственно *напоромерами*, *тягомерами* и *тягонапоромерами*, а дифманометры с таким диапазоном измерения – *микроманометрами* (ГОСТ 8.271-77). Технические характеристики всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими техническими условиями (ГОСТ 2405-88, ГОСТ 18140-81 и другими).

В *пружинных манометрах* используются различные пружины – *трубчатая многовитковая (геликоидальная), трубчатая одновитковая, пластинчатая (мембрана)* и *гармоникообразная (сильфон)*, показанные на рис.10.16.

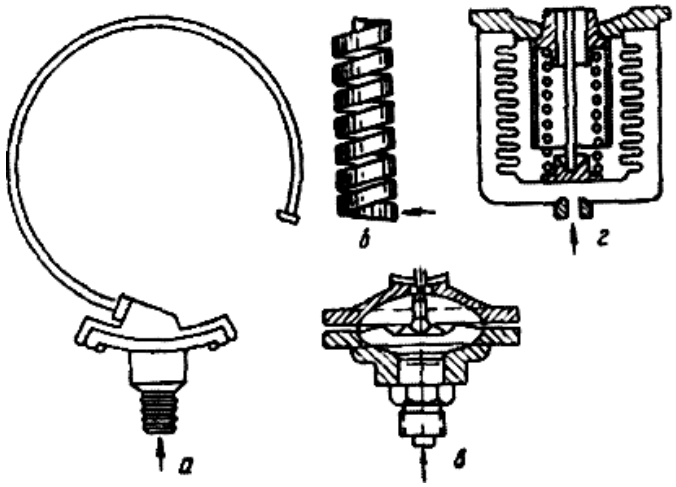


Рисунок 10.16 – Упругие элементы: а – трубчатая пружина; б – много-витковая трубчатая пружина; в – мембрана; г – сильфон

Манометр с трубчатой пружиной применяют для измерения давления в очень широких пределах. На рис. 10.17 показана конструкция такого манометра.

Прибор состоит из трубчатой пружины *5*, один конец которого впаян в отверстие держателя *1*, а другой наглухо запаян и несет на себе наконечник *10.* Полость пружины связана с измеряемой средой через канал в держателе *1*,

снабженным радиальным штуцером *14*. Держатель прибора оснащен платой *2*, на которой монтируется трубко-секторный механизм. Последний включает в себя зубчатое колесо (трубку) *8* и зубчатый сектор *9*. Для исключения люфта в передаточном механизме используется спиральная пружина *7*, один конец которой с помощью штифта крепится на оси трубки, а другой – к колонке *6*, укрепленной на плате *2*. К хвостовику сектора *9* с помощью винта *12* крепится тяга *4*.

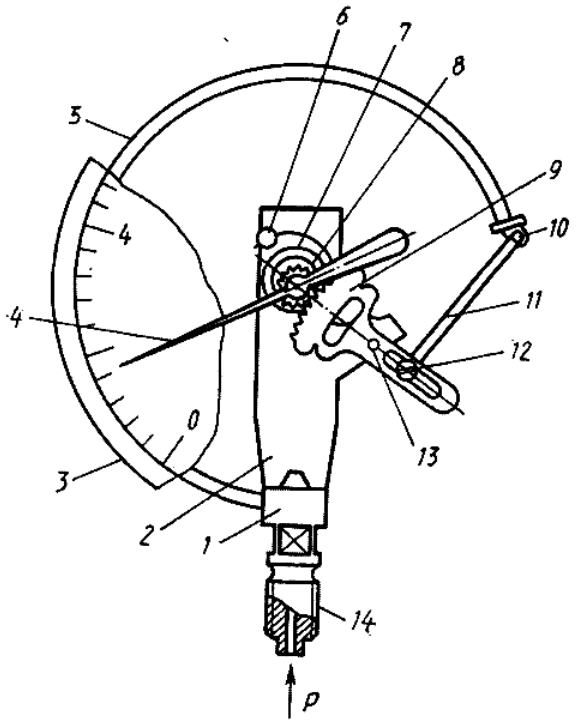


Рисунок 10.17 – Схема манометра с одновитковой трубчатой пружиной

Посредством тяги перемещение свободного конца пружины передается зубчатому сектору, который имеет ось вращения *14*. Вращение зубчатого сектора передается трубке, на оси которой насажена стрелка *4* для отсчета показаний на шкале *4*.

Шкала манометра равномерная, поскольку перемещение свободного конца пружины пропорционально измеряемому давлению. Регулировка хода стрелки производится винтом *12*.

Вакуумметр с одновитковой трубчатой пружиной конструктивно идентичен рассмотренному манометру. Отличие состоит только в шкале и направлении перемещения стрелки. Особенностью *мановакуумметра* является стрелка, которая выполняется с нулем в средней части. Шкала, расположенная слева от нуля, служит для измерения вакуума, а шкала, расположенная справа, для измерения избыточного давления.

Наряду с рассмотренными приборами, оснащенными одновитковой трубчатой пружиной, в практике измерения давления и разряжения получили широкое распространение манометры и вакуумметры, снабженные *электроконтактными сигнализирующими устройствами*. Эти средства измерений давления получили название *электроконтактных*. Класс точности электроконтактных манометров и вакуумметров (например, серии *ЭКМ*), как

правило, составляет 1,5.

Основная погрешность технических манометров в зависимости от качества трубчатых пружин составляет 1,5…4 % предельного значения шкалы, контрольных манометров 1 %, образцовых манометров 0,2; 0,35 и 0,5 %.

У манометров с *многовитковой* (*геликоидальной*) *трубчатой пружиной* вследствие большой длины многовитковой пружины величина перемещения ее свободного конца больше, чем у трубчатой одновитковой пружины, при одном и том же давлении (рис. 10.16,б).

В горной промышленности получили также распространение *магнитоупругие преобразователи*, действие которых основано на использовании эффекта зависимости магнитной проницаемости μ от величины механического воздействия (сжатия или растяжения) на ферромагнитный сердечник преобразователя. Это свойство называют *магнитоупругостью* и характеризуют чувствительностью $S_\mu = d\mu / dl$. Наибольшим значением S_μ=200 Гн/м^2 обладает пермаллой (железоникелевый сплав).

Различают магнитоупругие датчики *дроссельного* и *трансформаторного* типов. Последние могут контролировать только усилие сжатия, однако обладают большей чувствительностью.

Магнитоупругие датчики используются для контроля усилий (например, при загрузке скипов и посадке клетей шахтных подъемных установок на кулаки), горных давлений и т.п.

Достоинствами магнитоупругих преобразователей являются простота и надежность в работе, значительная мощность выходных сигналов. Основным недостатком – значительная инерционность.

На рис. 10.18 показан манометр типа *ММ* с упругой металлической концентрически гофрированной *мембраной*, зажатой между двумя фланцами.

Штуцер в нижнем фланце соединяет манометр прямым каналом с измеряемой средой. Под воздействием усилия давления мембрана прогибается пропорционально величине этого давления. Стойка в центре мембраны, соединенная при помощи шарнира с поводком зубчатого сектора передаточного механизма, перемещает на соответствующий угол стрелку по шкале прибора.

Благодаря непосредственному сообщению полости мембраны с измеряемой средой этим манометром удобно пользоваться для измерения давления вязких жидкостей (мазут, смола и др.). Основная погрешность прибора составляет 2,5 или 4 % от верхнего предела шкалы.

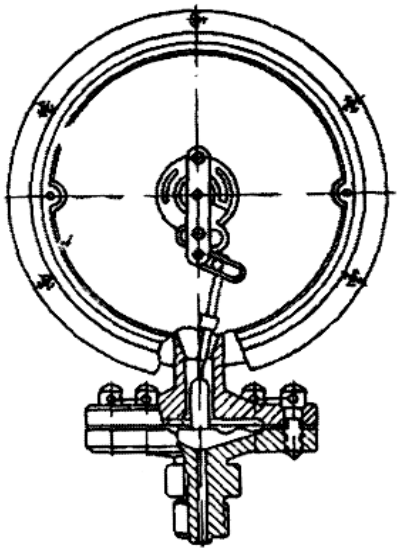


Рисунок 10.18 – Манометр с металлической мембраной

Тензоэффект, положенный в основу работы *тензорезисторов*, заключается в изменении активного сопротивления проводника (полупроводника) под действием вызываемого в нем механического напряжения и деформации.

Если проволоку подвергнуть механическому воздействию, например, растяжению, то сопротивление ее изменится. Относительное изменение сопротивления проволоки

$$\Delta R/R = S \cdot \Delta l/l \ ,$$

где S – коэффициент тензочувствительности;

$\Delta l/l$ – относительная деформация проволоки.

Изменение сопротивления проволоки при механическом воздействии на нее объясняется изменением геометрических размеров (длины, диаметра) и удельного сопротивления материала.

Тензочувствительные проволочные преобразователи представляют собой тонкую зигзагообразно уложенную и приклеенную к подложке проволоку. Преобразователь устанавливают таким образом, чтобы направление ожидаемой деформации совпадало с продольной осью проволочной решетки. В качестве материала для преобразователя обычно используют константановую проволоку (у константана – малый температурный коэффициент сопротивления) и для подложки – тонкую бумагу (0,03…0,05 мм) и пленку лака либо клея (БФ-2, БФ-4, бакелитовый и др.).

Распространение также получили *фольговые преобразователи*, у которых вместо проволоки используется фольга, и *пленочные тензорезисторы*, получаемые путем возгонки тензочувствительного материала с последующим осаждением его на подложку.

Достоинства тензорезисторов: линейность статической характеристики преобразования, простота конструкции и малые габариты. Основной недостаток – низкая чувствительность.

В тех случаях, когда требуется высокая чувствительность, находят применение *полупроводниковые тензочувствительные* преобразователи (поликристаллические из порошкообразного полупроводника и монокристалли-

ческие из кристалла кремния). Поскольку чувствительность полупроводниковых тензорезисторов в десятки раз выше, чем у металлических, и, кроме того, интегральная технология позволяет в одном кристалле кремния формировать одновременно как тензорезисторы, так и микроэлектронный блок обработки, то в последние годы получили преимущественное развитие интегральные полупроводниковые тензочувствительные преобразователи. Такие элементы реализуются либо по технологии диффузионных резисторов с изоляцией их от проводящей кремниевой подложки p-n-переходами – технология «*кремний на кремнии*», либо по *гетероэпитаксиальной технологии* «*кремний на диэлектрике*» на стеклокерамике, кварце или сапфире. Для тензочувствительных преобразователей, особенно полупроводниковых, существенно влияние температуры на их упругие и электрические характеристики, что требует применения специальных схем температурной компенсации погрешностей (в частности, с этой целью в расширенной схеме *тензомоста* используются компенсационные резисторы и терморезисторы). Особенно широкое применение в изготовлении *измерительных преобразователей давления* в силу своих высоких механических, изолирующих и теплоустойчивых качеств получила технология *КНС* – «*кремний на сапфире*» (в частности, распространение получили датчики серии «Сапфир-22М» и «Метран-22» российского производства).

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать тензорезисторы непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счет молекулярных сил позволяют отказаться от использования клеющих материалов и улучшить метрологические характеристики преобразователей.

На рис. 10.19, а показана сапфировая мембрана *3* с расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами *p*-типа с положительной *1* и отрицательной *2* чувствительностями. Положительной чувствительностью обладает тензорезистор, у которого отношение $\frac{\Delta R}{R}>0$, если же $\frac{\Delta R}{R}<0$ – чувствительность отрицательна.

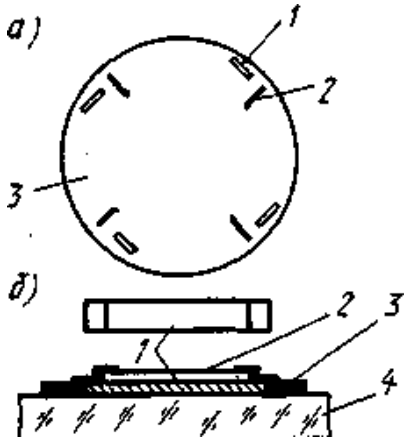


Рисунок 10.19

Структура однополоскового тензорезистора приведена на рис. 10.19, б. Здесь: *1* – тензорезистор; *2* – защитное покрытие; *3* – металлизированные токоведущие дорожки; *4* – упругий элемент преобразователя (сапфировая мембрана). Тензорезисторы можно располагать на мембране так, что при деформации они будут иметь разные по знаку приращения сопротивления. Это позволяет создавать мостовые схемы, в каждое из плеч которого включаются тензорезисторы с соответствующим

значением $\frac{\Delta R}{R}$ и даже термокомпенсационные элементы.

Тензорезисторные преобразователи широко используют для измерения давлений. На рис. 10.20 показано устройство и принцип действия манометра с тензорезисторными преобразователями. В приборе измерительный преобразователь – стальной цилиндр с наклеенными проволочными тензорезисторами R_T и R_K, включенными в мост, и усилитель $У$ с миллиамперметром на выходе.

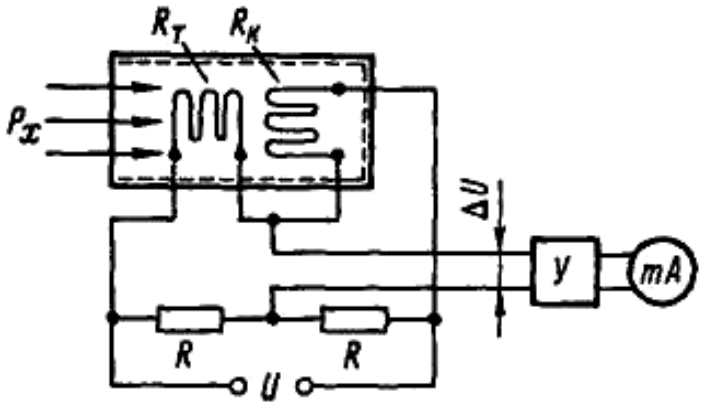


Рисунок 10.20 – Манометр с тензорезисторными преобразователями

Относительная деформация поверхности цилиндра зависит от давления следующим образом:

$$\varepsilon_l = P_x \, r / (E \, h),$$

где P_x – измеряемое давление;

r и h – соответственно радиус и толщина стенок цилиндра;

E – модуль упругости стали.

Деформация ε_l воспринимается рабочим тензорезистором $R_т$. Компенсационный тензорезистор $R_к$, наклеенный вдоль образующей цилиндра, служит для температурной компенсации. При постоянстве питающего мост напряжения сигнал на выходе моста ΔU пропорционален измеряемому давлению.

Благодаря хорошим динамическим свойствам *тензорезисторные манометры* применяют для измерения быстроменяющихся давлений.

В *пьезоэлектрических* преобразователях используется эффект появления электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварц, турмалин, сегнетова соль и др.) под влиянием механических напряжений.

Устройство *пьезоэлектрического преобразователя* для измерения переменного давления газа показано на рис. 10.21.

Давление P через металлическую мембрану *1* передается на зажатые между металлическими прокладками *2* кварцевые пластинки *4*. Шарик *4* способствует равномерному распределению давления по поверхности кварцевых пластинок. Средняя прокладка соединена с выводом *5*, проходящим через втулку из хорошего изоляционного материала.

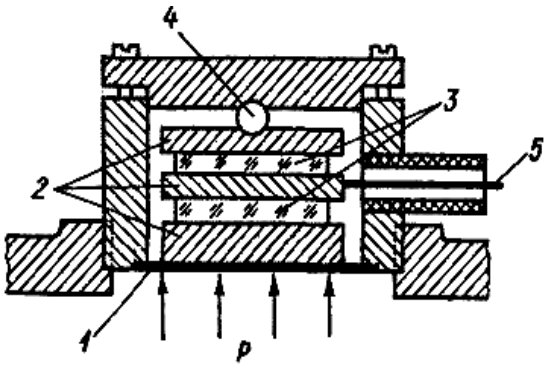


Рисунок 10.21 – Устройство пьезоэлектрического преобразователя

При воздействии давления *P* между выводом *5* и корпусом преобразователя возникает разность потенциалов

$$U = 2Q/(C_n + C_0) = 2k \cdot S \cdot P/(C_n + C_0),$$

где Q – заряд, возникающий на пластинке кварца;

C_n – емкость преобразователя;

C_0 – емкость проводов и входной цепи прибора, измеряющего разность потенциалов;

k – пьезоэлектрический модуль кварца;

S – площадь поверхности мембраны, подверженная давлению.

По разности потенциалов *U* судят о значении давления *P*. В пьезоэлектрических преобразователях главным образом применяют кварц, у которого пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокой механической прочностью и высокими изоляционными качествами, а также с независимостью пьезоэлектрической характеристики от температуры в широких пределах. Используют также поляризованную керамику из титаната бария, титаната и цирконата свинца. Пьезоэлектрические датчики обычно применяют для измерений быстропротекающих динамических процессов при ударных нагрузках, вибрациях, переменных усилиях и т.д.

Современные общепромышленные *измерительные преобразователи давления* (*ИПД*) – это интеллектуальные, со встроенным микропроцессором, интегральные преобразователи с цифровым интерфейсом. Они обладают свойствами диагностики и конфигурирования на расстоянии (установка нуля и диапазона шкалы, выбор технических единиц, ввод данных для идентификации и физического описания датчика и т.п.), обеспечивают более высокое соотношение измеряемых диапазонов, улучшенную температурную компенсацию, повышенную основную точность. Однако это не значит, что другие ИПД уже не нужны: каждый тип ИПД имеет свою эффективную пользовательскую нишу.

В качестве примера назовем высоконадежные *интеллектуальные ИПД SITRANS P* (серии MKII, DS, HK) фирмы *Siemens* (Германия), предназначенные для измерения уровня избыточного, дифференциального и абсолютного давления жидкости от 1 мбар до 4000 бар. Для решения различных задач можно

воспользоваться различными преобразователями с разнообразными соединениями и насадками.

Так, устройства *SITRANS P* (рис. 10.22) существуют в стандартном исполнении (токовый выходной сигнал 4…20 мА), *Smart* (с использованием цифрового протокола *HART*) и с подключением к сети *Profibus*.

Обеспечивается возможность бесступенчатой перестройки диапазона измерения по месту. А датчики серии *SITRANS Z* могут быть использованы для решения задач, не требующих высокой точности измерения, а также перестройки диапазона измерения в процессе эксплуатации. Они предназначены для измерения избыточного и абсолютного давления газов, жидкостей и пара в энергетической и машиностроительной индустрии, системах водоснабжения и т.п. и отличаются малым весом и габаритами.

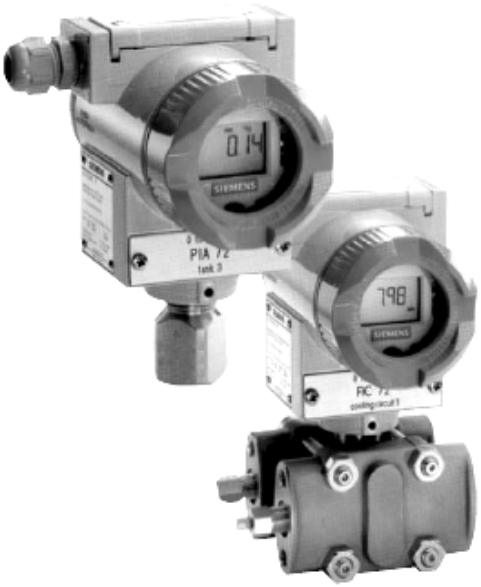


Рисунок 10.22 – Преобразователи *SITRANS P*

Датчик состоит из тонкопленочной измерительной ячейки с керамической мембраной и электронной схемы, которые встроены в корпус из нержавеющей стали (исполнение *IP65*).

Рекомендуемая литература

1. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб.для ВУЗов. – М.: Высш.шк.,1989. С.95-120.
2. Справочник по средствам автоматики / Б.И. Филиппович, А.П. Шорыгин, В.А. Царьков и др.; Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. С.50-54, 63, 69-73, 281.
3. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник /В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская и др./ Под ред. В.В.Черенкова. -Л.: Машиностроение, 1987. С.82-126, 441-451, 630-638.
4. Ланге М.В. Автоматика и автоматизация производственных процессов: Учеб. пособие. – Караганда, КарПТИ, 1983. С.31-34.
5. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. С.292-306.

6. Жданкин В.К. Измерительные преобразователи давления // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 4. – С.79-86.

Контрольные задания для СРД [1, 2, 4-6]

1. Тензометрические измерительные преобразователи
2. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи

4. По данным ряда источников степень распространения средств контроля уровня жидкостей и сыпучих материалов оценивается в процентном соотношении приблизительно таким образом:

поплавковые – 24%,
вибрационные – 21%,
гидростатические – 20%,
кондуктометрические – 5%,
емкостные – 15%,
на основе измерения времени прохождения сигнала – 15%.

В последние годы нарастающими темпами увеличивается доля использования методов измерения времени прохождения сигналов (ультразвукового и направленного микроволнового излучения). Широкое применение получают также магнитные погружные зонды.

Поплавковые уровнемеры узкого диапазона (рис.10.23) обычно представляют собой устройства, содержащие шарообразный поплавок диаметром 80-200 мм, выполненный из нержавеющей стали. Поплавок плавает на поверхности жидкости и через штангу и специальное сальниковое уплотнение соединяется либо со стрелкой измерительного прибора, либо с преобразователем 1 угловых перемещений в унифицированный электрический или пневматический сигналы.

Отличаются способом их установки на технологических аппаратах. Минимальный диапазон измерений этих уровнемеров – 10÷0÷10 мм, максимальный – 200÷0÷200 мм. Класс точности – 1,5.

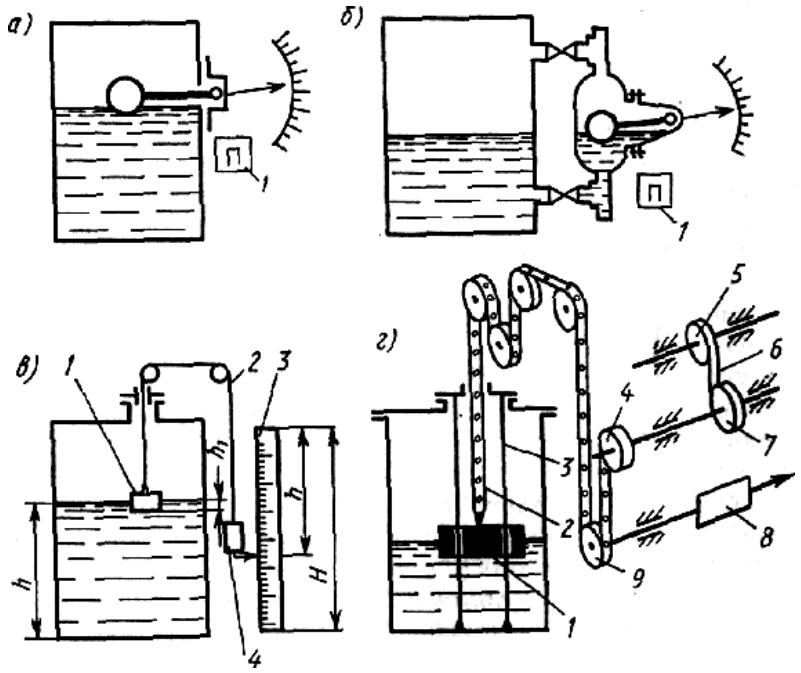


Рисунок 10.23– Схемы поплавковых уровнемеров

Поплавковые уровнемеры широкого диапазона .(рис. 10.23, *в)* представляют собой поплавок *1*, связанный с противовесом *4* гибким тросом *2*. В нижней части противовеса укреплена стрелка, указывающая по шкале *3* значения уровня жидкости в резервуаре. При расчетах поплавковых уровнемеров подбирают такие конструктивные параметры поплавка, которые обеспечивают состояние равновесия системы «поплавок — противовес» только при определенной глубине погружения поплавка. Если пренебречь силой тяжести троса и трением в роликах, состояние равновесия системы «поплавок – противовес» описывается уравнением:

$$G_r = G_n - Sh_1\rho_ж g$$

где G_r, G_n — силы тяжести противовеса и поплавка; S —площадь поплавка; h_1 — глубина погружения поплавка; $\rho_ж$ — плотность жидкости.

Повышение уровня жидкости изменяет глубину погружения поплавка и на него действует дополнительная выталкивающая сила. В результате равенство нарушается и противовес опускается вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавка не станет равной h_1. При понижении уровня действующая на поплавок выталкивающая сила уменьшается и поплавок начинает опускаться вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавка не станет равной h_1. Для передачи информации о значении уровня жидкости в резервуаре применяют сельсинные системы передачи. Обычно ось сельсин-датчика кинематически связана с барабаном, вращение которого осуществляется в процессе перемещения троса, а ось сельсина-приемника— со счетным механизмом.

Уровнемер (рис. 10.23, *г*) представляет собой поплавок *1*, подвешенный на перфорированной стальной (мерной) ленте *2*. Для исключения горизонтальных перемещений поплавка предусмотрены направляющие струны *3*.

Отличительной особенностью уровнемера этого типа является то, что в нем осуществляется натяжение мерной ленты пружинным двигателем. Двигатель состоит из барабанов *5* и *6*. Когда поплавок находится в крайнем верхнем положении, мерная лента *2* сматывается на барабан-накопитель *4*. При понижении уровня жидкости сила тяжести поплавка преодолевает силы трения в подвижной системе и усилие, создаваемое пружинным двигателем. В результате поплавок перемещается вниз. Перемещение поплавка вниз сопровождается вращением барабана-накопителя *4* и сматыванием ленты *6* пружинного двигателя с барабана *5* на барабан *7*. При перемещении поплавка вверх натяжение мерной ленты уменьшается и лента пружинного двигателя перематывается на барабан-накопитель *4*. В процессе перемещения мерная лента вступает в зацепление со штырями мерного шкива *9,* на оси которого укреплен счетный механизм *8,* представляющий собой десятичный счетчик с наименьшей ценой деления 1 мм. Для передачи информации на расстояние к валу отсчетного устройства может быть подключен преобразователь угла поворота в электрический или пневматический унифицированные сигналы. Минимальный диапазон измерений 0…12 м, максимальный 0…20 м. Абсолютная погрешность измерения ±4 и ±10 мм.

В основу работы *буйковых уровнемеров* положено физическое явление, описываемое законом Архимеда. Чувствительным элементом в этих уровнемерах является цилиндрический буек, изготовленный из материала с плотностью, большей плотности жидкости. Буек находится в вертикальном положении и частично погружен в жидкость. При изменении уровня жидкости в аппарате масса буйка в жидкости изменяется пропорционально изменению уровня. Преобразование веса буйка в сигнал измерительной информации осуществляется с помощью унифицированных преобразователей «сила – давление» и «сила – ток». В соответствии с видом используемого преобразователя силы различают *пневматические* и *электрические* буйковые уровнемеры.

Схема буйкового пневматического уровнемера приведена на рис. 10.24. Уровнемер работает следующим образом. Когда уровень жидкости в аппарате равен начальному h_0 (в частном случае h_0 может быть равен 0), измерительный рычаг *2* находится в равновесии, так как момент M_1 создаваемый весом буйка *G*, уравновешивается моментом M_2, создаваемым противовесом *N*.

Когда уровень жидкости становится больше h_0, часть буйка погружается в жидкость. Поэтому вес буйка уменьшается, а следовательно, уменьшается и момент M_1, создаваемый буйком на рычаге *2*. Так как M_2 становится больше M_1, рычаг *2* поворачивается вокруг точки *O* по часовой стрелке и прикрывает заслонкой *7* сопла *8*. Поэтому давление в линии сопла увеличивается. Это давление поступает в пневматический усилитель *10,* выходной сигнал которого является выходным сигналом уровнемера. Этот же сигнал одновременно посылается в сильфон отрицательной обратной связи *5*. При действии давления $P_{\text{вых}}$ возникает сила *R,* момент M_3 которой

совпадает по направлению с моментом M_1, т. е. действие силы R направлено на восстановление равновесия рычага *2*.

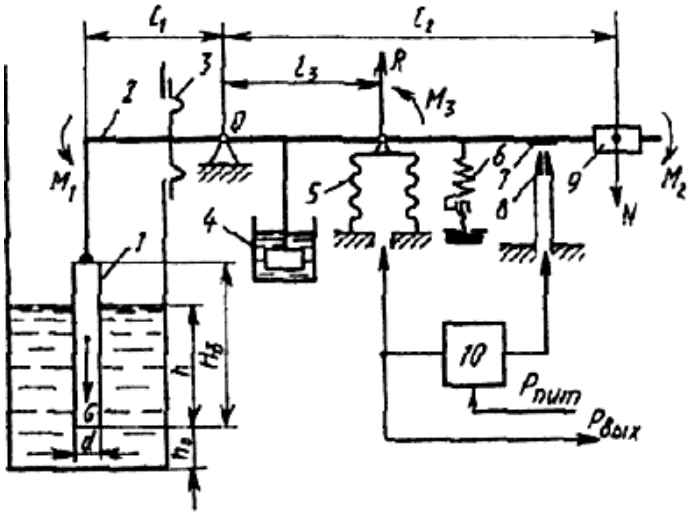


Рисунок 10.24 – Схема буйкового пневматического уровнемера

Движение измерительной системы преобразователя происходит до тех пор, пока сумма моментов всех сил, действующих на рычаг *2*, не станет равной 0, т. е.

$$M_1 + M_3 - M_2 = 0.$$

Представляя моменты M_1, M_2, M_3 в виде произведений соответствующих сил и плеч, получим:

$$Gl_1 + Rl_3 = Nl_2,$$

где G — вес буйка при погружении его в жидкость на глубину h; l_1, l_2, l_3 — плечи действующих сил относительно точки O; R — сила, развиваемая сильфоном *5*; N — вес противовеса.

Буйковые средства измерений уровня применяются при температуре рабочей среды от –40 до +400°С и давлении рабочей среды до 16 МПа. Классы точности буйковых уровнемеров обычно не превышают 1,0.

Буйковый измерительный преобразователь уровня *EZ Modulevel*, разработанный компанией *Magnetrol* представляет собой электронный измерительный преобразователь уровня с питанием 24 В постоянного тока по токовой петле. Используемая реализация связи между первичным датчиком уровня и выходной электроникой обеспечивает значительное упрощение механической конструкции. Линейное вертикальное расположение элементов конструкции измерительного преобразователя уменьшает вес устройства и влияние технологических колебаний на электронные элементы, одновременно упрощая монтаж. Контролируемая среда: жидкости с относительной плотностью 0,23...2,2 и поверхности раздела сред, плотности которых отличаются не менее чем на 0,10.

Буйковые датчики – сенсоры уровня серии 249 фирмы Метран представляют собой прибор, преобразующий изменение выталкивающей силы во вращательное движение вала вокруг оси торсионной трубки уровнемера.

Изменение выталкивающей силы пропорционально объему и плотности

вытесненной жидкости. При изменении уровня жидкости (уровня поверхности раздела сред) или плотности жидкости происходит смещение буйка, которое приводит к повороту торсионной трубки (угол поворота пропорционален изменению выталкивающей силы, моменту силы, действующей на буек). Поворотное движение торсионной трубки передается на цифровой контроллер серии *DLC3000*, который преобразует угол поворота в электрический сигнал. Кроме аналогового сигнала 4-20 мА, который подается на выход, контроллер может передавать информацию в цифровом виде по протоколу *HART*. Датчик состоит из сенсора уровня и контроллера. Цифровой контроллер уровня – многопараметрический *HART*-прибор, предназначенный для использования с буйковыми сенсорами, позволяющий измерять как уровень жидкостей (границу раздела сред между двумя жидкостями), так и удельный вес жидкости (плотность).

Датчик имеет следующие характеристики:

имеют следующие характеристики:

погрешность измерений уровня от ±0,25%;

диапазон рабочего давления до 42 МПа;

температура окружающей среды от –40 до 80°С;

температура рабочей среды от -29 до 593°С;

степень защиты от проникновения пыли и воды – IP66;

межповерочный интервал – 1 год.

Источник питания от 12 до 30 В постоянного тока, предусмотрены защита от обратной полярности питания.

Измерение уровня *гидростатическими уровнемерами* сводится к измерению гидростатического давления *P,* создаваемого столбом *h* жидкости постоянной плотности ρ, согласно равенст ву

$$P = \rho g h.$$

Измерение гидростатического давления может осуществляться:

манометром, подключаемым на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня;

дифференциальным манометром, подключаемым к резервуару на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня, и к газовому пространству над жидкостью;

измерением давления газа (воздуха), прокачиваемого по трубке, опущенной в заполняющую резервуар жидкость на фиксированное расстояние.

На рис. 10.25, а приведена схема измерения уровня манометром. Применяемый для этих целей манометр *1* может быть любого типа с соответствующими пределами измерений. Измерение гидростатического давления манометром может быть осуществлено и по схеме, приведенной на рис. 10.20, б. Согласно данной схеме о значении измеряемого уровня судят по давлению воздуха, заполняющего манометрическую систему.

В нижней части манометрической системы расположен колокол *2*, отверстие которого перекрыто тонкой эластичной мембраной *1*, а в верхней

– манометр *3*.

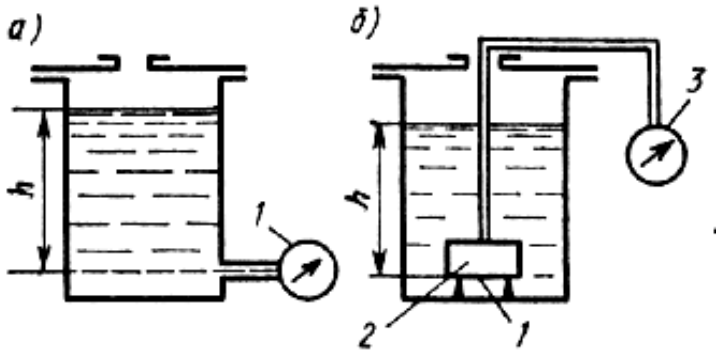


Рисунок 10.25 – Схемы измерения уровня манометрами

Применение эластичной мембраны исключает растворение воздуха в жидкости, однако вводит погрешность в определение уровня из-за упругости мембраны. Преимуществом данной схемы измерения гидростатического давления является независимость показаний манометра от его расположения относительно уровня жидкости в резервуаре.

При измерении уровня по рассмотренным схемам имеют место погрешности измерения, определяемые классом точности манометров и изменениями плотности жидкости.

Измерение гидростатического давления манометрами целесообразно в резервуарах, работающих при атмосферном давлении. В противном случае, показания манометра складываются из гидростатического и избыточного давлений.

В тех случаях, когда манометрический способ измерения уровня оказывается неэффективным, применяются *дифференциальные манометры*. С помощью дифференциальных манометров возможно также измерение уровня жидкости в открытых резервуарах, уровня раздела фаз и уровня раздела жидкостей.

В зависимости от требований, предъявляемых к автоматизации технологических процессов, применяют различные типы дифманометров. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний уровня, применяют дифманометры с непосредственным отсчетным устройством. Эти дифманометры могут быть снабжены контактным устройством для сигнализации предельных значений уровня. Для дистанционного измерения уровня могут быть использованы дифманометры с электрическим (или пневматическим) унифицированным выходным сигналом переменного или постоянного тока в комплекте с соответствующим вторичным прибором, либо аналоговым модулем для автоматического регулирования и контроля измеряемого параметра.

Поскольку жидкость, уровень которой необходимо измерять, может находиться под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, то это учитывается при выборе типа и модели дифманометра, так как они выпускаются на различное предельно допускаемое рабочее избыточное давление. Предельный номинальный перепад давления дифманометра

выбирается в зависимости от диапазона измерения уровня. Кроме того, для присоединения дифманометра к баку или другому устройству применяют различные типы уравнительных сосудов.

Принципиальная электрическая схема дифтрансформатора с плунжерной катушкой датчика приведена на рис. 10.26.

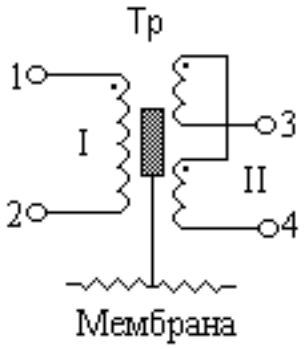


Рисунок 10.26

Первичные обмотки (I) датчика и прибора соединены последовательно, на них подается напряжение. Две вторичные обмотки датчика соединены последовательно встречно, поэтому напряжение на обмотке (II) будет равно разности напряжений этих двух обмоток. Если плунжер находится в среднем положении, напряжение на обоих вторичных обмотках одинаково, и разность их напряжений равна нулю. При перемещении плунжера вверх, на верхней обмотке будет индуцироваться напряжение больше, чем на нижней и на выводах *3* и *4* появится некоторое напряжение, фаза которого будет совпадать с фазой верхней вторичной обмоткой.

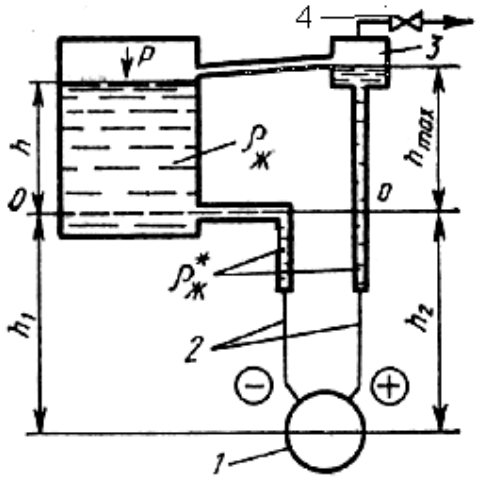


Рисунок 10.27 – Схема включения дифференциального манометра

Датчик (дифманометр) 1 через импульсные трубки 2 (рис. 10.27) подключен к емкости с водой, находящейся под давлением. Импульсные трубки в верхней и нижней части имеют запорные вентили 4. Импульсная трубка нижней камеры (плюс) подключена к верхней части сосуда через уравнительный бачок 3, которая заполнена доверху водой. Импульсная трубка верхней камеры (минус) подключена к нижней части сосуда и тоже заполнена водой. Уравнительный сосуд 3 применяется для компенсации статического давления, создаваемого столбом жидкости h_1 в импульсной трубке. В процессе измерения уровень жидкости в уравнительном сосуде должен быть постоянным. Вентиль *4* служит для поддержания постоянного уровня в сосуде *3*.

Фактическое давление на мембрану датчика будет оказывать давление воды, в соответствии с

$$\Delta P = \rho_ж g h_{max} - \rho_ж g h .$$

или

$$\Delta P = h_{max} - h$$



Рисунок 10.28

где ΔP - действующий перепад давлений на мембрану датчика;

h_{max} – постоянный (неизменяемый) столб воды «плюсовой» камеры;

h – изменяющийся уровень в баке «минусовая» камера.

Из формулы видно, что при полном баке, т.е. когда «h_{max}» и «h» одинаковы, на мембрану «давят» два одинаковых по высоте столба воды. В этом случае мембрана не деформируется и находится в состоянии покоя, потому, что перепад давлений равен нулю:

$$\Delta P = h_{max} - h = 0,$$

а плунжер в свою очередь занимает в катушке исходное положение.

Когда же бак пустой (h = 0), то на мембрану датчика будет воздействовать только столб воды «h_{max}» (напомним: h_{max} – постоянная величина давления для «плюсовой» камеры):

$$\Delta P = H - h = H - 0 = H; \quad \Delta P = H.$$

При этом мембрана, а значит и плунжер, займет свое положение, соответствующее максимальному перепаду давлений (нулевой уровень).

В гидростатических сигнализаторах – концевых выключателях *HR-0211* фирмы *PEPPERL+FUCHS* (рис. 10.28) используются различные способы подключения к измерительной системе.

Основные технические характеристики гидростатических сигнализаторов серии *HR-0211*:

напряжение питания – 250 В (макс.) переменного тока (50 Гц);

максимальный ток нагрузки – 6 А;

тип коммутационного устройства – переключающий;

допустимая температура окружающей среды –20…+70^{0}С;

степень защиты (исполнение) – *IP54*.

Гидростатические зонды для измерения уровня *LGC* фирмы *PEPPERL+FUCHS* (рис. 10.29) являются датчиками гидростатического давления для измерения уровня пресной воды, питьевой воды и сточных вод. Модели со встроенным термопреобразователем сопротивления из платиновой проволоки *Pt100* одновременно определяют температуру в месте установки датчика. Соответствующий преобразователь трансформирует сигнал термопреобразователя сопротивления в унифицированный токовый сигнал 4…20 мА.



Широко используемые в химической, нефтехимической, фармацевтической и пищевой отраслях датчики гидростатического давления серии *Barcon* фирмы *PEPPERL+FUCHS* позволяют строить достаточно надежные и недорогие измерительные системы,

отличающиеся разнообразными возможностями. Керамические или металлические мембранные преобразователи, разнообразные способы монтажа на резервуары, многочисленные варианты конструкции корпусов датчиков, выполненных из разных материалов, обеспечивают многообразие изделий серии *Barcon*. Для данных устройств могут быть реализованы различные способы электрических подключений, в том числе на базе сетевых протоколов *PROFIBUS* или *HART*.

Основные достоинства гидростатического метода:

Рисунок 10.29

– точность;

– возможность применения для загрязненных жидкостей;

– реализация метода не предполагает использования подвижных механизмов;

– соответствующее оборудование не нуждается в сложном техническом обслуживании.

К недостаткам этого метода относят:

– движение жидкости вызывает изменение давления и приводит к ошибкам измерения (давление относительно плоскости отсчёта зависит от скорости потока жидкости – следствие закона Бернулли);

– атмосферное давление должно быть скомпенсировано;

– изменение плотности жидкости может быть причиной ошибки измерения.

В уровнемерах *емкостного* типа используется зависимость электрической емкости чувствительного элемента первичного измерительного преобразователя от уровня жидкости. Конструктивно емкостные чувствительные элементы выполняют в виде коаксиально расположенных цилиндрических электродов или параллельно расположенных плоских электродов. Конструкция емкостного чувствительного элемента с коаксиально расположенными электродами определяется физико-химическими свойствами жидкости. Для неэлектропроводных (диэлектрических) жидкостей — жидкостей, имеющих удельную электропроводность менее 10^{-6} См/м, применяют уровнемеры, оснащенные чувствительным элементом, схемы которого представлены на рисунке 10.30.

Чувствительный элемент (рис. 10.30, а) состоит из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, частично погруженных в жидкость. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, межэлектродное пространство которого до высоты h заполнено жидкостью, а пространство H-h – парогазовой смесью. Для фиксирования взаимного расположения электродов предусмотрен изолятор 3.

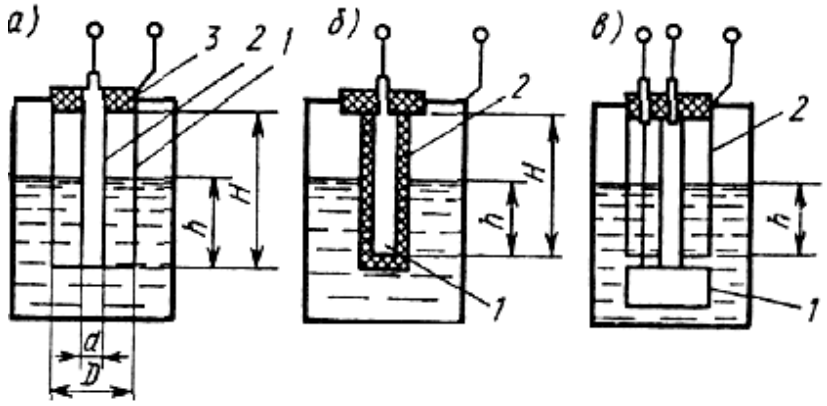


Рисунок 10.30 – Схемы емкостных уровнемеров

В общем виде электрическая емкость цилиндрического конденсатора определяется уравнением

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H}{\ln\frac{D}{d}},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; H – высота электродов; D, d – диаметры соответственно наружного и внутреннего электродов.

Для цилиндрического конденсатора, межэлектродное пространство которого заполняется веществами, обладающими различными диэлектрическими проницаемостями, как показано на рис.8, а, полная емкость $C_п$ определяется выражением:

$$C_п = C_0 + C_1 + C_2$$

где C_0 – емкость проходного изолятора; C_1 – емкость межэлектродного пространства, заполненного жидкостью; C_2 – емкость межэлектродного пространства, заполненного парогазовой смесью.

$$C_п = \frac{2\pi\varepsilon_ж\varepsilon_0 h}{\ln\frac{D}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon_г\varepsilon_0 (H-h)}{\ln\frac{D}{d}} + C_0.$$

Для паров жидкости и газов $\varepsilon_г \approx 1$, C_0 – величина постоянная, отсюда:

$$C_п = C_0 + \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{D}{d}} H\left[1 + (\varepsilon_ж - 1)\frac{h}{H}\right].$$

Данное уравнение представляет собой статическую характеристику емкостного чувствительного элемента для неэлектропроводных сред. Величина $\varepsilon_{ж}$ является функцией температуры, поэтому для исключения влияния температуры жидкости на результат измерения применяют компенсационный конденсатор (рис. 10.30, в). Компенсационный конденсатор *1* размещается ниже ёмкостного чувствительного элемента *2* и полностью погружен в

жидкость.

Для измерения уровня электропроводных жидкостей – жидкостей с удельной проводимостью более 10^{-4} См/м применяют уровнемеры, оснащенные емкостным чувствительным элементом, изображенным на рис.8, *б*. Чувствительный элемент представляет собой металлический электрод *1*, покрытый фторопластовой изоляцией *2*. Электрод частично погружен в жидкость. В качестве второго электрода используется либо стенка резервуара, если она металлическая, либо специальный металлический электрод, если стенка резервуара выполнена из диэлектрика. Полная емкость чувствительного элемента, изображенного на рис. 10.30, в, определяется уравнением:

$$C_n = C_0 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2},$$

где C_0 – емкость проходного изолятора; C_1 – емкость конденсатора, образованного электродом *1* и поверхностью жидкости на границе с изолятором; C_2 – емкость конденсатора, образованного поверхностью жидкости на границе с изолятором и стенками резервуара.

Преобразование электрической емкости чувствительных элементов в сигнал измерительной информации осуществляется мостовым, резонансным или импульсным методом.

Основные достоинства емкостных уровнемеров:

– простота установки и эксплуатации;

– многофункциональность применения;

– возможность использования с клейкими веществами;

– активная компенсация влияния раскачивания зонда.

4. Основные технические характеристики этих датчиков аналогичны характеристикам изделий серии *HR-6001*.

Общие технические данные кондуктометрических выключателей:

– точность: 4 мм.

– температура контролируемого вещества: до 150°С.

– рабочее давление: до 30 бар.

В настоящее время существуют различные принципы построения *акустических* (*ультразвуковых*) *уровнемеров*, из которых широкое распространение получил принцип локации.

В соответствии с этим принципом измерение уровня осуществляют по времени прохождения ультразвуковыми колебаниями расстояния от излучателя до границы раздела двух сред и обратно до приемника излучения. В уровнемерах, называемых акустическими, локация границы раздела двух сред осуществляется со стороны газа.

Преимуществом акустических уровнемеров является независимость их показаний от физико-химических свойств и состава рабочей среды. Это позволяет использовать их для измерения уровня неоднородных кристаллизирующихся и выпадающих в осадок жидкостей. К недостаткам

следует отнести влияние на показания уровнемеров температуры, давления и состава газа.

Акустические уровнемеры широко применяют для дистанционного измерения уровня жидкостей в пищевой, химической, бумажной и других отраслях промышленности. Уровнемеры этого типа могут быть использованы для измерения уровня различных жидкостей (однородных и неоднородных, вязких, агрессивных, кристаллизующихся, выпадающих в осадок), находящихся под давлением до 40 кгс/см^2 (4 МПа). Акустические уровнемеры не могут быть использованы для измерения уровня жидкостей, находящихся под высоким избыточным и вакуумметрическим давлением.

Как правило, акустические уровнемеры представляют собой сочетание первичного, промежуточного, а в некоторых случаях и передающего измерительных преобразователей. Поэтому, строго говоря, акустические уровнемеры следует рассматривать как часть измерительной системы с акустическими измерительными преобразователями.

В зависимости от используемого параметра звуковой волны для измерения уровня жидкости различают следующие способы измерения:

– частотный,

– фазовый,

– импульсный.

Мерой уровня жидкости h является время прохождения ультразвуковых колебаний t от пьезометрического преобразователя (излучателя) до плоскости границы раздела среды (жидкость - газ) и обратно до приемника. Время прохождения ультразвуковых колебаний t определяется выражением:

$$t = \frac{2h}{a},$$

где a – скорость распространения звука в жидкости.

Пауза $t_п$ между двумя последовательными посылаемыми импульсами определяется выражением:

$$t_n \geq 10t = \frac{20h}{a}.$$

В табл. 10.3 приведены значения времени прохождения ультразвуковым сигналом некоторых расстояний в воздушной среде при нормальных условиях (двойное расстояние уже учтено); эти данные помогают учесть инерционность ультразвукового (УЗК) метода в некоторых применениях.

Таблица 10.3 - Время прохождения УЗК-сигналом некоторых расстояний

Расстояние , м	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
Время прохождения УЗ сигнала, мс	0,6	1,2	3	6	12	30	60

Уровнемер (рис. 10.31) состоит из пьезометрического преобразователя *1*, электронного блока *7* и вторичного прибора *5*.

Электронный блок включает в себя генератор *6*, задающий частоту

повторения импульсов; генератор импульсов *2*, посылаемый в жидкость, уровень которой измеряется; приёмного устройства-усилителя *3*; схемы измерения времени *4*.

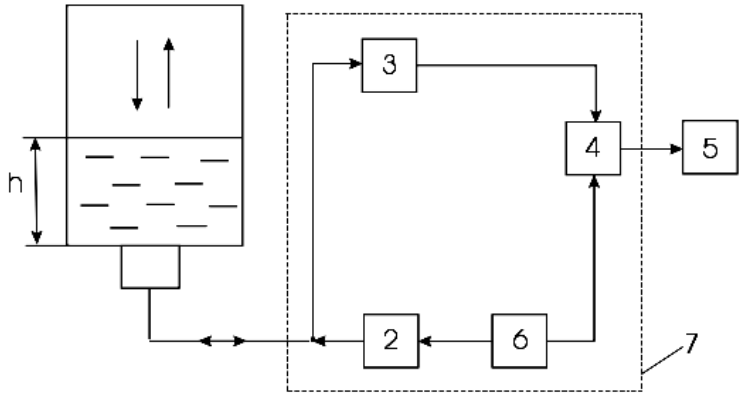


Рисунок 10.31 – Схема ультразвукового уровнемера

Генератор, задающий частоту повторения импульсов, управляет работой генератора импульсов и схемой измерения времени. Генератор *2* вырабатывает электрические импульсы с определенной частотой повторения, которые преобразуются в ультразвуковые при помощи пьезометрического преобразователя, установленного с внешней стороны дна резервуара. Распространяясь в жидкой среде, ультразвуковые импульсы отражаются от плоскости границы раздела жидкость-газ и поступают на тот же пьезометрический преобразователь. Отраженные импульсы после обратного преобразования в электрические усиливаются и формируются усилителем *3* и подаются на схему измерения времени. Выходным сигналом измерительной схемы являются постоянное напряжение, которое поступает на вход вторичного прибора *5*.

Основные достоинства УЗК-метода:

– бесконтактный;

– применим для загрязненных жидкостей;

– реализация метода не предъявляет высоких требований к износостойкости и прочности оборудования;



– независимость от плотности контролируемой среды.

Недостатки:

– большое расхождение конуса излучения;

– отражения от нестационарных препятствий (например, мешалок) могут вызвать ошибки измерения;

– применим только в резервуарах с нормальным атмосферным давлением;

– на сигнал оказывают влияние пыль, пар, газовые смеси и пена.

Рассмотрим подробнее некоторые образцы ультразвуковых уровнемеров.

Ультразвуковые бесконтактные датчики *Sonar-BERO* фирмы *Siemens* (рис. 10.34).

Рисунок 10.34

В зоне действия датчика можно устанавливать коммутационную зону. Коммутирующий выход датчика можно настроить таким образом, чтобы он срабатывал лишь при появлении какого-либо объекта в установленной коммутационной.

При применении *Sonar-BERO* в качестве классического бесконтактного датчика распознавание попавших в установленную коммутационную зону объектов будет сигнализироваться цифровым сигналом на коммутирующем выходе.

Датчики *направленного электромагнитного излучения* работают на основе измерения коэффициента отражения методом совмещения прямого и отраженного испытательных сигналов и определения времени прохождения излученного импульса до поверхности контролируемой среды (временного сдвига отраженного сигнала – рис. 10.35).



Рисунок 10.35 – Метод направленного электромагнитного излучения

Повторяющиеся импульсы наносекундного диапазона длительностей излучаются с интервалом 1 мкс. Принцип измерения напоминает ультразвуковой метод определения уровня. Только в системе с направленным электромагнитным излучением импульсы распространяются неравномерно в пределах границ диаграммы направленности, а локализованы вдоль стержня или троса датчика, играющего роль волновода.

Из-за чрезвычайно низкой мощности и направленности излучения импульсов микроволны не рассеиваются в пространстве, поэтому применение этих устройств не требует согласований с комитетами по радиочастотам.

Благодаря низкому энергопотреблению достаточно двухпроводной схемы подключения микроволнового датчика с питанием через информационный

канал. В силу этой же причины датчики являются взрывобезопасными, что позволяет устанавливать их во взрывоопасных зонах.

Основные достоинства метода направленного электромагнитного излучения:

– управление микроволновыми датчиками посредством меню и их калибровка на этапе изготовления обеспечивают простой ввод в эксплуатацию;

– надежное измерение порошкообразных материалов даже в процессе наполнения емкости;

– измерение уровня жидкостей при образовании пены в условиях повышения давления;

– надежное и точное измерение в обводных и расширительных трубах;

– возможность эффективного устранения помех отражения от арматуры (балок, укосин и др.) и структурных элементов стенок (например, гофрированных листов), резервуаров или узких силосных бункеров;

– абсолютная независимость метода от влияний таких факторов технологического процесса как давление, температура, наличие подвижных поверхностей, пена, туман, пыль.

К недостаткам следует отнести:

– клейкие вещества могут вызвать отказы;

– диэлектрическая постоянная измеряемого вещества не должна превышать 1,6.

В 1976 году *радарная технология* впервые была применена шведской фирмой *SAAB* для контроля уровня сырой нефти, перевозимой супертанкерами. Уровнемеры, основанные на радарном методе измерения, оказались практически свободными от многих недостатков, таких как частое техническое обслуживание, связанное с необходимостью удаления различного рода отложений и загрязнений, поскольку все известные в то время способы измерения уровня являлись контактными по своей природе. Именно это обстоятельство и обеспечило их широкое применение в самых различных отраслях промышленности.

В настоящее время в радарных системах контроля уровня применяются преимущественно две технологии:

– с непрерывным частотно-модулированным излучением (*FMCW — frequency modulated continuous wave*)

– с импульсным излучением сигнала.

Принцип действия технологии с непрерывным частотно-модулированным излучением основан на том, что уровнемер излучает микроволновый сигнал, частота которого изменяется непрерывно по линейному закону между двумя значениями f_1 и f_2. Отраженный от поверхности контролируемой среды (жидкость, сыпучий материал и т.п.) сигнал принимается той же антенной и обрабатывается. Его частота сравнивается с частотой сигнала, излучаемого в данный момент времени. Значение разности частот (f_d) прямо пропорционально расстоянию до поверхности (l). Принцип очень прост, но на пути его практической реализации существует множество технических и технологических проблем. Одной из важнейших, непосредственно влияющих

на точность измерения, является обеспечение высокой линейности изменения частоты сигнала и особенно ее температурной стабильности, поскольку уровнемеры, как правило, предназначены для эксплуатации в очень широком температурном диапазоне.

Идеальными для уровнемера этого типа являются условия, когда поверхность контролируемой среды имеет достаточно большую площадь, на ней отсутствуют какие-либо возмущения, а сам резервуар полностью свободен от каких-либо внутренних конструктивных элементов.

Однако реальные условия разительно отличаются от идеальных и приносят дополнительные проблемы, связанные с образованием большого числа паразитных эхосигналов от элементов конструкции, неровностей поверхности (рис.10.36).

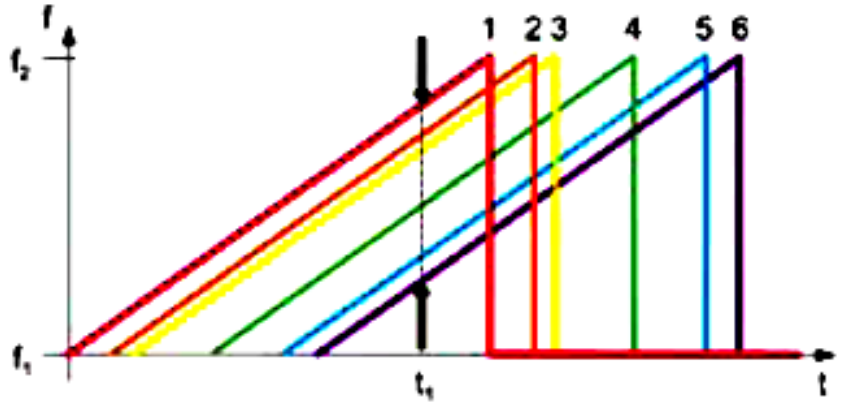


Рисунок 10.36 – Отражения при использовании технологии *FMCW*:
1 – излученный сигнал; 1,2,3,4,5 – паразитные эхо-сигналы;
6 – полезный сигнал.

Кроме того, прием и передача сигнала осуществляются одновременно. В результате на входе приемника уровнемера присутствует сложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде. Для выделения частот эхосигналов применяется алгоритм, основанный на методе быстрого преобразования Фурье. Для его реализации требуются значительные вычислительные ресурсы и относительно продолжительное время. Результатом преобразования является частотный спектр принятого сигнала, в котором относительная амплитуда каждой частотной составляющей (U) пропорциональна мощности конкретного эхосигнала, а величина частотного сдвига пропорциональна расстоянию источника этого эхосигнала от излучателя.

В радарах импульсного типа используется метод определения расстояния, основанный на непосредственном измерении времени прохождения сигнала высокой частоты (СВЧ) от излучателя до контролируемой поверхности и обратно. В результате для отраженного сигнала применение процедуры быстрого преобразования Фурье не требуется. Однако время прохождения сигналом дистанции в несколько метров составляет всего единицы наносекунд. Поэтому для обеспечения измерения столь малых значений с требуемой точностью все-таки требуется применение специальных методов обработки

сигнала. Для этого обычно используется преобразование СВЧ-сигнала в сигнал промежуточной частоты ультразвукового диапазона. После такого преобразования к обработке сигналов радарного уровнемера могут быть применимы методы и алгоритмы, используемые в ультразвуковых приборах.

Радарные уровнемеры импульсного типа обладают рядом преимуществ перед устройствами, использующими технологию *FMCW*. Во-первых, принимаемые эхосигналы вне зависимости от природы их источника разнесены во времени, что обеспечивает их более простое разделение. Во-вторых, среднее энергопотребление импульсных уровнемеров составляет единицы мкВт (пиковая мощность при излучении СВЧ-импульса составляет около 1 мВт), что позволяет использовать для их подключения двухпроводную схему с питанием от измерительной цепи со стандартным токовым сигналом 4-20 мА (в приборах, работающих по технологии *FMCW*, энергопотребление существенно выше из-за непрерывного характера излучения). В-третьих, в импульсных уровнемерах электроника для выполнения первичной обработки сигнала проще, а сама обработка выполняется исключительно аппаратными средствами; в результате благодаря меньшему числу комплектующих надежность прибора получается потенциально выше.

Между радарными уровнемерами импульсного типа и уровнемерами, использующими технологию *FMCW*, не существует принципиального различия по достигаемой точности измерения.

Приборы, используемые для контроля уровня в технологических установках, обладают точностью порядка нескольких миллиметров. Реально же достигаемая точность измерения определяется и такими факторами, как конкретные условия применения, тип и конструктивное исполнение антенны, качество электронных компонентов, возможности программного обеспечения обработки эхо-сигнала.

Одним из наиболее важных элементов радарного уровнемера является его антенная система. Именно от антенны зависит, какая часть излученного сигнала достигнет поверхности контролируемого материала и какая часть отраженного сигнала будет принята и передана на вход электронного блока для последующей обработки. В радарных системах контроля уровня преимущественно используются антенны пяти типов (рис. 10.37): рупорная, стержневая, трубчатая, параболическая и планарная.

Рупорная и стержневая антенны наиболее широко используются в составе приборов, предназначенных для контроля уровня в технологических установках. Трубчатые антенны применяются в тех случаях, когда выполнение измерения посредством рупорной или стержневой антенны связано с очень большими трудностями или просто невозможно, например при наличии пены, сильного испарения или высокой турбулентности контролируемой жидкости. Параболические и планарные антенны используются исключительно в составе систем коммерческого учета нефтепродуктов.

При контроле уровня в закрытых емкостях, а это наиболее частое применение радарных уровнемеров, антенна, находясь внутри резервуара, подвергается воздействию всех неблагоприятных факторов, которые там только

могут присутствовать. К ним относятся и высокое давление, и высокая температура, и агрессивные испарения, и пыль, и т.д. Кроме того, конструкция самих резервуаров отличается огромным разнообразием и потому способна создать массу проблем при установке уровнемера. В связи с этим ведущие мировые производители радарных уровнемеров в программе поставок указывают различные варианты исполнения оборудования.



Рисунок 10.37 – Радарные уровнемеры *Siemens Milltronics*:
а) с рупорной и стержневой антеннами; б) с трубчатой антенной;
в) с параболической антенной; г) с планарной антенной.

Электронный блок радарного уровнемера составляет единое целое с антенной системой вследствие особенностей используемого принципа действия. Данный блок отвечает как за формирование зондирующего сигнала, так и за обработку принятого эхо-сигнала. Измерительная информация (расстояние, уровень, объем и т.п.) может либо просто отображаться на встроенном индикаторе, либо выдаваться вовне с помощью различных аналоговых и цифровых интерфейсов. В простейшем случае применяется стандартная токовая петля 4-20 мА с 2- или 3-проводной схемой подключения. В последнее время в таких приборах обычно имеется поддержка *HART*-протокола, который используется, в частности, для удаленной настройки измерительной системы. Для этой же цели производители оборудования предлагают специальные программные продукты, функционирующие на сервисном компьютере и обеспечивающие в удобной и наглядной форме настройку, калибровку и диагностику уровнемеров.

Вне зависимости от используемого принципа в радарных уровнемерах применяются СВЧ-сигналы с несущей частотой, лежащей в диапазоне от 5,8 до 26 ГГц.

В высокочастотных приборах антенна имеет меньшие размеры и при равных размерах с антенной низкочастотного прибора обеспечивает более узкую диаграмму направленности. Это позволяет использовать для установки

уровнемера отверстия в резервуаре гораздо меньших размеров, что в некоторых случаях может иметь решающее значение. Рупорная антенна радарного уровнемера диапазона 26 ГГц диаметром 40 мм имеет диаграмму направленности приблизительно такой же ширины, что и антенна уровнемера диапазона 6 ГГц диаметром 150 мм. Более узкая диаграмма направленности очень важна для получения эхо-сигнала с наименьшим числом паразитных отражений от различных внутренних конструктивных элементов резервуара, таких как швы, дефлекторы, мешалки и т.д. Для высокочастотных уровнемеров ситуация осложняется тем, что из-за более короткой длины волны излучения паразитные эхо-сигналы будут формироваться от более мелких объектов, которые для низкочастотных уровнемеров будут просто незаметны.

По этой же причине высокочастотные уровнемеры более чувствительны к наличию разного рода неровностей на контролируемой поверхности, которые вызывают повышенное рассеивание зондирующего излучения и, как следствие, снижают уровень полезного эхо-сигнала. Поэтому низкочастотные уровнемеры лучше приспособлены для контроля уровня жидкостей с неспокойной поверхностью.

Высокочастотные уровнемеры более чувствительны к наличию конденсата и отложениям материала на поверхности антенны, поскольку эти факторы вызывают более сильное ослабление именно высокочастотного сигнала. Кроме того, одинаковый уровень отложений или конденсата сильнее сказывается на эффективности работы антенн с меньшими размерами. В то же время, например, рупорная антенна диаметром 6 дюймов для диапазона 5,8 ГГц практически нечувствительна к конденсату и гораздо более устойчива к отложениям материала на ее поверхности.

Для контроля уровня при наличии высокого уровня пыли (цемент) или испарений (паровой котел) низкочастотные уровнемеры имеют преимущество благодаря меньшему ослаблению сигнала, вызываемому указанными факторами.

Влияние пены на результат измерения определяется такими ее параметрами, как плотность, диэлектрическая проницаемость и проводимость. Сухая пена достаточно легко проницаема для СВЧ-излучения. Мокрая пена, присутствующая, например, в бродильных чанах, представляет для него труднопреодолимое препятствие. В общем же случае низкочастотные уровнемеры показывают лучшие результаты работы при наличии пены на поверхности контролируемого вещества. Так, например, тонкий слой пены моющего средства на поверхности воды непреодолим для сигнала высокочастотного уровнемера, в то время как уровнемер диапазона 5,8 ГГц позволяет производить измерения при толщине слоя пены до 150 мм и даже выше. Однако толстый слой пены способен вносить дополнительную погрешность в измерения из-за различия скорости распространения СВЧ-сигнала в воздушной среде и пене.

Для высокочастотных уровнемеров характерны гораздо меньшие размеры зоны нечувствительности по сравнению с низкочастотными, поэтому они

имеют дополнительное преимущество при использовании в резервуарах и успокоительных трубах небольшого размера.

Сущность метода измерения уровня с помощью *магнитных погружных зондов* заключается в том, что смонтированный на поплавке зонда постоянный магнит, вызывает срабатывание герметизированных магнитоуправляемых контактов, установленных на направляющей трубе. При срабатывании эти контакты включаются между последовательно включенными резисторами внутри направляющей трубы; таким образом при перемещениях поплавка общее значение сопротивления изменяется *квазинепрерывно*, в зависимости от разрешающей способности зонда. Точность измерения не зависит от электрических свойств среды, а также от давления, температуры и плотности.

Основные достоинства:

– простой принцип действия;

– несложный монтаж;

– не требуется регулировка в месте установки.

Недостатки:

– плавучесть зависит от размера поплавка;

– точки переключения зависят от плотности среды;

– максимальная длина трубки зонда около 6 м;

– минимально допустимая плотность контролируемого вещества, как правило, не превышает 0,7 г/см^3;

– можно использовать только в очищенных жидкостях.

Магнитные погружные зонды *LMC8S3-G6S-I-Ex* (рис. 10.38) для непрерывного измерения уровня фирмы *PEPPERL+FUCHS* поставляются в корпусах из пластика или нержавеющей стали, во взрывозащищённом исполнении, с шаровидными или цилиндрическими поплавками.



Рисунок 10.38 – Магнитный погружной зонд *LMC8S3-G6S-I-Ex*

Максимальная длина направляющей трубы достигает 3 м. Выход устройства — 2-проводной токовый (4…20 мА) или 3-проводной для подключения к потенциометру (40 кОм). В месте резьбового соединения используются такие материалы, как нержавеющая сталь, полипропилен или поливинилденфторид (устойчив к воздействию масел, смазок, кислот, щелочей и растворителей).

Погружной зонд *МЕТРАН-55-ЛМП 307* (рис.10.39) российского производства имеет следующие характеристики:

Измеряемая среда: жидкости, не агрессивные к нержавеющей стали; вязкие среды.

Диапазон измеряемых давлений (уровня):

минимальный 0...10 кПа (1 м вод.ст.);

максимальный О...2,5 МПа (250 м вод.ст.);

Диаметр зонда 19 мм.

Погрешность измерений ±0,25%, ±0,35%, ±0,5%.

Выходной сигнал 4-20 мА.

Температура измеряемой среды от 0 до 50°С (до 40 кПа), от 0 до 70°С (свыше 40 кПа).

а)



б)

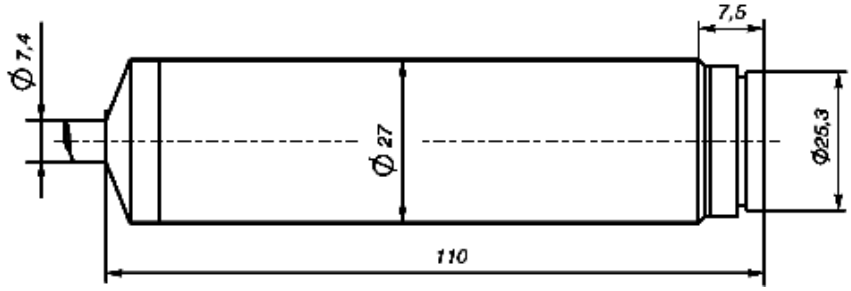


Рисунок 10.39 – Погружной зонд *МЕТРАН-55-ЛМП 307*:
а) внешний вид; б) габаритные размеры.

Кондуктометрический метод основан на изменении величины оперативного тока. При пустом резервуаре сопротивление между двумя электродами бесконечно велико; при погружении концов электродов в проводящую среду сопротивление уменьшается соответственно величине ее проводимости. Область применения метода распространяется на контроль уровня электропроводящих жидкостей, сыпучих или вязких материалов. Необходимо наличие у контролируемого вещества определённой минимальной проводимости, чтобы при измерении уровня кондуктометрическим методом можно было получить различимый сигнал изменения тока.

При реализации кондуктометрического метода электрод устанавливаются выше поверхности проводящей жидкости, уровень которой контролируется. Когда жидкость достигает той точки, где электрод контактирует с жидкостью, замыкается электрическая цепь между электродом и корпусом технологического аппарата. При этом срабатывает реле, контакты которого включены в схему сигнализации.

Если требуется выявить несколько значений уровня, используется соответствующее кратное число электродов. Для того, чтобы исключить такие

эффекты, как электролиз жидкости или взрыв, применяются постоянный ток достаточно малой величины и переменный ток.

На основе данного метода может быть легко и экономично реализовано определение не только предельного, но и межфазного уровня; например, достаточно просто выявляется граница между водой и непроводящими жидкостями в разделителях (сепараторах) масла или бензина.

Данный метод применяют главным образом для измерения предельного уровня в цистернах, бункерах, баках и паровых котлах. Воспламеняющиеся жидкости, такие как различные виды топлива, масла и растворители, являются диэлектриками, поэтому для них этот метод неприменим в отличие от кислот, щелочей и растворов, содержащих воду и являющихся проводниками. Уровень агрессивных жидкостей определяется путем использования электродов, выполненных из высокопрочных материалов.

Взаимодействие двух электродных стержней (или электрода и металлической стенки резервуара) со схемой генератора колебаний преобразователя приводит к созданию переменного электрического поля. По мере того как уровень вещества увеличивается и контролируемое вещество входит в контакт с электродами, колебательный контур демпфируется. Детектор с регулируемым порогом фиксирует изменение электрического поля и формирует соответствующий сигнал.

Этот метод определения предельного уровня может быть реализован с использованием стандартных электродов, применяемых для кондуктометрического или емкостного методов, и находит наиболее широкое применение при определении границ раздела в масляных или бензиновых сепараторах и отстойниках.

Кондуктометрические концевые выключатели с одностержневыми электродами *HR-6001* фирмы *PEPPERL+FUCHS*. Эта серия включает модели с электродом диаметром 4 или 6 мм. Длина электродов диаметром 6 мм достигает 1,5 м. Для изготовления электродов применяются различные материалы: нержавеющая сталь, Hastelloy B (NiMo28), Hastelloy C (NiMo16Cr16Ti), титан, тантал, а также покрытие из политетрафторэтилена; материал резьбовых соединителей: нержавеющая сталь, политетрафторэтилен (устойчив к воздействию многих химикатов), полипропилен (устойчив к воздействиям кислот, щелочей, смазок, масел и растворителей).

Принцип действия выключателя с одностержневыми электродами достаточно прост: реле электрода вырабатывает измерительное напряжение переменного тока; когда проводящая среда устанавливает контакт с электродом, измерительная цепь замыкается и реле электрода формирует переключательный сигнал в соответствии с выбранным порогом чувствительности.

Серия *HR-6051* фирмы *PEPPERL+FUCHS* включает концевые выключатели с многостержневыми электродами с числом электродов от 1 до 4.

Данный метод получил также широкое распространение в горной промышленности для контроля заполняемости водосборников, бункеров и др. Контролируемая среда – вода, уголь, порода.

Принцип действия метода заключается в прохождении операторного тока малой амплитуды по цепи: «реле контроля уровня» – «электродный датчик уровня» – «контролируемая среда» – «корпус бункера (водосборника)» – «реле контроля уровня». В качестве реле контроля уровня используются серийно выпускаемые РКУ.1м, РКУ-Н, ИКС-2м и др.

Электродный датчик уровня ДУ-1 (рис. 10.40) имеет пластмассовый корпус 14 с крышкой 12. Внутри корпуса на стальном основании 6 с помощью гайки 10 жестко закреплён рым-болт 2 с крюком 1 подвешиваемого электрода. Резиновые прокладки 3,5,11 служат для уплотнения при монтаже. Через кабельный ввод 7 с резиновым уплотнителем 8 внутрь корпуса вводится кабель, подсоединяемый с помощью зажима 13 – к охранному кольцу 4, впрессованному вокруг рым-болта в нижнюю часть корпуса. В качестве электрода может использоваться металлическая труба, трос или цепь.

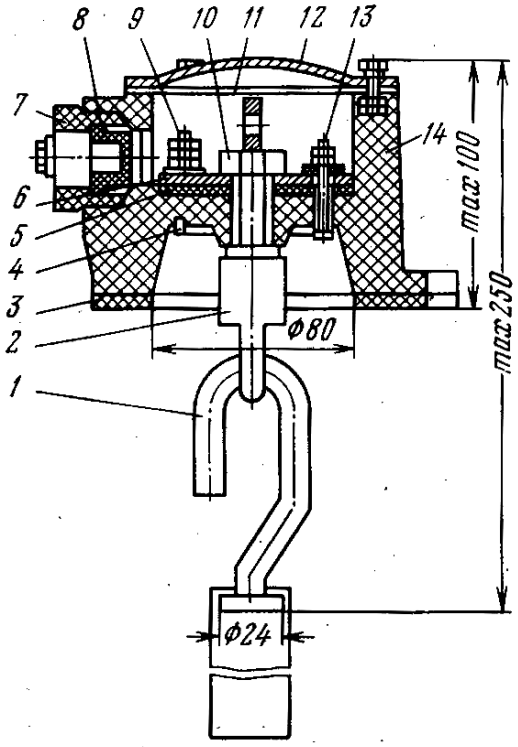


Рисунок 10.40 – Датчик уровня ДУ-1

Рекомендуемая литература

1. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб.для ВУЗов. – М.: Высш.шк., 1989. С.242-258.
2. Справочник по средствам автоматики / Б.И. Филиппович, А.П. Шорыгин, В.А. Царьков и др.; Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. С.60-64, 89, 92-97, 105-108.
3. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник /В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская, В.А.Бек и др./ Под общ. ред. В.В.Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. С.210-224, 455-471.
4. Ланге М.В. Автоматика и автоматизация производственных процессов: Учеб. пособие. – Караганда, КарПТИ, 1983. С.36-39.

5. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. С.278-291.
6. Жданкин В.К. Приборы для измерения уровня // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 4. – С.6-19.
7. Жданкин В.К. Сигнализаторы изменения уровня // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 2. – С.6-19.
8. Бармин А. Радарные системы контроля уровня // Современные технологии автоматизации. – 2002. – №4. – С.60-64.

Контрольные задания для СРД [2, 3, 5-7]

1. Датчики-реле уровня поплавковые, емкостные, индуктивные, радиоизотопные, фотоэлектрические, акустические, мембранные и работающие на принципе проводимости

Тема 11 Измерительные мосты

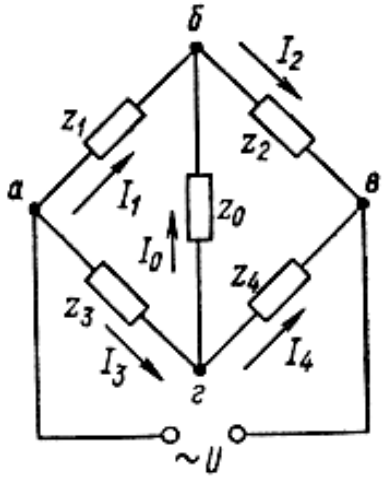
План лекции

1. Основы теории мостовых схем
2. Классификация измерительных мостов

1. В электроизмерительной технике получили широкое распространение *электроизмерительные мосты* – измерительные приборы, построенные на основе метода сравнения с мерой. Обладая высокой чувствительностью и относительной простотой конструкции, они позволяют с высокой точностью измерять электрические величины. В настоящее время применяются мосты как с ручным, так и с автоматическим уравновешиванием.

Мостовые схемы применяют для измерения сопротивления, индуктивности, емкости, добротности, угла потерь. На основе мостовых схем работают приборы для измерения неэлектрических величин (температуры, давления и разрежения, линейных перемещений, объемного содержания газа в атмосфере и др.).

Плечи одинарного моста (рис.11.1) содержат в общем случае комплексные сопротивления Z_1-Z_4. Ветвь *а-в* называют диагональю питания. В выходной (*измерительной*) диагонали *б-г* находится нагрузка Z_O.



Равновесие моста имеет место при $I_O=0$:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \qquad (11.1)$$

В развернутой форме выражения полных сопротивлений плеч моста имеют вид

$$Z_1=R_1+j\cdot X_1;\ Z_2=R_2+j\cdot X_2;\ Z_3=R_3+j\cdot X_3;\ Z_4=R_4+j\cdot X_4 \qquad (11.2)$$

Подставив (7.2) в выражение (7.1) получим *уравнения равновесия*:

$$\begin{cases} R_1 \cdot R_4 - X_1 \cdot X_4 = R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3 \\ R_1 \cdot X_4 + R_4 \cdot X_1 = R_2 \cdot X_3 + R_3 \cdot X_2 \end{cases} \quad (11.3)$$

Рисунок 11.1 – Схема одинарного моста переменного тока

Наличие двух уравнений равновесия для моста переменного тока означает необходимость регулировки не менее двух параметров для достижения равновесия (баланса). При этом имеет значение *сходимость моста*, под которой понимают возможность достижения состояния баланса определенным числом поочередных переходов от регулировки одного параметра к регулировке другого.

Мосты, в которых измеряемую величину определяют из условия равновесия, называют *уравновешиваемыми* или *равновесными*. Измеряемую величину можно определять и по значению тока или напряжения в измерительной диагонали моста – такие мосты называют *неравновесными* или *мостами отклонения*. Неравновесные мосты удобнее в эксплуатации, однако они не обладают точностью равновесных мостов.

Схема *одинарного моста постоянного тока* не отличается от рассмотренной выше схемы. Плечи моста имеют активные сопротивления R_1–R_4, а выходная диагональ – гальванометр с R_O. Подобная схема моста постоянного тока носит название *моста Уитстона*. Рассмотрим на примере этого моста постоянного тока вывод уравнения равновесия, опущенный в предыдущем случае.

Если мост уравновешен, т.е. $I_O=0$, то

$$I_1=I_2, \quad I_3=I_4 \quad \text{и} \quad R_1 \cdot I_1=R_3 \cdot I_3, \quad R_2 \cdot I_2=R_4 \cdot I_4$$

Разделив одно уравнение на другое почленно, получим

$$R_1/R_2=R_3/R_4 \quad \text{или} \quad R_1 \cdot R_4=R_2 \cdot R_3 \quad (11.4)$$

Если под R_1 подразумевать объект с неизвестным сопротивлением R_X , то получим

$$R_X=R_2 \cdot R_3/R_4 \quad (11.5)$$

Это выражение принято называть *уравнением равновесия одинарного моста постоянного тока*. Здесь R_3 и R_4 являются плечами отношения, а R_2 – плечом сравнения.

Важнейшая характеристика моста – *чувствительность*. Поскольку выходными величинами моста являются ток, напряжение или мощность, то соответственно, различают чувствительность мостовой схемы по току, напряжению и мощности.

В мостах переменного тока чувствительность обычно определяют по напряжению:

$$S_{mu} = \frac{U_{Z0}}{\xi}, \qquad \text{где } \xi = \Delta Z_1 / Z_1. \quad (11.6)$$

На основании (11.2) выражения чувствительности моста постоянного тока по току, напряжению и мощности запишутся соответственно:

$$S_{mI} = \frac{\Delta I}{\Delta R_1}; \qquad S_{mU} = \frac{\Delta U}{\Delta R_1}; \qquad S_{mP} = \frac{\Delta P}{\Delta R_1} \quad , \qquad (11.7)$$

где Δ I, ΔU и Δ P – соответственно приращения тока, напряжения и мощности в диагонали моста при изменении сопротивления плеча на ΔR_1.

2. Мосты постоянного и переменного тока различаются видом рабочего напряжения. В мостах отклонения выходной сигнал индицируется. В уравновешиваемых же мостах выходной сигнал обнуляется путем уравновешивания схемы. В зависимости от способа уравновешивания измерительные мосты различают на основе *магазина сопротивлений* (*декадные*) и *реохордные* (*реостатные*).

В декадном мосте отношения плеч имеют неизменные значения, а для уравновешивания моста применяется *образцовое сопротивление*, регулируемое малыми ступенями. В реостатном – отношение плеч во время измерений изменяется путем регулирования сопротивления реостата, находящегося в одном из плеч мостовой схемы.



Рисунок 11.2 – Классификация измерительных мостов

Часто мосты называют по имени изобретателя или первого исследователя схемы. Так, получили известность: мост Максвелла – мост переменного тока для измерения индуктивности и добротности катушек; мост Вина (рис.11.3) – мост переменного тока для измерения емкости и коэффициента потерь конденсаторов;

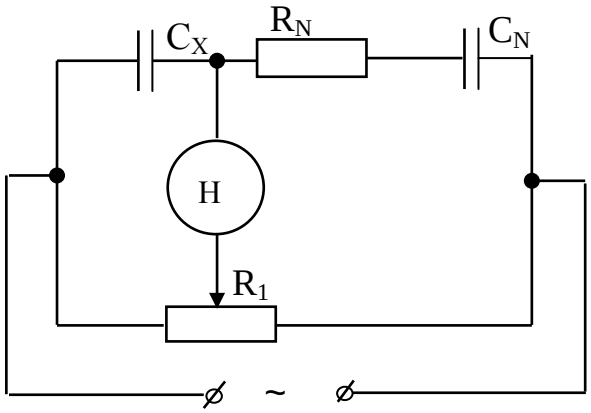


Рисунок 11.3 – Схема моста Вина

мост Томсона (рис.11.4) – двойной мост постоянного тока для измерения преимущественно малых сопротивлений (менее 10 мОм).

В схемах измерительных мостов принято обозначать с символом N образцовые элементы (R_N, C_N). А *нуль–индикатор* (*НИ*), применяющийся в схемах, используется для индикации и контроля положения равновесия уравновешиваемых измерительных схем. НИ позволяет лишь качественно оценить измеряемую величину по отношению к нулевой отметке шкалы (больше или меньше).

В настоящее время выпускаются *универсальные мосты*, позволяющие измерять сопротивления на постоянном токе, а емкость, угол потерь, индуктивность и добротность на переменном токе.

В качестве примера можно привести *универсальный одинарно-двойной мост Р3009* для измерений на постоянном токе сопротивлений от 10^{-8} до 10^{10} Ом.

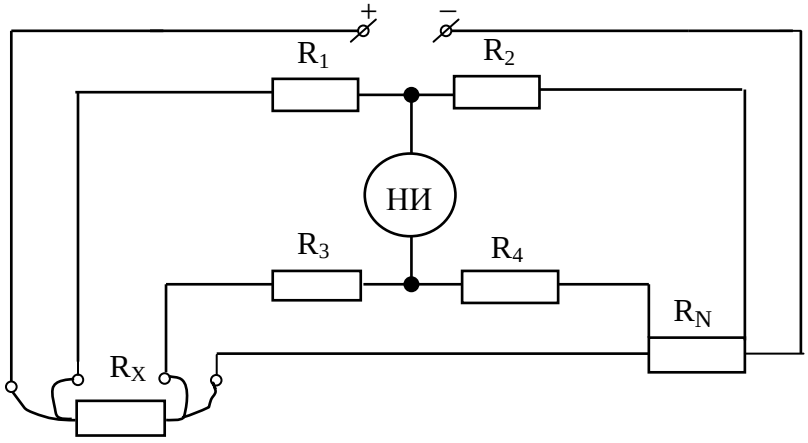


Рисунок 11.4 – Схема моста Томсона

Для измерения неэлектрических величин (уровня жидкости, влажности, линейного перемещения и др.) возможно применение трансформаторных измерительных мостов. На рис.11.5 приведены принципиальные схемы четырехплечего трансформаторного измерительного моста, содержащего индуктивно-связанные плечи в диагонали источника питания (а) и в диагонали нуль-индикатора (б).

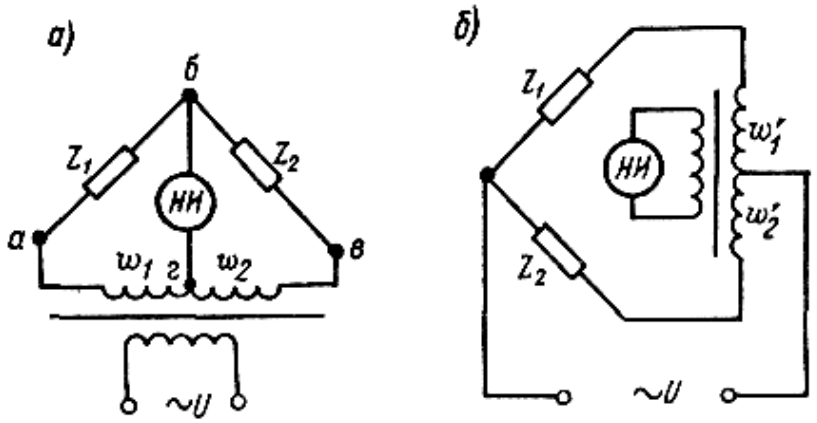


Рисунок 11.5 − Схемы трансформаторных мостов

Трансформаторные измерительные мосты могут применяться для измерения комплексных сопротивлений. Если $Z_1=Z_X$ (измеряемое комплексное сопротивление), а $Z_2=Z_N$ (образцовое комплексное сопротивление), то равновесие моста может быть достигнуто двояким способом: изменением Z_N либо изменением числа витков w_1 и w_2 .

Достоинством трансформаторных измерительных мостов, является возможность обеспечения практически постоянной чувствительности в широком диапазоне частот (до сотен МГц) и получения при измерениях незначительной погрешности (в некоторых случаях до 0,01…0,001 %).

Пример 11.1 *Сопротивление R_X измеряется с помощью одинарного моста Уитстона. Причем $R_3=R_4=1000$ Ом. Равновесие моста достигалось при $R'_2=1000,4$ Ом. После перемены местами R_X и R_2, равновесие достигалось при $R''_2=1000,2$ Ом. Определить значение R_X.*

Ответ: R_X = (1000,4+1000,2)/2 = 1000,3 Ом или

$$R_X = \sqrt{1000,2 \cdot 1000,4} \approx 1000,29 \quad Ом.$$

Пример 11.2 *Дан одинарный мост постоянного тока с сопротивлениями $R_2=10$ Ом, $R_3=1500$ Ом, $R_4=1000$ Ом. Сопротивление источника питания $R_n=10$ Ом. Определить сопротивление R_X , при котором мост уравновешен, а также входное сопротивление моста по отношению к диагонали питания R_{nn}.*

Ответ:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4} = \frac{10 \cdot 1500}{1000} = 15 \quad Ом;$$

$$R_{nn} = R_n + \frac{(R_x + R_2)\cdot(R_3 + R_4)}{(R_x + R_2 + R_3 + R_4)} = 10 + \frac{(15+10)\cdot(1500+1000)}{(15+10+1500+1000)} \approx 34,75 \quad Ом.$$

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.357-361.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.54-57.

3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие для втузов. – М.: «Дрофа», 2005. С.293-303.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.55-58.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Классификация электроизмерительных мостов
2. Применение электроизмерительных мостов

Тема 12 Регистрирующие приборы и устройства

План лекции
1. Общие сведения
2. Самопишущие приборы прямого преобразования
3. Магнитографы
4. Графопостроители

1. В тех случаях, когда необходимо определить текущие значения измеряемой величины, характер изменения этой величины, установить функциональную связь между несколькими измеряемыми величинами, иначе говоря возникает необходимость автоматической регистрации измеряемой величины, применяют соответствующие регистрирующие приборы, к которым относят самопишущие приборы, светолучевые осциллографы, измерительные магнитографы, графопостроители и т.п.

Таблица 12.1

Область применения	Применяемые приборы
Регистрация медленно меняющихся измеряемых величин	Прибор самопишущий с точечной записью на основе измерительного механизма
	Прибор самопишущий компенсационного типа (автоматические мосты и компенсаторы)
Регистрация быстро изменяющихся измеряемых величин (до 150 Гц)	Прибор самопишущий с линейной записью на основе измерительного механизма
Регистрация очень быстро меняющихся измеряемых величин (до 30 кГц и более)	Светолучевые осциллографы Электронные аналоговые и цифровые осциллографы и магнитографы
Регистрация двух взаимосвязанных измеряемых величин	Прибор самопишущий координатный (графопостроитель, плоттер)

2. *Самопишущие измерительные приборы* в зависимости от структурной схемы подразделяют на *приборы прямого* (с разомкнутой схемой) и *уравновешивающего* (с замкнутой схемой) преобразования. К последним относятся автоматические мосты и компенсаторы.

Самопишущие приборы *прямого преобразования* выполняются, как правило, на основе электромеханического измерительного механизма, оснащенного устройством регистрации показаний в форме диаграммы.

По виду регистрации самописцы разделяют на приборы *с линейной* (*непрерывной*) *записью* и *с точечной регистрацией*.Точечная (дискретная) запись регистрируемого сигнала обеспечивается путем кратковременного

контакта пишущего органа с диаграммным носителем в определенные (установленные) моменты времени. Наибольшее распространение получили приборы с линейной записью (рис.12.1). Здесь регистрирующий орган (обычно перо специальной конструкции) фиксирует чернилами изменение измеряемой величины в функции времени на движущейся со скоростью *v* диаграммной бумаге (носителе).

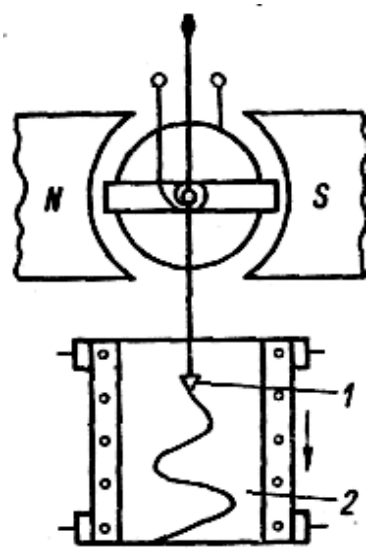


Рисунок 12.1

Диаграммная лента (рис.12.2) обычно имеет по краям отверстия (перфорации), в которые входят штифты вращающегося валика лентопротяжного механизма. На бумаге нанесена координатная сетка – прямоугольная либо криволинейная, в соответствии с используемым механизмом перемещения регистрирующего органа (прямолинейным или угловым).

Вследствие необходимости обеспечения большого вращающего момента в измерительном механизме (для уменьшения погрешности от трения) в самопишущих приборах применяют в основном магнитоэлектрические и ферродинамические измерительные механизмы.

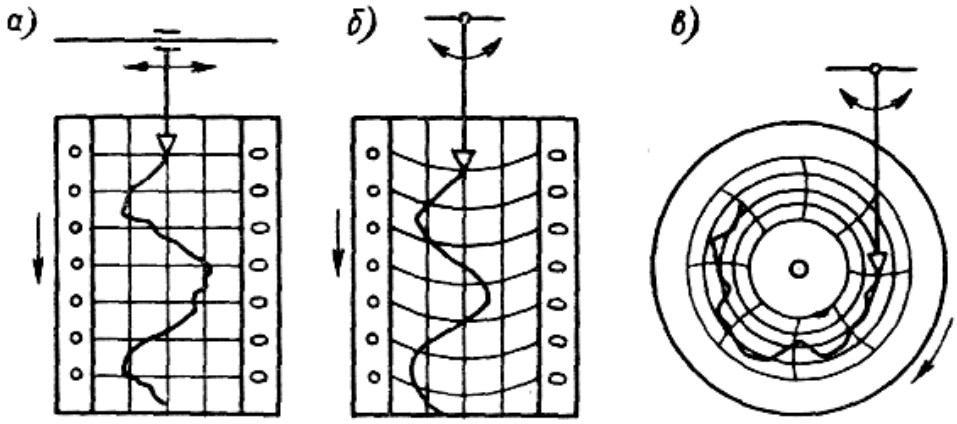


Рисунок 12.2 − Диаграммы с прямоугольной (а) и с криволинейной *(б* и *в*) координатными сетками

Магнитоэлектрические механизмы применяют в самопишущих вольтметрах и амперметрах постоянного тока. Ферродинамические измерительные механизмы используются в самопишущих приборах для цепей переменного тока.

Для одновременной регистрации нескольких измеряемых величин применяются *многоканальные самопишущие приборы*, состоящие из нескольких измерительных механизмов и регистрирующих органов и общего лентопротяжного механизма. Например, *прибор типа К208-С* позволяет одновременно регистрировать пять сигналов постоянного тока в функции времени.

Промышленность выпускает самопишущие приборы в основном с классом точности 1,0…2,5. Погрешность регистрации времени в таких приборах обычно составляет ±0,5 %. Время установления показаний не превышает 2 сек. Наиболее чувствительный *самопишущий щитовой прибор постоянного тока типа Н392* имеет предел измерения по току 1 мА, а по напряжению – 75 мВ.

В настоящее время получили распространение быстродействующие самописцы, позволяющие регистрировать сигналы с частотой до 150 Гц (в отличие от обычных, у которых частота регистрируемых сигналов не превышает 1 Гц). К ним относятся *приборы типа Н338* (с электромагнитным измерительным механизмом), *Н3021* (с магнитоэлектрическим механизмом) и др.

Отдельным классом регистрирующих приборов прямого преобразования следует считать измерительные приборы, предназначенные для измерения и регистрации неэлектрических величин – температуры, давления и др.

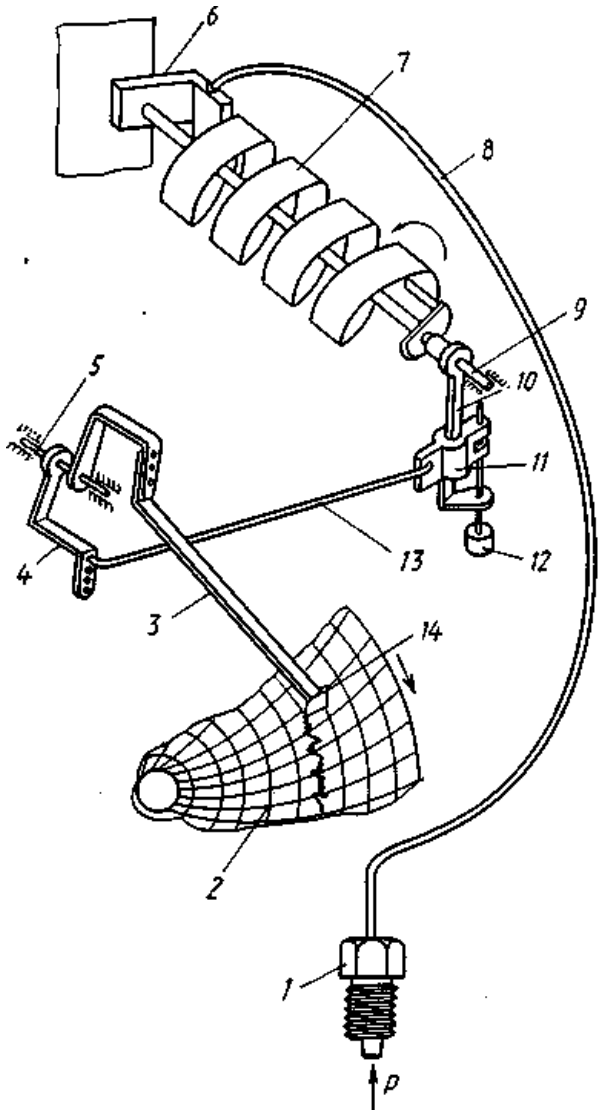


Рисунок 12.3 − Схема самопишущего манометра с многовитковой трубчатой пружиной

На рис. 12.3 показана схема *самопишущего манометра с многовитковой трубчатой пружиной*. Благодаря большому числу витков перемещение свободного конца многовитковой трубчатой пружины и развиваемые ею усилия достигают значений, позволяющих осуществлять показания и запись измеряемого давления или разрежения. Измеряемое давление через штуцер *1* по капилляру *8* подается во внутреннюю полость многовитковой трубчатой пружины *7*. Один конец пружины прикреплен к кронштейну *6*, а другой — соединен с осью *9*. Под действием давления пружина раскручивается, что сопровождается вращением оси *9* и находящегося на ней рычага *10*, вращение которого через тягу *13* передается рычагу *4*, находящемуся на одной оси *5* со стрелкой *3*. На конце стрелки укреплено перо *14*, перемещающееся по дисковой диаграмме *2*, вращение которой осуществляется электродвигателем или часовым механизмом. Для регулировки размаха стрелки предусмотрен ползун *11* с винтом *12*.

Класс точности показывающих и самопишущих приборов с многовитковой

трубчатой пружиной 1,0; 1,5.

3. Магнитный способ регистрации получил чрезвычайно большое распространение. В *магнитографах* применяется способ, используемый в магнитофонах (рис.12.4).

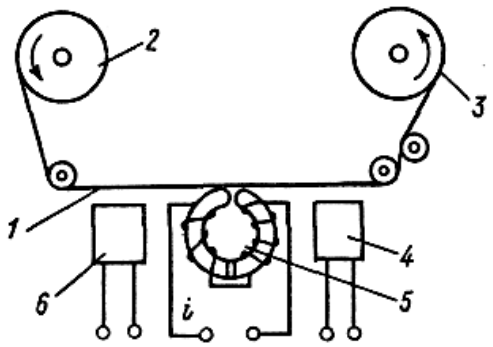


Рисунок 12.4 − Схема устройства магнитной регистрации

Носитель информации *1* в виде магнитной ленты (например, лавсановой ленты с ферромагнитным слоем) посредством электродвигателя перематывается с катушки *2* на катушку *3,* при этом лента проходит возле магнитных головок: стирающей *6,* записывающей *5* и воспроизводящей *4.* Регистрируемый ток *i* пропускается по обмотке головки *5,* которая имеет магнитопровод из листов с высокой магнитной проницаемостью. Узкий воздушный зазор магнитопровода обеспечивает острую фокусировку магнитного «луча», попадающего на ферромагнитный слой ленты. Принцип магнитной регистрации заключается в намагничивании в разной степени, в зависимости от силы тока *i,* движущейся магнитной ленты, которая предварительно должна быть полностью размагничена стирающей головкой *6.* Стирание записи (размагничивание ленты) производится путем пропускания тока высокой частоты (десятки килогерц) через головку *6.* При движении ленты переменное магнитное поле головки *6* размагничивает ленту. Воспроизведение магнитной записи заключается в преобразовании магнитного поля ленты в ЭДС, которая наводится в обмотке головки *4* при протягивании намагниченной ленты возле воздушного зазора этой головки. Устанавливая несколько записывающих и воспроизводящих головок, можно одновременно на ленте вести запись нескольких электрических сигналов.

Применяются и другие конструкции магнитографов, например с магнитным барабаном. Число головок, располагаемых вдоль образующей барабана, может достигать несколько сотен, а частота вращения барабана – несколько тысяч оборотов в минуту.

Магнитный метод регистрации обладает рядом существенных достоинств: для воспроизведения информации не требуется дополнительной обработки ленты, этот метод обеспечивает возможность многократного воспроизведения регистрации, возможно многократное использование магнитной ленты, может быть изменен временной масштаб производимой записи. Магнитной регистрации присущи и серьезные недостатки. Основной недостаток – отсутствие

видимой регистрации. Для получения читаемых документов необходима перезапись вторичным самопишущим прибором.

Благодаря своим достоинствам магнитная регистрация становится важнейшим видом регистрации измерительной информации в диапазоне частот до нескольких десятков килогерц.

Для регистрации информации на магнитный носитель используют три основных вида записи – *прямой*, *модуляционный* и *цифровой*, при прямой записи сигнал подается непосредственно на записывающую головку. Прямая запись технически наиболее проста, имеет большой частотный диапазон, но и низкую точность (погрешность до 20 %). При модуляционном способе регистрируемый сигнал модулируют во вспомогательное колебание. Наиболее часто применяют *частотную* и *широтно-импульсную модуляции*. Однако самую высокую точность обеспечивает *цифровая запись*, при которой регистрируемый сигнал преобразуется в последовательность кодовых импульсов, которые подаются на записывающие головки.

В *магнитографе типа НО46* применяется как прямая запись, так и запись с использованием частотной модуляции. Прибор имеет 7 каналов регистрации. Скорость движения ленты от 9,53 до 76,2 см/сек четырьмя ступенями. Диапазон частот регистрируемых сигналов составляет от 0 до 64 кГц.

4. Эти приборы, применяются для вычерчивания с высокой точностью функций $y = f(x)$ и $y = f(t)$ двух взаимосвязанных величин x и y, преобразованных в постоянный или переменный электрический сигнал. Движение регистрирующего органа (специальной конструкции пера) управляется по двум взаимно перпендикулярным направлениям с помощью двух раздельных электроприводов, осуществляющих перемещение регистрирующего органа пропорционально величинам x и y.

Изображение зависимостей $y = f(x)$ и $y = f(t)$ выполняется записью показаний чернилами на бумаге в прямоугольной системе координат с соответствующим рабочим полем, например, *300×200* мм. Прибор имеет 16 поддиапазонов регистрации напряжения с верхними пределами 3 мВ; 7,5 мВ; 300 В – для параметра x и 2,5 мВ, 200 мВ – для параметра y.

В последнее время получили широкое распространение графопостроители, сопряженные с компьютерами (например, IBM – совместимыми), называемые *плоттерами*. Плоттеры несколько дешевле лазерных принтеров, но скорость печати у них ниже. Плоттеры различают *барабанного* (работают с рулоном бумаги) и *планшетного* (лист бумаги лежит на плоском планшете) типов. Как правило, плоттеры используются в системах автоматизированного проектирования (*САПР*) и конструирования.

Рекомендуемая литература

1. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. С.257-270.
2. Электрические измерения и электроизмерительные приборы / В.И. Котур, М.А. Скомская, Н.Н. Храмова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. С.199-214.

3. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.86-91.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.88-93.

Контрольные задания для СРД [1-4]
1. Магнитографы и их применение
2. Самопишущие приборы прямого преобразования и их применение

Тема 13 Измерительные информационные системы

План лекции
1. Общие сведения
2. ИС, САК и СТД
3. Обобщенная структура ИИС
4. Измерительно-вычислительные комплексы
5. Интерфейсы ИИС
6. Последовательная передача данных
7. Параллельная передача данных

1. *Измерительная информационная система* (*ИИС*) в соответствии с ГОСТ 8.437–81 представляет собой совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки с целью представления потребителю (в том числе для АСУ) в требуемом виде, либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации.

В зависимости от выполняемых функций ИИС реализуются в виде *измерительных систем* (*ИС*), *систем автоматического контроля* (*САК*), *технической диагностики* (*СТД*), *распознавания* (*идентификации*) *образов* (*СРО*). В СТД, САК и СРО измерительная система входит как подсистема.

Информация, характеризующая объект измерения, воспринимается ИИС, обрабатывается по некоторому алгоритму, в результате чего на выходе системы получается количественная информация, отражающая состояние данного объекта. Измерительные информационные системы существенно отличаются от других типов информационных систем и систем автоматического управления (САУ). Так, ИИС, входящая в структуры более сложных систем (вычислительных систем связи и управления), может быть источником информации для этих систем. Использование информации для управления не входит в функции ИИС, хотя информация, получаемая на выходе ИИС, может использоваться для принятия каких-либо решений, например, для управления конкретным экспериментом.

По характеру взаимодействия системы с объектом исследования и обмена информацией между ними ИИС могут быть разделены на *активные* и *пассивные*. *Пассивные* системы только воспринимают информацию от объекта, а *активные*, действуя на объект через устройство внешних воздействий,

позволяют автоматически и наиболее полно за короткое время изучить его поведение. Такие структуры широко применяются при автоматизации научных исследований различных объектов.

В зависимости от характера обмена информацией между объектами и активными ИИС различают ИС *без обратной связи* и *с обратной связью по воздействию*. Воздействие на объект может осуществляться по заранее установленной жесткой программе либо по программе, учитывающей реакцию объекта. В первом случае реакция объекта не влияет на характер воздействия, а следовательно, и на ход эксперимента. Его результаты могут быть выданы оператору после окончания. Во втором случае результаты реакции отражаются на характере воздействия, поэтому обработка ведется в реальном времени. Такие системы должны иметь развитую вычислительную сеть. Кроме того, необходимо оперативное представление информации оператору в форме, удобной для восприятия, с тем чтобы он мог вмешиваться в ход процесса.

Эффективность научных исследований, испытательных, поверочных работ, организации управления технологическими процессами с применением ИИС в значительной мере определяется *методами обработки измерительной информации*.

Операции обработки измерительной информации выполняются в устройствах, в качестве которых используются *специализированные* либо *универсальные ЭВМ*. В некоторых случаях функции обработки результатов измерения могут осуществляться непосредственно в измерительном тракте, т. е. измерительными устройствами *в реальном масштабе времени*.

В системах, которые содержат вычислительные устройства, обработка информации может производиться как в реальном масштабе времени, так и с предварительным накоплением информации в памяти ЭВМ, т. е. *со сдвигом по времени*.

При исследовании сложных объектов или выполнении многофакторных экспериментов применяются измерительные системы, сочетающие высокое быстродействие с точностью. Такие ИИС характеризуются большими *потоками информации* на их выходе.

Значительно повысить эффективность ИИС при недостаточной априорной информации об объекте исследования можно за счет сокращения избыточности информации, т. е. сокращения интенсивности потоков измерительной информации. Исключение избыточной информации, несущественной с точки зрения ее потребителя, позволяет уменьшить емкость устройств памяти, загрузку устройств обработки данных, а следовательно, и время обработки информации, снижает требования к пропускной способности каналов связи.

При проектировании и создании ИИС большое внимание уделяется проблеме повышения *достоверности выходной информации* и снижения вероятностей возникновения (или даже исключения) нежелательных ситуаций. Этого можно достичь, если на ИИС возложить функции самоконтроля, в результате чего ИИС способна осуществлять *тестовые проверки* работоспособности средств системы и тем самым сохранять метрологические характеристики тракта прохождения входных сигналов, проверять

достоверность результатов обработки информации, получаемой посредством измерительных преобразований, и ее представления.

Все более широкое развитие получают системы, предусматривающие автоматическую коррекцию своих характеристик – *самонастраивающиеся* (*адаптивные*) *системы*. Введение в такие системы свойств автоматического использования результатов самоконтроля – активного изучения состояния ИИС – и приспособляемости к изменению характеристик измеряемых сигналов или к изменению условий эксплуатации делает возможным обеспечение заданных параметров системы.

2. Входными в *ИС для прямых измерений* являются величины, воспринимаемые датчиками или другими входными устройствами системы. Задача таких ИС заключается в выполнении аналого-цифровых преобразований множества величин и выдаче полученных результатов измерения.

В рассматриваемых ИС основные типы измеряемых входных величин могут быть сведены либо к множеству изменяющихся во времени величин, либо к изменяющейся во времени t и распределенной по пространству L непрерывной функции x (t, L). При измерении непрерывная функция x (t, L) представляется множеством дискретных величин.

Многоканальные системы объединяются в один из самых распространенных классов измерительных систем параллельного действия, применяемых во всех отраслях народного хозяйства. Основные причины столь широкого распространения многоканальных ИС заключаются в возможности использования стандартных, относительно простых, измерительных приборов, в наиболее высокой схемной надежности таких систем, в возможности получения наибольшего быстродействия при одновременном получении результатов измерения, в возможности индивидуального подбора средств измерений к измеряемым величинам.

Недостатки таких систем – сложность и большая стоимость по сравнению с другими системами.

В измерительных системах *последовательного действия, сканирующих*, операции получения информации выполняются последовательно во времени с помощью одного канала измерения. Если измеряемая величина распределена в пространстве или собственно координаты точки являются объектом измерения, то восприятие информации в таких системах выполняется с помощью одного сканирующего датчика.

Сканирующие системы находят применение при расшифровке графиков. В медицине, геофизике, метрологии, при промышленных испытаниях, во многих отраслях народного хозяйства и при научных исследованиях затрачивается значительное время на измерение параметров графических изображений и представление результатов измерения в цифровом виде. Для указанных целей промышленностью выполняются различные специализированные полуавтоматические расшифровочные устройства и системы.

Сканирование может выполняться непосредственно воспринимающим элементом или сканирующим лучом при неподвижном воспринимающем элементе. Такими элементами могут быть оптико-механические или

электронно-развертывающие устройства.

В *голографических* ИС основу датчиков составляют лазеры, представляющие собой когерентные источники света, когерентная оптика и оптоэлектронные преобразователи. Голографические измерительные системы отличаются высокой чувствительностью и повышенной точностью, что послужило основой широкого их применения в голографической интерферометрии. Голографическая интерферометрия обеспечивает бесконтактное измерение и одновременное получение информации от множества точек наблюдаемой поверхности с использованием меры измерения – длины световой волны, известной с высокой метрологической точностью.

Выполнение условий минимальной сложности ИС приводит к необходимости последовательного многократного использования отдельных устройств измерительного тракта, а следовательно, к применению ИС параллельно-последовательного действия, которые носят название *многоточечных* ИС. Работа таких ИС основана на принципе квантования измеряемых непрерывных величин по времени.

Системы автоматического контроля предназначены для контроля технологических процессов, при этом характер поведения и параметры их известны. В этом случае объект контроля рассматривается как детерминированный.

Эти системы осуществляют контроль соотношения между текущим (измеренным) состоянием объекта и установленной "нормой поведения" по известной математической модели объекта. По результатам обработки полученной информации выдается суждение о состоянии объектов контроля. Таким образом, задачей САК является отнесение объекта к одному из возможных качественных состояний, а не получение количественной информации об объекте, что характерно для ИС.

В САК благодаря переходу от измерения абсолютных величин к относительным эффективность работы значительно повышается. Оператор САК при таком способе количественной оценки получает информацию в единицах, непосредственно характеризующих уровень опасности в поведении контролируемого объекта (процесса).

Как правило, САК имеют обратную связь, используемую для воздействия на объект контроля. В них внешняя память имеет значительно меньший объем, чем объем памяти ИС, так как обработка и представление информации ведутся в реальном ритме контроля объекта.

Объем априорной информации об объекте контроля в отличие от ИС достаточен для составления алгоритма контроля и функционирования самой САК, предусматривающего выполнение операций по обработке информации. Алгоритм функционирования САК определяется параметрами объекта контроля. Например, существуют параметры, кратковременное отклонение которых от номинального значения может повлечь за собой возникновение аварийной ситуации, кратковременное отклонение же других параметров существенно не влияет на нормальный ход процесса и поведение объекта.

По сравнению с ИС эксплуатационные параметры САК более высокие:

длительность непрерывной работы, устойчивость и воздействие промышленных помех, климатические и механические воздействия.

Системы технической диагностики также относятся к классу ИИС, поскольку в них предполагается выполнение измерительных преобразований, совокупность которых составляет базу для логической процедуры диагноза. Цель диагностики – определение класса состояний, к которому принадлежит состояние обследуемого объекта.

Диагностику следует понимать как совокупность множества возможных состояний объекта, множества сигналов, несущих информацию о состоянии объекта, и алгоритмы их сопоставления.

Объектами технической диагностики являются технические системы. Задачей СТД является определение работоспособности элемента технической системы и локализация неисправностей.

Элементы объекта диагноза, как правило, недоступны для непосредственного наблюдения, что вызывает необходимость проведения процедуры диагноза без разрушения объекта. В силу этого в СТД преимущественно применяются косвенные методы измерения и контроля.

В отличие от ИС и САК система технической диагностики имеет иную организацию элементов структуры и другой набор используемых во входных цепях устройств и преобразователей информации. Входящий в состав структуры СТД набор средств обработки, анализа и представления информации может оказаться значительно более развитым, чем в ИС и САК. В СТД определение состояния объекта осуществляется программными средствами диагностики. При поиске применяется *комбинационный* или *последовательный* метод.

При комбинационном поиске выполняется заданное число проверок независимо от порядка их осуществления. Последовательный поиск связан с анализом результатов каждой проверки и принятием решения на проведение последующей проверки. Системы технической диагностики подразделяют на *специализированные* и *универсальные*.

По целевому назначению различают *диагностические* и *прогнозирующие* СТД. *Диагностические* системы предназначены для установления точного диагноза, т. е. для обнаружения факта неисправности и локализации места неисправности. *Прогнозирующие* СТД по результатам проверки в предыдущие моменты времени предсказывают поведение объекта в будущем.

Системы распознавания образов предназначены для определения степени соответствия между исследуемым объектом и эталонным образом.

Для задач классификации биологических объектов и дактилоскопических снимков, опознавания радиосигналов и других создаются специальные системы распознавания образов. Эти системы осуществляют распознавание образов через количественное описание признаков, характеризующих данный объект исследования.

Процесс распознавания реализуется комбинацией устройств обработки и сравнения обработанного изображения (описания образа) с эталонным образом, находящимся в устройстве памяти. Распознавание осуществляется по

определенному, заранее выбранному, решающему правилу. При абсолютном описании образа изображение восстанавливается с заданной точностью, а относительное описание с набором значений отличительных признаков (например, спектральных характеристик), не обеспечивая полное воспроизведение изображения.

Как пример СРО можно привести *голографические распознающие системы* (*РС*). В этих системах распознавание изображений осуществляется с относительно высокой скоростью. Голографические РС нашли широкое применение при поиске химических элементов по спектрам их поглощения и в навигации при определении положения объекта по наземным ориентирам. В голографических РС удачно сочетаются высокая производительность оптических методов сбора и обработка информации с логическими и вычислительными возможностями ЭВМ.

3.Рассмотренные выше измерительные информационные системы показывают, что почти для каждого типа ИИС используется цепочка из аппаратных модулей (измерительных, управляющих, интерфейсных, обрабатывающих).

Таким образом, обобщенная структурная схема ИИС (рис.13.1) содержит:

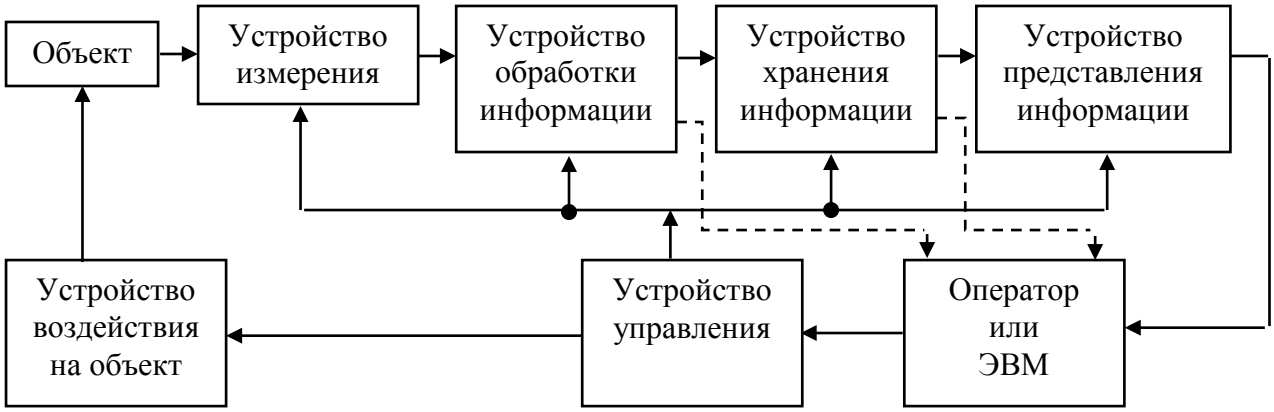


Рисунок 13.1 – Обобщенная структурная схема ИИС

1) устройство измерения, включающее в себя первичные и вторичные измерительные преобразователи и собственно измерительное устройство, выполняющее операции сравнения с мерой, квантование, кодирование; в это же устройство может входить и коммутатор;

2) устройство обработки измерительной информации, выполняющее обработку измерительной информации по определенному алгоритму (сокращение избыточности, математические операции, модуляция и т.п.);

3) устройство хранения информации;

4) устройство представления информации в виде регистраторов и индикаторов;

5) устройство управления, служащее для организации взаимодействия всех узлов ИИС;

6) устройство воздействия на объект, включающее в себя генераторы стимулирующих воздействий.

Информация от ИИС может выдаваться оператору или поступать в ЭВМ.

Оператор и ЭВМ могут воздействовать на устройство управления ИИС, меняя соответственно программу ее работы. В ряде ИИС некоторые устройства и связи могут отсутствовать или видоизменяться. Так, могут отсутствовать устройства воздействия на объект, хранения и обработки информации. При наличии в составе ИИС ЭВМ информация к ЭВМ может поступать непосредственно от устройств обработки или (и) хранения.

Для каждой конкретной системы количество блоков, состав функций и связи между блоками устанавливаются условиями проектирования.

4. *ИВК* представляет собой совокупность программно-управляемых измерительных, вычислительных и вспомогательных технических средств, функционирующих на основе единого метрологического обеспечения и реализующих алгоритм получения, обработки и использования измерительной информации.

Комплексы при этом обеспечивают: первичную обработку результатов измерения; получение результатов косвенных, совокупных и совместных измерений, в том числе в темпе поступления данных; управление функционированием отдельных узлов в ходе эксперимента, включая организацию запросов, очередей, установление приоритетов, диалоговый режим с оператором; контроль работоспособности трактов комплексов, включая контроль метрологических характеристик; сервисную обработку получаемой информации (представление результатов в виде таблиц, графиков и т. п.); хранение получаемой информации; выработку управляющих воздействий на исследуемый объект в виде аналоговых и дискретных сигналов.

В ИВК измерительные и вычислительные средства взаимодействуют на основе единого *алгоритма*, обеспечивающего получение, обработку и использование измерительной информации. ИВК строятся на основе технических средств, имеющих блочно-модульный принцип исполнения, что обеспечивает возможность создания ИВК с перестраиваемой структурой. Такие ИВК предназначены для *автоматизированных систем управления технологическими процессами* (*АСУ ТП*), а также для управления такими сложными объектами, как космические корабли, морские суда и другие транспортные средства.

В зависимости от назначения различают следующие типы ИВК:

универсальные, предназначенные для создания АСНИ, а также для испытаний различных изделий и материалов; их характерной особенностью является наличие перестраиваемой структуры, а также развитого программно-алгоритмического обеспечения;

проблемно-ориентированные, предназначенные для ограниченного набора однотипных задач АСНИ или АСУ ТП;

уникальные, предназначенные для единичных (специфических) задач исследования или испытаний.

Программное управление ИВК осуществляется программируемым процессором, который обеспечивает реализацию алгоритма функционирования системы в соответствии с требуемой обработкой измерительной информации.

Работоспособность ИВК определяют техническое, математическое и

метрологическое обеспечение. В состав технического обеспечения входят измерительные, вычислительные и вспомогательные устройства.

К измерительным средствам относят: цифровые и аналоговые измерительные приборы; нормирующие, линейные, функциональные измерительные преобразователи; коммутаторы измерительных цепей, калибраторы, измерительные источники питания и др.

В качестве вычислительных средств в ИВК могут быть использованы аналоговые, гибридные и цифровые вычислительные устройства микроЭВМ.

Основным содержанием математического обеспечения ИВК являются *алгоритмы* и *программы*. *Алгоритмы* предусматривают выполнение процедур, связанных с измерением физических величин, обработкой результатов измерения, выполнением плана эксперимента и т. п. *Программы* обеспечивают функционирование ИВК, поэтому содержат инструкции по самоорганизации комплекса и самоконтролю его узлов, подпрограммы для выполнения алгоритмов типовых процедур и решений типовых задач.

Метрологическое обеспечение предусматривает законодательно закрепленные процедуры нахождения оценок метрологических характеристик отдельных узлов, их самопроверки на основе соответствующих алгоритмов и программ.

5. Информационно-измерительные системы содержат ряд подсистем: *измерительную*, *сбора*, *преобразования*, *предварительной обработки данных* и подсистемы *управления в целом*. Все подсистемы в ИИС соединены между собой в единую систему. ИИС, как правило, проектируют на основе *агрегатно-модульного* принципа, по которому устройства, образующие систему, выполняются в виде отдельных, самостоятельных изделий (приборов, блоков). В составе ИИС эти устройства выполняют определенные операции и взаимодействуют друг с другом, передавая информационные и управляющие сигналы через систему сопряжения.

Для унифицированных систем сопряжения между устройствами, участвующими в обмене информации, стал общепринятым термин *интерфейс*. Под *интерфейсом* (или *сопряжением*) понимают совокупность схемотехнических средств, обеспечивающих непосредственное взаимодействие составных элементов ИИС. Устройства подсоединяются к системе сопряжения и объединяются в ИИС по определенным правилам, относящимся к физической реализации сопряжения. Конструктивное исполнение этих устройств, характеристики вырабатываемых и принимаемых блоками сигналов и последовательности выдаваемых сигналов во времени позволяют упорядочить обмен информацией между отдельными функциональными блоками.

Под *интерфейсной системой* понимают совокупность логических устройств, объединенных унифицированным набором связей и предназначенных для обеспечения информационной, электрической и конструктивной совместимости. Интерфейсная система также реализует алгоритмы взаимодействия функциональных модулей в соответствии с установленными нормами и правилами.

Возможны два подхода к организации взаимодействия элементов системы и

построению материальных связей между ними:

жесткая *унификация* и *стандартизация* входных и выходных параметров элементов системы;

использование *функциональных блоков с адаптивными характеристиками* по входам-выходам.

На практике часто сочетают оба подхода.

Применение развитых стандартных интерфейсов при организации ИИС позволяет обеспечить быструю компоновку системы и разработку программ управления.

Интерфейс может быть общим для устройств разных типов, наиболее распространенные интерфейсы определены международными, государственными и отраслевыми стандартами. Стандарт (ГОСТ 26016—81) включает четыре признака классификации:

способ соединения комплектов системы (магистральный, радиальный, цепочечный, комбинированный);

способ передачи информации (параллельный, последовательный, параллельно-последовательный);

принцип обмена информацией (асинхронный, синхронный);

режим передачи информации (двусторонняя одновременная передача, двусторонняя поочередная передача, односторонняя передача).

Соединение отдельных приборов и блоков между собой осуществляется *линиями связи* или *линиями интерфейса*. Линии интерфейса могут объединяться в группы для выполнения одной из операций в программно-управляемом процессе передачи данных. Эти группы линий называются *шинами интерфейса*. Назначение отдельных линий и шин, их номенклатура и взаимное расположение в системе (топологии) являются базовыми при рассмотрении функционирования любого интерфейса.

В *цепочечной структуре* (рис.13.2, а) каждая пара источник-приемник соединена попарно линиями от выходов предыдущих функциональных блоков ко входам последующих, обмен данными происходит непосредственно между блоками или приборами. Функции управления распределены между этими устройствами. Цепочечную структуру интерфейсов используют, как правило, в несложных системах с несколькими функциональными устройствами.

В системе, выполненной по *радиальной структуре* (рис.13.2, б), имеется центральное устройство – *контроллер*, с которым каждая пара источник-приемник связана с помощью индивидуальной группы шин. Блоки и приборы, подключаемые к контроллеру, могут изменять свои места при соответствующем изменении программы работы контроллера. Под управлением контроллера происходит обмен данными между каждым устройством и контроллером. Связи между управляющим устройством и одним из устройств-источников или приемников сигналов могут осуществляться как по инициативе контроллера, так и по инициативе устройств-абонентов. В последнем случае одно из устройств вырабатывает сигнал запроса на обслуживание, а контроллер идентифицирует запрашиваемое устройство. Когда контроллер готов к обмену данными, логически подключаются цепи

связи и начинается процесс обмена. Эти цепи остаются подключенными, пока не будет передана нужная порция информации.

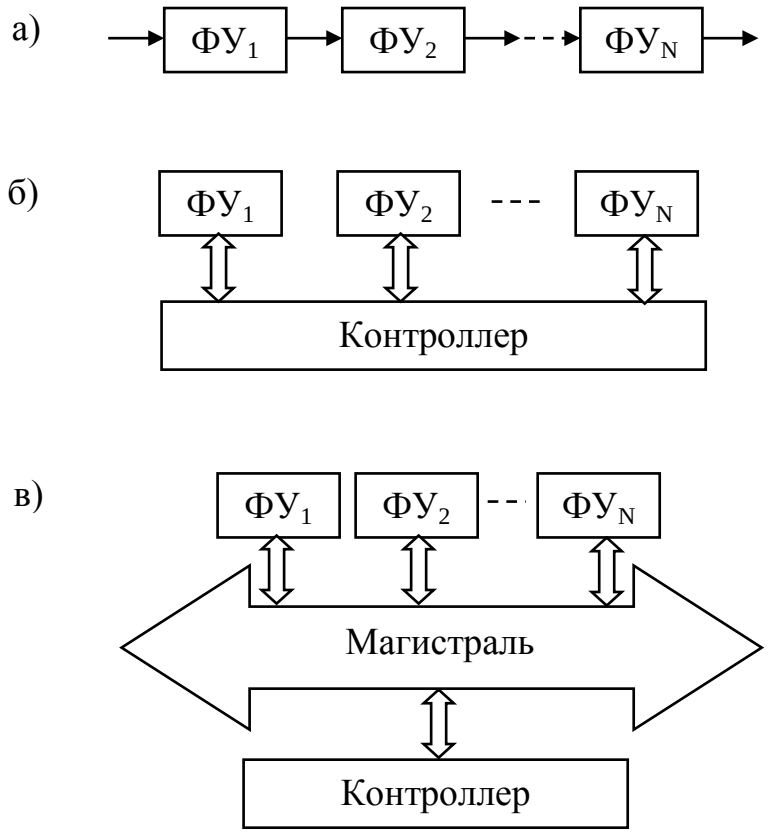


Рисунок 13.2

Контроллер может производить обмен данными только с одним из устройств. В случае одновременного поступления запросов от двух и более абонентов по системе приоритетов будет установлена связь с устройством, имеющим наивысший приоритет. Приоритет присваивается приборам и блокам в зависимости от их типа, технических характеристик и важности поступающей информации. В интерфейсах с радиальной структурой чаще всего приоритет зависит от места подключения кабеля, соединяющего абонента с контроллером.

Радиальное соединение функциональных блоков позволяет достаточно просто и быстро осуществлять адресацию и идентификацию требуемого функционального блока.

К недостаткам радиальной структуры можно отнести большую длину соединительных линий, а также сложность контроллера, что приводит к увеличению стоимости ИС.

В системах с *магистральной структурой* (рис.13.2, в) вместо группы индивидуальных шин имеются *коллективные шины*, к которым подсоединяются все источники и приемники информации и контроллер.

К *основным характеристикам* интерфейса относятся следующие: функциональное назначение; структура или тип организации связей; принцип обмена информацией; способ обмена данными; режим обмена данными; номенклатура шин и сигналов; количество линий; количество линий для

передачи данных; количество адресов; количество команд; быстродействие; длина линий связи; число подключаемых устройств; тип линии связи.

По принципу обмена информацией интерфейсы подразделяют на *параллельные*, *последовательные* и *параллельно-последовательные*.

При параллельной передаче цифровых данных численное значение величины, содержащее *k*-битов, транслируют по *k*-информационным линиям. Это сообщение одновременно может быть введено в интерфейс, а также воспринято приемником. Интерфейсные устройства параллельного ввода-вывода информации позволяют согласовать во времени процесс обмена данными между ЭВМ и периферийным устройством.

Для связи датчиков информации, исполнительных элементов, территориально удаленных от процессора на десятки и сотни метров, в ИИС применяют *интерфейсы периферийных устройств*. В таких интерфейсах используются как параллельный, так и *последовательный* способы обмена информацией. При этом последний по причине существенного упрощения собственно линии связи, а следовательно, и снижения стоимости, наиболее предпочтителен, если при этом обеспечивается необходимая скорость передачи информации.

В последнее время в связи с развитием микро- и мультипроцессорных ИИС, отдельные микропроцессоры или устройства ввода-вывода которых могут отстоять друг от друга территориально на сотни метров (например, заводская или цеховая ИИС), все более широко применяются *системные интерфейсы* или *интерфейсы локальных сетей*. Системный интерфейс, как правило, имеет многоуровневую архитектуру (совокупность) аппаратных и программных средств.

Широкое распространение получил *цифровой протокол HART*. Этот открытый стандартный гибридный протокол двунаправленной связи предусматривает передачу цифровой информации поверх стандартного аналогового сигнала 4...20 мА.

Бурно развивается системная интеграция первичных преобразователей с использованием различных разновидностей промышленных сетей *Foundation Fieldbus, ModBus, Profibus* и др. При этом используется полностью цифровой коммуникационный протокол для передачи информации в обоих направлениях между датчиками и системами управления, существенно облегчая взаимозаменяемость приборов разных мировых производителей.

В отечественных и зарубежных микропроцессорных измерительно-управляющих вычислительных системах распространены асинхронные мультиплексные интерфейсы с *параллельным* способом передачи информации *8-разрядные интерфейсы Microbus*, *16-разрядные интерфейсы общая шина* (*Unibus*, *Microbus*).

В последние годы при реализации информационно-измерительных сетей преобладают цифровые интерфейсы *последовательной передачи* данных *RS-232C* и *RS-485*, а также интерфейс *параллельной* передачи *IEEE-488*. До сих пор используются выходящие из применения *ДДПК* (двоично-десятичный параллельный код) и *ИРПС* (интерфейс радиальный последовательный),

разработанные в 1980-е годы.

6. Для последовательной передачи цифровых данных существует три формы связи:

А) *симплексная связь* предполагает наличие одного передатчика и одного приемника; информация передается в одном направлении, связь осуществляется через отдельную пару проводов;

Б) *полудуплексная связь* допускает двунаправленную передачу данных, но не одновременно; связь осуществляется по кабелю, состоящему из двух или четырех проводов;

В) *дуплексная связь* обеспечивает одновременную двунаправленную передачу данных, а связь осуществляется также по кабелю, состоящему из двух или четырех проводов.

Для каждой из указанных выше форм связи необходимо, чтобы приемное устройство было готово принять и идентифицировать каждый набор данных, переданный передатчиком. Существуют два способа решения этой задачи. При *асинхронной передаче* каждому пакету данных предшествует *старт-бит*, а по окончании передачи этого пакета данных следует *стоп-бит*. Таким образом, приемник четко определяет начало и конец сообщения. Однако из-за необходимости постоянной проверки старт- и стоп-битов скорость передачи при данном виде связи ограничена и, как правило, не превышает 1200 бит/с.

Асинхронная передача используется в условиях неуверенного приема и высокого уровня помех. *Синхронная передача* не требует старт- и стоп-битов, передатчик и приемник *синхронизированы*. Начало приема-передачи данных предварительно синхронизируется синхроимпульсом, а затем каждое слово пакета данных распознается как блок из семи или восьми бит. Синхронная передача данных может обеспечивать скорость более 1200 бит/с и наиболее часто применяется для передачи таких потоков данных, как программные файлы.

Современные интеллектуальные датчики и элементы управления наряду с традиционным *интерфейсом RS-232C* могут иметь также в своем составе подсистему последовательного ввода-вывода на базе *интерфейса RS-485*. Программируемые логические контроллеры большинства производителей в качестве средств организации территориально-распределенных систем сбора данных и управления содержат ту или иную реализацию интерфейсов *RS-422A/RS-485*.

RS-232C – широко распространенный стандартный последовательный интерфейс. Он может быть использован для синхронной передачи данных со скоростью до 20 000 бит/с на расстояние до 15 метров; на более длинные дистанции скорость передачи уменьшается. Интерфейс *RS-449* – это более поздний стандарт, он обладает улучшенными по сравнению с RS-232 характеристиками по скорости и расстоянию передачи; здесь достижима скорость до 10 000 бит/с на расстояние до 1 км. Уровни напряжения, соответствующие стандарту RS-232, составляют +12 В для логического “0“ и –12 В для логической “1“. Интерфейс RS-232 является в настоящее время стандартным для *com*-портов персональных компьютеров. Поскольку

подавляющее большинство микропроцессоров построено на *ТТЛ-структуре* (транзисторно-транзисторная логика), где уровень логического нуля составляет 0 В, а логической единицы +5 В, то, очевидно, что уровни сигналов необходимо преобразовывать для согласования. Последнее достигается использованием интегральных микросхем – преобразователей уровня, таких как *MC1488* для преобразования ТТЛ-уровней в уровни RS-232 и *MC1489* для преобразования уровней RS-232 в ТТЛ-уровни.

Интерфейс *RS-485* (*EIA–485*) – один из наиболее распространенных стандартов физического уровня связи (канал связи + способ передачи сигнала).

Сеть, построенная на интерфейсе RS-485, представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи *витой пары* – двух скрученных проводов. В основе интерфейса RS-485 лежит принцип *дифференциальной* (*балансной*) *передачи* данных. Суть его заключается в передаче одного сигнала по двум проводам. Причем по одному проводу (условно *A*) идет оригинальный сигнал, а по другому (условно *B*) – его инверсная копия. Другими словами, если на одном проводе логическая "1", то на другом "0" и наоборот. Таким образом, между двумя проводами витой пары всегда есть разность потенциалов (рис.13.3).

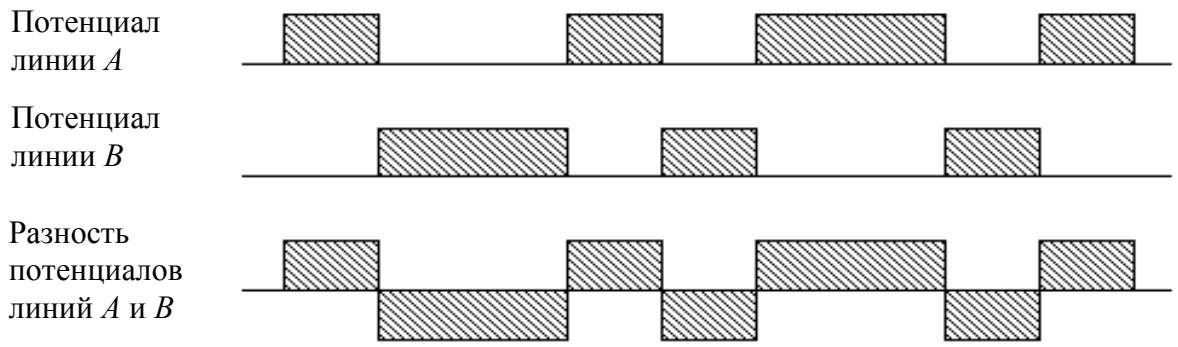


Рисунок 13.3

Такой способ передачи обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе, действующей на оба провода линии одинаково. Если сигнал передается потенциалом в одном проводе относительно общего, как в RS-232, то наводки на этот провод могут исказить сигнал относительно хорошо поглощающего наводки общего («земли»). Кроме того, на сопротивлении длинного общего провода будет падать разность потенциалов общих точек как дополнительный источник искажений. При дифференциальной передаче таких искажений не происходит, поскольку в витой паре наводка на оба провода одинакова. Таким образом, потенциал в одинаково нагруженных проводах изменяется одинаково, при этом информативная разность потенциалов остается без изменений.

Аппаратная реализация интерфейса – микросхемы приемопередатчиков с дифференциальными входами/выходами (к линии) и цифровыми портами (к портам UART-контроллера). Существуют два варианта такого интерфейса: RS-422 и RS-485.

RS-422 – дуплексный интерфейс. Прием и передача обеспечиваются по

двум отдельным парам проводов. На каждой паре проводов может быть только по одному передатчику.

RS-485 – полудуплексный магистральный аналог интерфейса RS-422. Прием и передача выполняются по одной паре проводов с разделением во времени. В сети может быть много передатчиков, так как они могут отключаться в режиме приема.

Все устройства подключаются к одной витой паре одинаково: прямые выходы (*A*) к одному проводу, инверсные (*B*) - к другому.

Входное сопротивление приемника со стороны линии обычно составляет 12 кОм. Поскольку мощность передатчика не беспредельна, это создает ограничение на количество приемников, подключенных к линии. Согласно стандарта RS-485, с учетом согласующих резисторов, передатчик может вести до 32 приемников. Однако, применяя микросхемы с повышенным входным сопротивлением, можно подключать к линии значительно большее количество устройств (более 100 приборов). При этом приборы подключаются к линии параллельно, а контроллер (компьютер) должен быть снабжен дополнительным устройством – преобразователем последовательного порта RS-485/ RS-232 .

Максимальная скорость связи в RS-485 может достигать 10 Мбит/сек, а максимальная длина линии связи – 1200 м. Если необходимо организовать связь на расстоянии, превышающем 1200 м, или подключить большее число устройств, нежели допускает нагрузочная способность передатчика, то применяют специальные повторители (*репитеры*).

Диапазон напряжений логических “1“ и “0“ в передатчика RS-485 составляют, соответственно, +1,5...+6 В и –1,5...-6 В, а диапазон синфазного напряжения передатчика – (–1...+3 В).

Значения параметров определены таким образом, что любое устройство, входящее в состав измерительной информационной системы, сохраняет работоспособность при наличии на его клеммах, подключенных к линии связи, помехи общего вида, напряжение которой находится в диапазоне от –7 до +7 В.

7. Для параллельной передачи данных в измерительных информационных системах часто используется стандартный интерфейс *IEEE-488* (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), называемый также *HP-IB* (*Hewlett-Packard Interface Bus)* или *GPIB* (*General Purpose Interface Bus* – интерфейсная шина общего применения). Международная электротехническая комиссия (*МЭК*) рекомендовала данный стандарт в качестве международного, по этой причине на постсоветском пространстве он носит название *цифрового интерфейса МЭК.*

Интерфейс IEEE-488 был разработан для программируемых и непрограммируемых электронных измерительных приборов и преобразователей. Он рассчитан на асинхронный обмен информацией, ориентирован на сопряжение устройств, располагаемых относительно друг друга на расстоянии до 20 м, и обеспечивает работу в ИИС приборов различной сложности, допускает прямой обмен информацией между ними, дистанционное и местное управление приборами. Описываемый интерфейс имеет магистральную структуру (рис.13.4).

Магистраль интерфейса состоит из 24 сигнальных линий, восемь из которых – линии заземления, а остальные линии разбиты на три группы. Первая группа, состоящая из восьми двунаправленных сигнальных линий, является *шиной данных*. Она предназначена для передачи данных и команд между различными приборами, присоединенными к интерфейсу. Другая группа из пяти сигнальных линий – *шина общего управления*, по ней передаются сигналы управления и состояния. Последняя группа из трех линий используется для управления передачей данных (*шина квитирования*).

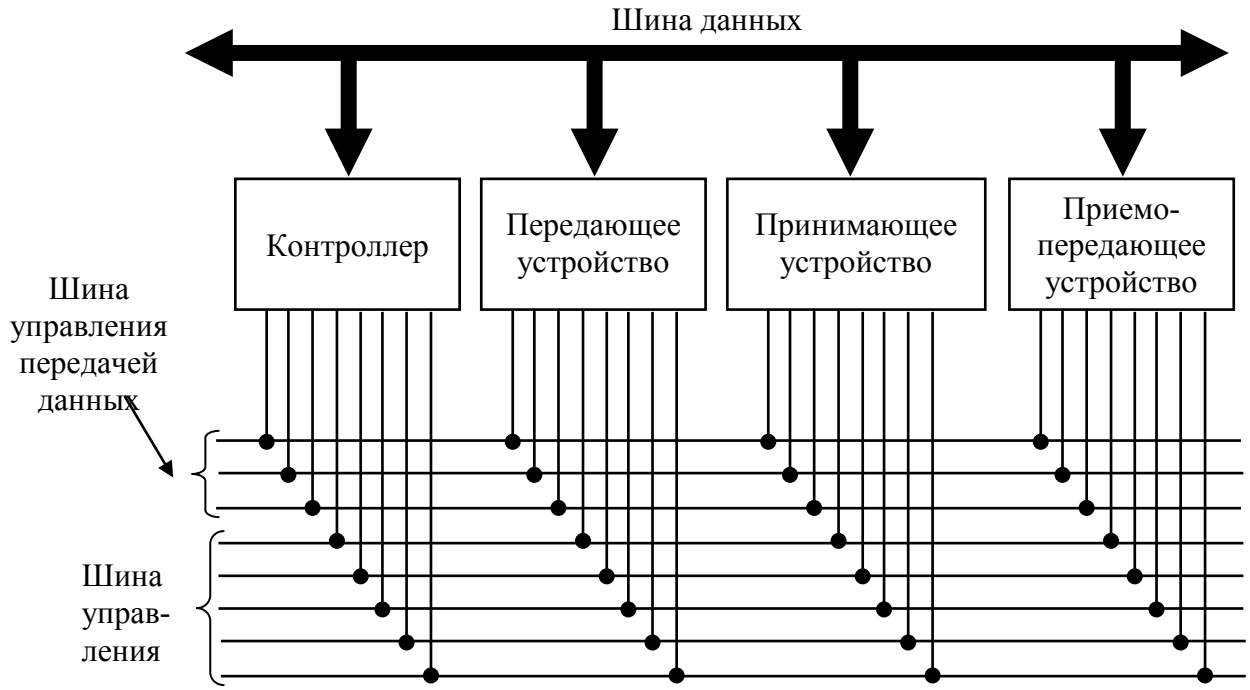


Рисунок 13.4 − Структура интерфейса IEEE-488

Приборы, подсоединенные к интерфейсу, могут работать как приемники либо источники сообщений. В каждый момент времени только одно устройство может быть источником информации, тогда как приемниками сообщений могут работать одновременно несколько устройств. Одно из устройств на магистрали является *контроллером* интерфейса.

Общее количество приемников и источников информации в IEEE-488 не должно превышать 31 при однобайтовой адресации, а число параллельно подключаемых приборов – 15 (включая контроллер).

В стандарте IEEE-488 высокому уровню сигнала в линии соответствует значение напряжения, равное или больше 2 В, а низкому уровню – значение, равное или меньше 0,8 В.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.411-427.
2. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Ақпараттық-өлшеуіш техника: Оқу құралы. – Қарағанды: КарМТУ баспасы, 2006. С.101-116.

3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. С.353-365.
4. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.103-118.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Измерительные информационные системы.
2. Измерительно-вычислительные комплексы
3. Интерфейсы ИИС

4 Методические указания для выполнения практических (семинарских) занятий

Семинар №1

Правила приближенных вычислений и оценка ошибок округления. Методы исключения грубых ошибок

Цель работы: изучение правил приближенных вычислений и округления при обработке экспериментальных данных, получение практических навыков первичной обработки результатов измерений.

Общие сведения

При обработке экспериментальных данных большинство расчетов производится с приближенными значениями величин в условиях, когда точные значения неизвестны. При этом к случайным ошибкам измерения добавляются *ошибки округления*, которые имеют тенденцию к накоплению при массовых расчетах.

Для округления и записи результатов измерений используются следующие правила.

1. Результат измерения определяется так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение его погрешности, при этом нули в десятичной дроби числового значения результата отбрасываются только до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности. Например, результат составляет 2,0700, погрешность – 0,001; в этом случае результат округляют до 2,070.

2. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остающиеся цифры числа не изменяют. Например, число 253435 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 253400, а число 253,435 – до 253,4.

3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу. Например, при сохранении трех значащих цифр число 18598 округляют до 18600, а число 152,56 – до 153.

4. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная и увеличивают, если она нечетная. Например, число 22,5 при сохранении двух значащих цифр округляют до 22, а число 23,5 – до 24.

Оценка ошибок округления при обработке экспериментальных данных

Обычно ошибка приближенного числа a неизвестна, но известна ошибка вида:

$$\left| a - a_0 \right| < \Delta_a \ , \qquad (1.1)$$

где a_0 – точное значение величины,

Δ_a – предельная абсолютная ошибка.

Абсолютные ошибки принято записывать не более чем 2-3 значащими цифрами; округляют абсолютные ошибки всегда в большую сторону. В приближенном числе не следует сохранять те разряды, которые идут в округление в его абсолютной ошибке: при Δ_a = 0,45 не следует писать a=3,4658, необходимо записывать a=3,47 либо a=3,5.

Относительная ошибка приближенного числа $\delta_a = \frac{\Delta_a}{|a|}$ $(a \neq 0)$ обычно выражается в %, она не изменяется при изменении масштаба измерения величины (в отличие от абсолютной ошибки).

Относительная ошибка связана с количеством *верных знаков* приближенного числа. Это количество отсчитывается от первой значащей цифры его абсолютной ошибки: если для a=3,4658 абсолютная ошибка Δ_a=0,0045 , то число a имеет три верных знака – 3,4,6; остальные знаки (5 и 8) – сомнительные.

Ориентировочно можно считать, что наличие только одного верного знака соответствует ошибке порядка 10 %, двух верных знаков – порядка 1%, трех верных знаков – 0,1 % и т.д.

Абсолютная ошибка алгебраической суммы нескольких чисел равна сумме абсолютных ошибок слагаемых:

$$\text{если } S = a_1 + a_2 + \ldots + a_n, \tag{1.2}$$

то $\Delta_s = \Delta_{a1} + \Delta_{a2} + \ldots + \Delta_{an}$.

При большом числе n слагаемых можно считать

$$\Delta_s = \sqrt{\Delta_{a_1}^2 + \Delta_{a_2}^2 + \ldots + \Delta_{a_n}^2} \tag{1.3}$$

При сложении чисел, среди которых одно имеет абсолютную ошибку, значительно большую, чем все другие, можно считать, что ошибка суммы равна этой наибольшей ошибке.

При сложении нескольких чисел одного и того же знака относительная ошибка суммы будет заключена между наименьшей и наибольшей из относительных ошибок слагаемых:

$$\min \delta_{a_k} \le \delta_s \le \max \delta_{a_k} \left(a_k > 0\,;\, k = 1,2,\ldots,n\right) \tag{1.4}$$

При вычитании же (сложении чисел с разными знаками) происходит потеря точности: относительная ошибка разности двух положительных чисел больше относительных ошибок слагаемых:

Так, если даны

$$a = 28{,}36\,;\ \Delta_a = 0{,}01\,;$$
$$b = 28{,}41\,;\ \Delta_b = 0{,}01\,;$$
$$\delta_a = \delta_b = 0{,}036\%\,;$$

а разность $c = b - a = 0{,}05$ имеет относительную ошибку,

то $\delta_c = \frac{0{,}02}{0{,}05} \cdot 100\% = 40\%$.

Таким образом, необходимо избегать вычитания близких чисел, преобразуя соответствующим образом схему вычисления.

При умножении и делении приближенных чисел складываются их относительные ошибки:

относительная ошибка выражается

$$c = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot \ldots \cdot a_n}{b_1 \cdot b_2 \cdot \ldots \cdot b_k}$$

и оценивается ошибкой

$$\delta = \delta_{a_1} + \delta_{a_2} + \ldots + \delta_{a_n} + \delta_{b_1} + \delta_{b_2} + \ldots + \delta_{и_k} \qquad (1.5)$$

При большом числе $n+k$ выгоднее пользоваться оценками, учитывающими частичную компенсацию ошибок разных знаков:

$$\delta_c = \sqrt{\delta_{a_1}^2 + \ldots + \delta_{a_n}^2 + \delta_{b_1}^2 + \ldots + \delta_{b_k}^2} \qquad (1.6)$$

Если числа a_i , b_j округлены до одинакового числа верных знаков и поэтому имеют одну и ту же относительную ошибку δ, то относительная ошибка выражения c оценивается:

$$\delta_c = \sqrt{3\,(n+k)} \cdot \delta \qquad (n+k \rangle 10) \qquad (1.7)$$

Если же относительная ошибка одного из чисел a_i, b_j значительно больше, чем у остальных, то можно считать, что относительная ошибка выражения равна этой наибольшей ошибке.

Абсолютная ошибка натурального логарифма $\ln x$ какой либо величины равна относительной ошибке самой величины:

$$\Delta_{\ln x} = \frac{\Delta_x}{x} = \delta_x \qquad (1.8)$$

Абсолютная ошибка десятичного логарифма $\lg x$ составляет приблизительно 43% от относительной ошибки самой величины:

$$\Delta_{\lg x} = 0{,}4343\delta_x \qquad (1.9)$$

Относительная ошибка степенной функции $y = x^m$ пропорциональна относительной ошибке аргумента

$$\delta_y = \left| m \right| \cdot \delta_x \qquad (1.10)$$

а относительная ошибка показательной функции $z = a^x$ пропорциональна абсолютной ошибке аргумента

$$\delta_z = \ln a \cdot \Delta_x \qquad (1.11)$$

Чтобы уменьшить накопления ошибок округления при вычислениях, во всех данных для расчета следует сохранять не только верные знаки, но и несколько сомнительных. Количество сохраняемых сомнительных знаков зависит от объема расчетов:

если количество выполняемых действий измеряется десятками, надо сохранять один-два сомнительных знака;

если количество действий измеряется сотнями, то необходимо сохранять два-три сомнительных знака.

Сохранение двух сомнительных знаков соответствует округлению абсолютных и относительных ошибок до двух значащих цифр, сохранение трех

сомнительных знаков соответствует округлению ошибок до трех значащих цифр и т.д.[1]

Метод исключения грубых ошибок при известной σ

Грубой погрешностью называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях. Причинами грубых погрешностей могут являться неисправность средств измерений, резкое изменение условий измерений и влияющих величин. *Промах* – результат грубой погрешности – случайной субъективной ошибки. Его появление – следствие неправильных действий экспериментатора. Промахи обычно исключаются из экспериментальных данных, подлежащих обработке.

При наличии в ряде экспериментальных данных, полученном при измерениях, так называемых «выскакивающих» значений применим следующий метод исключения грубых ошибок (в случае известной средней квадратической ошибки).

Обозначаем «выскакивающее» значение через x_*, а все остальное результаты измерения через $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Подсчитываем среднее арифметическое значение

$$X = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n}$$

и сравниваем абсолютную величину разности $x_* - \bar{x}$ с величиной $\sigma\sqrt{\frac{(n+1)}{n}}$.

Для получения отношения

$$t = \frac{|x_* - \bar{x}|}{\sigma\sqrt{\frac{(n+1)}{n}}} \qquad (1.12)$$

подсчитаем вероятность $1-2\Phi(t)$ с помощью таблиц функции Лапласа [1-4].

Если подсчитанная вероятность окажется очень малой, то «выскакивающее» значение содержит грубую ошибку и его следует исключить из дальнейшей обработки результатов измерений. Какую именно вероятность считать очень малой, зависит от конкретных условий решаемой задачи: если назначить низкий уровень малых вероятностей, то грубые ошибки могут остаться, если же взять этот уровень неоправданно большим, то будут исключены результаты со случайными ошибками, необходимыми для правильной обработки результатов измерения.

Обычно применяют один из трех уровней малых вероятностей:

5% (исключаются ошибки, вероятность появления которых меньше 0,05);

1% (вероятность – меньше 0,01);

0,1% (вероятность – меньше 0,001).

При выбранном уровне α малых вероятностей “выскакивающее” значение x_* считают содержащим грубую ошибку, если для соответствующего t вероятность $1-2\Phi(t) < \alpha$.

Чтобы подчеркнуть вероятный характер этого утверждения, говорят, что

значение x_* содержит грубую ошибку с надежностью вывода $P=1-\alpha$. Здесь $\alpha = 1-2\Phi(t)$, а значение $t = f(P)$, для которого $2\Phi(t)=P$, называется критическим значением t при надежности P. Как только отношение (1.12) превзойдет критическое значение, "выскакивающее" значение x_* можно считать промахом с надежностью вывода P [1,4].

Пример. *Пусть среди 100 результатов независимых измерений, полученных со средней квадратической ошибкой* $\sigma = 0{,}127$, *обнаружено «выскакивающее» значение* $x_*=3{,}867$, *в то время как среднее из остальных 99 результатов составляет* $\bar{x}=3{,}500$. *Оценить* x_* *на наличие грубой ошибки.*

Решение. Разность между «выскакивающим» значением и средним арифметическим составляет

$$x_* - \bar{x} = 0{,}367,$$

а

$$t = \frac{0{,}367}{0{,}127 \cdot \sqrt{\frac{100}{99}}} = 2{,}875.$$

По таблице значений функции Лапласа для $t = 2{,}875$ *оцениваем вероятность* $1-2\Phi(t) = 0{,}0041$ *[1].*

Последнее значение получено путем интерполяции:

$$1-2\Phi(2{,}875) = [1-2\Phi(2{,}9)+\{[1-2\Phi(2{,}8)] - [1-2\Phi(2{,}9)]\}\cdot\frac{(2{,}9-2{,}875)}{(2{,}9-2{,}8)}]$$

Следовательно, с надежностью вывода $P > 0{,}995$ *можно считать, что значение* x_* *содержит грубую ошибку, и исключить этот промах из дальнейшей обработки результатов измерений.*

Метод исключения грубых ошибок при неизвестной σ

В этом случае σ оценивают приближенно по результатам, т.е. применяется эмпирический стандарт

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}. \qquad (1.13)$$

Затем после нахождения отношения

$$t = \frac{\left|x_* - \bar{x}\right|}{S}, \qquad (1.14)$$

его сравнивают с критическими значениями $t_n(\phi)$ из справочных таблиц [1]. Если при данном числе приемлемых результатов n отношение (1.14) оказывается между двумя критическими значениями при надежностях P_1 и P_2 ($P_1>P_2$), то с надежностью вывода, большей P_1, можно считать, что «выскакивающее» значение содержит грубую ошибку, и исключить его из дальнейшей обработки результатов [1,4].

Пример. *Пусть для* n *результатов независимых равноточных измерений среднее значение составило* $x = 3{,}5$, *а эмпирический стандарт* $S = 0{,}127$, *при*

этом 101-е измерение дало результат $x_* = 3{,}867$. *Оценить этот результат на «грубость».*

Решение.

Здесь $t = \dfrac{(3{,}867 - 3{,}5)}{0{,}127} \approx 2{,}89$.

Учитывая, что $n = 100$, *то полученное* t *превосходит критическое значение 2,639 при надежности P = 0,99 и промах* x_* *можно отбросить с надежностью вывода, большей 0,99.*

Если же число приемлемых результатов $n = 5$, то полученное t меньше критического значения 3,04 даже при надежности P = 0,95; в этом случае x_* исключать из дальнейшей обработки не следует.

Практическое задание

1. Выполнить контрольные задания для СРС по практической работе.
2. По заданным преподавателем условиям провести первичную обработку экспериментальных данных.

Рекомендуемая литература

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2003. – 476 с.
2. Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
3. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высшая школа, 1979. – 400 с.
4. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

Контрольные задания для СРД [2-4]

1. Определить основные правила округления и записи результатов измерений.
2. Оценить ошибки округления при обработке экспериментальных данных.
3. Изучить метод исключения грубых ошибок при известной средней квадратической ошибке.
4. Изучить метод исключения грубых ошибок при неизвестной σ.

Семинар **№2**

Обнаружение и исключение систематических погрешностей

Цель работы: изучение основных методов обнаружения и исключения систематических погрешностей, получение практических навыков обнаружения и исключения систематических погрешностей.

Общие сведения

Как известно, погрешность измерения содержит как случайную, так и систематическую составляющую. Причем систематическая погрешность вызывает смещение результата измерений и является наиболее опасной, так как

во многих случаях о ее существовании даже не подозревают. Систематические погрешности измерений в технологических процессах являются причиной неправильного управления объектами, неправильного учета и брака продукции.

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Выявление и оценка систематических погрешностей являются наиболее трудным моментом любого измерения и часто связаны с необходимостью проведения исследований. Обнаруженная и оцененная систематическая погрешность исключается из результата введением поправки. В зависимости от причины возникновения различают следующие систематические погрешности.

Погрешность метода (теоретическая погрешность) измерений – составляющая погрешности измерения, обусловленная несовершенством метода измерений. Здесь необходимо учитывать тот факт, что метод измерения, по определению, включает в себя и принцип измерения. Рассматриваемая погрешность определяется в основном несовершенством принципа измерения и, в частности, недостаточной изученностью явления, положенного в основу измерения.

Инструментальная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, зависящая от погрешности применяемых средств измерений. Данная погрешность имеет несколько составляющих, наиболее важные из которых определяются несовершенством конструкции (или схемы), технологии изготовления средств измерений, постепенным их износом и старением материалов, из которых эти средства измерений изготовлены.

Погрешность установки является следствием неправильной установки средств измерений.

Погрешность от влияющих величин является следствием воздействия на объект и средство измерений внешних факторов (тепловых и воздушных потоков, магнитных, электрических, гравитационных и других полей, атмосферного давления, влажности воздуха, ионизирующего излучения).

Субъективная погрешность обусловлена индивидуальными свойствами человека, выполняющего измерения. Причиной ее являются укоренившиеся неправильные навыки выполнения измерений. К этой систематической погрешности относятся, например, погрешность из-за неправильного отсчитывания десятых долей делений шкалы прибора, погрешности из-за различной для разных людей скорости реакции и т. п.

По характеру проявления систематические погрешности подразделяют на постоянные и переменные.

Постоянные погрешности не изменяют своего значения при повторных измерениях. Причинами этих погрешностей являются: неправильная градуировка или юстировка средств измерений, неправильная установка начала отсчета и т. д.

Переменные погрешности при повторных измерениях могут принимать различные значения. Если переменная погрешность при повторных измерениях возрастает или убывает, то ее называют *прогрессивной*. Переменная

погрешность может изменяться при повторных измерениях периодически или по сложному закону. Причинами возникновения переменной систематической погрешности являются действие внешних факторов и особенности конструкций средств измерений.

Обнаружение систематических погрешностей измерений является одной из самых сложных задач метрологии. В том или ином виде ее приходится решать при подготовке и проведении технологических измерений.

Близость к нулю систематической погрешности определяется как *правильность измерений*. Исключение систематической погрешности из результатов измерений рассматривается как исправление этих результатов. Поэтому результаты наблюдений или измерений, содержащие неисключенную систематическую погрешность, называют *неисправленными*, а результаты, в которых систематическая погрешность исключена,— *исправленными.*

Методы обнаружения и исключения систематической погрешности

Общепринятыми методами обнаружения и исключения систематической погрешности являются следующие:

– устранение источников погрешности до начала измерений;

– использование дополнительных измерений;

– внесение поправок в результаты измерений;

– оценка границ систематических погрешностей в случае невозможности их исключения;

– использование специальных методов измерения.

Последние из перечисленных методов определяют одно из перспективных направлений измерительной техники [1,2].

Устранение источников систематических погрешностей до начала измерений является одним из наиболее радикальных путей, так как позволяет полностью или частично освободиться от необходимости применения других из названных выше способов, а также ускорить процесс измерения.

Под устранением источника погрешностей понимают удаление источников тепла, вибрации, электромагнитных полей и др. от средств измерений или защиту последних от указанных источников, если по условиям применения средств измерений они не могут быть удалены от источников погрешности.

Надежным средством обнаружения систематических погрешностей является использование дополнительных измерений, а именно:

– измерения, основанного на ином методе или принципе;

– измерения, выполняемого с помощью второго средства измерения, аналогичного основному или иного по принципу действия;

– измерения, выполненного с помощью более точного средства измерений.

Исключение систематической погрешности из результата измерений осуществляется путем применения поправок или поправочных множителей.

В первом, наиболее распространенном случае осуществляется алгебраическое сложение результата измерения и поправки. Под поправкой при этом понимают систематическую погрешность, взятую с обратным знаком.

Во втором случае результат измерения умножают на поправочный множитель, который может быть больше или меньше единицы. Поправочный множитель обычно применяется тогда, когда систематическая погрешность является мультипликативной.

В обоих случаях высокая точность результата достигается при условии, что поправка мала по сравнению с измеренным значением или поправочный множитель близок к единице. Само значение поправок и поправочных множителей находят указанными выше способами, а также путем поверки средств измерений. Поправки для учета влияния тех или иных влияющих величин, при известных функциях влияния, определяют на основе вспомогательных измерений этих величин.

В некоторых случаях исключить систематическую погрешность из результата измерения оказывается нецелесообразным из-за технической сложности. В этих случаях по известному значению систематической погрешности средства измерений оценивается погрешность выполненного измерения. Оценка границ систематической погрешности осуществляется обычно и при внесении поправок.

Систематическая погрешность, остающаяся после введения поправок, включает в себя ряд элементарных составляющих, называемых неисключенными остатками систематической погрешности. Они связаны в основном с погрешностью определения поправок и погрешностью, зависящей от точности измерения влияющих величин, входящих в функцию влияния.

Для определения границ неисключенной систематической погрешности результата измерения часто предполагается, что неисключенные остатки систематической погрешности являются случайными величинами, распределенными по равномерному закону. На этом основании границу неисключенной систематической погрешности определяют по формуле

$$\Theta = r\sqrt{\sum_{k=1}^{l} И_k^2} \qquad (2.1)$$

где Θ_k – граница k-й неисключенной систематической погрешности;

r – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, равный 1,1 при доверительной вероятности 0,95;

l – общее число неисключенных остатков систематических погрешностей.

Все рассмотренные общие способы обнаружения и устранения систематических погрешностей в той или иной степени находят применение при проведении технологических измерений.

При получении измерительной информации о технологических параметрах с помощью систем автоматического контроля, как правило, заранее предусматриваются и осуществляются мероприятия по устранению источников систематических погрешностей или защите от них средств измерений. Если имеются сомнения в показаниях каких-либо средств измерений, то применяют дополнительные измерения, осуществляемые с использованием иных методов, принципов и средств измерений, чем основные, а также с целью контроля

выполняются параллельные измерения с помощью более точных средств измерений [1-3].

Методы уменьшения (исключения) систематической погрешности

Выше были рассмотрены основные методы обнаружения и исключения систематической погрешности, основывающиеся на устранении источников систематической погрешности до начала измерений и методы исключения систематических погрешностей по окончании измерений. К числу последних относится не только применение поправок и поправочных множителей, но и учет дополнительных погрешностей средств измерений.

Кроме этих методов применяют методы, позволяющие определять и исключать систематическую погрешность в процессе измерений. Последние основываются на такой организации процесса измерений и обработки получаемой измерительной информации, которые обеспечивают исключение погрешности или ее определение. Причем применение таких методов возможно и целесообразно в тех случаях, когда известна природа исключаемой систематической погрешности. К числу этих методов относятся: метод замещения, метод компенсации погрешности по знаку и различные методы, базирующиеся на совместных или совокупных измерениях.

При использовании *метода компенсации погрешности по знаку* процесс измерения организуется таким образом, что известная систематическая погрешность входит в результат каждого из двух повторных измерений с противоположным знаком. Это позволяет после определения среднего арифметического значения исключить систематическую погрешность.

Сущность *методов, базирующихся на совместных или совокупных измерениях* применительно к уменьшению систематических погрешностей, состоит в том, что в процессе этих измерений изменяют параметр, отвечающий за возникновение систематической погрешности, или осуществляют измерение физической величины совместно и последовательно с несколькими вспомогательными мерами. В результате получают систему независимых уравнений, из решения которой определяют значения измеряемой физической величины уже с учетом систематической погрешности.

Одним из наиболее радикальных путей повышения точности измерений при прочих равных условиях является использование более точных средств измерений. Появление и развитие микроэлектронной и микропроцессорной техники, обеспечивающие возможность практически полной автоматизации самых сложных измерительных процессов, позволили использовать для увеличения точности средств измерений рассмотренные выше методы повышения точности измерений. Наряду с этими методами для повышения точности средств измерений применяется ряд традиционных методов.

Метод многократных наблюдений используется для уменьшения случайной составляющей погрешности средства измерений. Метод заключается в том, что за некоторый постоянный интервал времени, отведенный для измерения, выполняют несколько наблюдений, а затем с помощью вычислительного

устройства, входящего в состав данного средства измерений, вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины и оценку среднеквадратического отклонения результата измерения.

Метод многоканальных измерений аналогичен методу параллельных измерений. Средства измерений, с помощью которых реализуется данный метод, содержат несколько идентичных по характеристикам параллельных измерительных цепей (каналов) и вычислительное устройство. Последнее, получая измерительную информацию по этим каналам, вычисляет среднее арифметическое значение измеряемой величины и оценку среднеквадратического отклонения результата измерения. Такой метод позволяет уменьшить и случайную составляющую погрешности средства измерений.

Метод параметрической стабилизации, называемый еще конструктивно-технологическим, состоит в стабилизации статической характеристики средств измерений. Параметрическая стабилизация реализуется:

– путем изготовления средств измерений из точных и стабильных элементов, параметры которых мало подвержены внешним влияниям;

– за счет термостабилизации;

– стабилизацией параметров питания средств измерений;

– экранированием средств измерений от магнитных и электрических полей и т.п.

Данный метод уменьшает систематическую и случайную погрешности средств измерений. Он является классическим в приборостроении. На основе этого метода до сих пор строится современный парк средств измерений.

Структурные методы основаны на том, что в состав средств измерений включаются дополнительные узлы, элементы и меры, обеспечивающие повышение точности этих средств измерений за счет информации, полученной с их помощью. Структурные методы повышения точности средств измерений подразделяют на методы, обеспечивающие стабилизацию статической характеристики средства измерений, и методы, основанные на коррекции этой характеристики.

Различают структурные методы – методы стабилизации и методы коррекции статической характеристики средств измерений.

Структурные методы стабилизации статической характеристики средств измерений

Метод отрицательной обратной связи реализуем только при наличии преобразовательных элементов или преобразователей, способных осуществлять преобразование выходного сигнала средства измерений во входной (обратный преобразователь). Создание таких преобразователей — часто сложная техническая задача. Применение данного метода обеспечивает уменьшение мультипликативной погрешности и погрешности нелинейности, а относительная аддитивная погрешность при этом не изменяется. В то же время использование метода приводит к уменьшению чувствительности средства измерения. Данный метод повышает точность средств измерения и наряду с

методом параметрической стабилизации является наиболее распространенным.

Метод инвариантности состоит в том, что в средстве измерений помимо измерительной цепи (канала) имеется сравнительная цепь (канал), к которой не подается входной сигнал, но которая, как и измерительная цепь, находится под воздействием некоторой влияющей величины. Причем параметры сравнительной цепи подобраны так, что изменение ее сигнала под действием влияющей величины идентично изменению сигнала измерительной цепи под действием этой величины, т. е. возмущения, вызванные влияющей величиной, поступают в средство измерений по двум каналам (принцип двухканальности). Использование разности сигналов измерительной и сравнительной цепей (при дифференциальном включении этих цепей) обеспечивает независимость (инвариантность) результирующего сигнала от названной влияющей величины. Таким образом, метод обеспечивает исключение дополнительной погрешности, вызванной изменениями некоторой, как правило, основной влияющей величины. Данный метод давно и широко используется в аналитическом приборостроении.

Метод модуляции состоит в том, что сигнал, поступающий на вход средства измерений, или параметры этого средства измерений подвергаются принудительным периодическим изменениям (модуляции) с частотой, не совпадающей (обычно более высокой) с областью частот измеряемого сигнала. Использование метода модуляции позволяет уменьшить погрешности от сил трения, явлений поляризации и гистерезиса.

Метод прямого хода состоит в том, что измеряемый сигнал поступает к чувствительному элементу средства измерений через ключ, с помощью которого осуществляется периодическое во времени отключение измеряемого сигнала от чувствительного элемента и подача к последнему нулевого уровня сигнала. Это обеспечивает работу средства измерений на восходящей ветви (прямой ход) статической характеристики при всех значениях измеряемого сигнала, что исключает наиболее существенную погрешность многих средств измерений — погрешность от вариации.

Структурные методы коррекции статической характеристики (методы коррекции погрешности средств измерений)

Метод вспомогательных измерений заключается в автоматизации процесса учета дополнительной погрешности средства измерений по известным функциям влияния ряда влияющих величин. Для этого осуществляется измерение значений этих величин и с помощью вычислительного устройства, построенного с учетом названных функций влияния, автоматически корректируется выходной сигнал средства измерений.

Метод обратного преобразования (итерационный метод) базируется на использовании дополнительно в составе средства измерений кроме прямой измерительной цепи (прямого преобразователя), цепи, способной осуществлять обратное преобразование выходного сигнала (обратный преобразователь). Эта цепь должна иметь существенно большую точность, чем цепь прямого преобразования. Результат измерения получают путем итераций. В процессе

каждой итерации последовательно осуществляются: прямое преобразование измеряемой величины и запоминание результата, обратное преобразование запомненного значения этой величины, прямое преобразование сигнала обратного преобразователя, соответствующего запомненному значению измеряемой величины, и сравнение результатов этих двух преобразований, на основе которого формируется корректирующий сигнал. Обратный преобразователь в данном методе играет роль как бы многозначной меры, по которой корректируется статическая характеристика прямого преобразователя. Метод обратного преобразования позволяет уменьшать в зависимости от используемого алгоритма коррекции аддитивную и мультипликативную погрешности средств измерений.

Метод образцовых сигналов (образцовых мер) состоит в определении в каждом цикле измерения реальной функции преобразования средства измерений с помощью образцовых сигналов (мер), т. е. метод заключается в автоматической градуировке средства измерений в каждом цикле. Цикл включает в себя измерение физической величины, поступающей на вход средства измерения, поочередное измерение одной или нескольких мер, подключаемых вместо измеряемой физической величины на вход средства измерений, и решение системы уравнений с помощью вычислительного устройства, из которого определяется значение измеряемой физической величины. В этом решении уже учтены изменения реальной статической характеристики, практически данный метод сводится к совокупному измерению. Он позволяет уменьшить аддитивную и мультипликативную погрешность, а также погрешность нелинейности.

Тестовый метод сводится к проведению совокупных измерений. В отличие от метода образцовых сигналов в тестовом методе в каждом цикле работы средства измерений кроме измерения физической величины, поступающей на вход средства измерений, осуществляют измерение величин-тестов, каждая из которых формируется из меры и измеряемой величины. Значение измеряемой величины определяется из системы уравнений, решаемой с помощью вычислительного устройства. По существу данный метод является развитием метода образцовых сигналов [3].

Практическое задание

1. Выполнить контрольные задания для СРС по практической работе.
2. Для заданного преподавателем примера выбрать соответствующие методы уменьшения (исключения) систематической погрешности. Выбор методов обосновать.
3. Для заданного преподавателем примера определить (оценить) систематическую погрешность измерений.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. – 526 с.

2. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. – 415 с.
3. Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К и др. Электрорадиоизмерения: Учебник для ВУЗов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. – 384 с.

Контрольные задания для СРД [1-3]

1. Изучить методы обнаружения и исключения систематической погрешности.
2. Определить границы неисключенной систематической погрешности.
3. Изучить методы, позволяющие определять (исключать) систематическую погрешность в процессе измерений.
4. Изучить структурные методы уменьшения (исключения) систематической погрешности, применяемые в приборостроении.

Семинар **№3**

Расчет измерительных масштабирующих преобразователей

Цель работы: изучение способов расширения пределов измерения по току и напряжению электроизмерительных приборов, получение практических навыков расчета и выбора измерительных шунтов и добавочных сопротивлений.

Электроизмерительные шунты

Электроизмерительный шунт применяется для расширения предела измерения по току измерительных приборов и представляет собой включаемый в цепь измеряемого тока резистор ($R_{Ш}$), параллельно которому присоединяется прибор (рис.3.1). Для устранения влияния сопротивления контактных соединений шунты снабжаются токовыми и потенциальными зажимами.

Соединяют прибор с выносным шунтом короткими проводами с достаточно большим сечением, чтобы сопротивление их было значительно меньше сопротивления шунта. Провода цепи должны подводиться к шунту, а не к прибору. Если провода цепи присоединить к прибору, то при случайном отсоединении шунта весь ток цепи проходит через прибор, что вызовет немедленный выход его из строя.

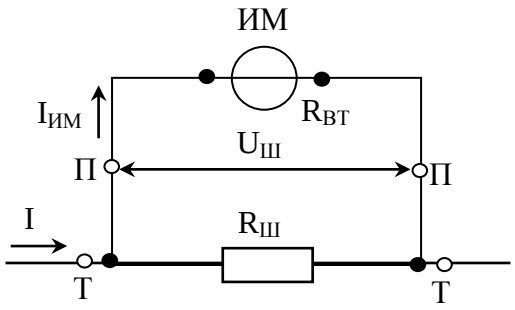


Рисунок 3.1 − Схема соединения измерительного механизма с шунтом

Если необходимо в измерительном механизме иметь ток $I_{им}$ меньше в n раз измеряемого тока I, то сопротивление шунта

$$R_{Ш} = R_{ВТ}/(n-1), \qquad (3.1)$$

где $R_{ВТ}$ – внутреннее сопротивление измерительного механизма;

$n = I / I_{ИМ}$ – коэффициент шунтирования.

Пример. *Для расширения предела измерений микроамперметра М260М ($I_{ИМ}$ = 100 мкА и $R_{ВТ}$ = 2000 Ом) до значения I = 10 мА следует применить шунт с сопротивлением*

$$R_{Ш} = R_{ВТ}/(n-1) = \frac{2000}{\frac{10 \bullet 10^{-3}}{100 \bullet 10^{-6}} - 1} = 20{,}2 \text{ Ом}.$$

В результате расширения предела измерения прибора за счет шунта изменяется цена деления его шкалы, что следует учитывать при отсчете по шкале прибора значений измеряемого тока. Так, например, в приведенном примере микроамперметр М260М имеет 20 делений и, следовательно, цена деления шкалы составляет: 5 мкА/дел — при отсутствии шунта (предел измерения – 100 мкА) и 0,5 мА/дел — при включении шунта (предел измерения – 10 мА).

Переносные приборы часто снабжают многопредельными шунтами, состоящими из нескольких резисторов, переключаемых в определенной последовательности в зависимости от предела измерения. На рис. 3.2, а – б приведены схемы измерителей тока на три предела измерения (I_1, I_2, I_3). В схеме прибора (рис.3.2, а) каждый из резисторов R_1, R_2 , R_3 используется в качестве шунта только на одном пределе измерения – на I_1, I_2, или I_3. Такие шунты рассчитывают по формуле (3.1). Переключение пределов измерения таких приборов можно делать или безобрывным переключателем, или обычным – после отключения измеряемой цепи от источника тока, иначе возможны многократная перегрузка измерителя и выход его из строя. Из-за влияния контактных переходных сопротивлений переключателя такая схема широко не применяется.

В схеме на рис. 3.2, б использован универсальный многопредельный шунт, здесь на пределе измерения I_1 в качестве шунта используется резистор R_1, а резисторы R_2 и R_3 оказываются последовательно соединенными с измерительным механизмом *ИМ* ($R_{ВТ}$), на пределе измерения I_2 шунтом являются резисторы $R_1 + R_2$, а резистор R_3 последовательно соединяется с $R_{ВТ}$; на пределе измерения I_3, R_1, R_2 и R_3 используются в качестве шунта.

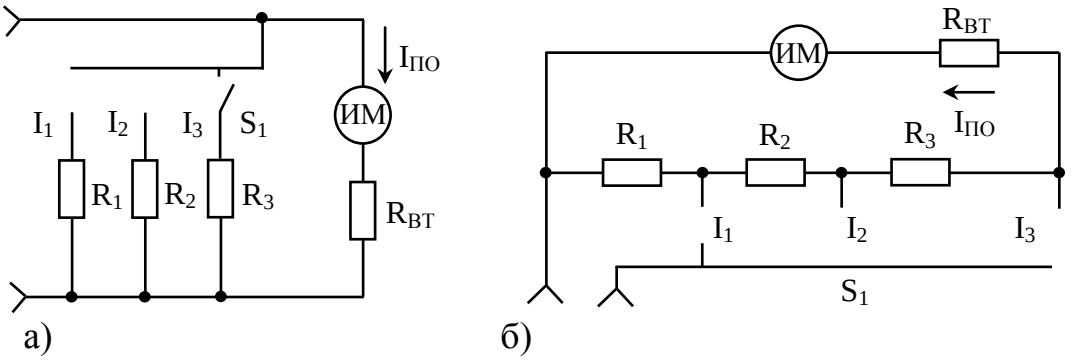


Рисунок 3.2 − Схема многопредельного миллиамперметра:
а – схема с отдельными шунтами: б – схема с универсальным шунтом

Многопредельный универсальный шунт позволяет переключать пределы измерения без разрыва контролируемой цепи; в его схеме имеются переходные сопротивления, но они находятся не в цепи шунта и поэтому не искажают показаний прибора. Существует несколько методов расчета универсальных шунтов. Рассмотрим метод расчета, основанный на известном соотношении токов в разветвленной электрической цепи (рис.3.3): $I_1 = I\, R_2 / (R_1 + R_2)$, где R_1 и R_2 могут состоять из отдельных последовательно соединенных резисторов.

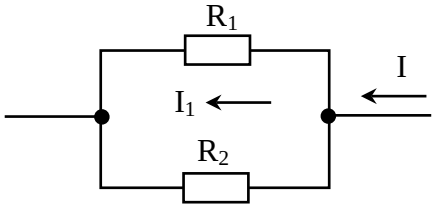


Рисунок 3.3 − Разветвленная электрическая цепь

Применяя это соотношение для пределов измерения I_1, I_2 и I_3 универсального шунта (рис. 3.2, б), получим

$$I_{no} = I_1 R_1 / \sum R = I_2 (R_1 + R_2) / \sum R = I_3 (R_1 + R_2 + R_3) / \sum R = ..., \qquad (3.2)$$

где $\sum R = R_{BT} + R_1 + R_2 + R_3$.

Решая систему уравнений (3.2), получим

$$R_1 = I_3 I_{ПО} R_{BT} / I_1 (I_3 - I_{ПО})\ldots \qquad (3.3)$$

$$R_2 = (I_1 - I_2) I_3 I_{ПО} R_{BT} / I_1 I_2 (I_3 - I_{ПО})\ldots \qquad (3.4)$$

$$R_3 = (I_2 - I_3) I_{ПО} R_{BT} / I_2 (I_3 - I_{ПО})\ldots \qquad (3.5)$$

Пример. *Рассчитать сопротивление резисторов R_1, R_2 и R_3 многопредельного универсального шунта (рис. 3.2, б) дли измерения токов с пределами 30 (I_1), 3,0 (I_2) и 0,3 (I_3) мА измерителем с током полного отклонения $I_{ПО}$ = 150 мкА и внутренним сопротивлением R_{BT} = 1500 Ом.*

Решение.

1) $R_1 + R_2 + R_3 = I_{ПО} R_{BT} / (I_n - I_{ПО}) = 1500 \cdot 150 \cdot 10^{-6} / 0{,}3 \cdot 10^{-3} - 150 \cdot 10^{-6} =$ 1500 Ом, где $I_n = I_3 = 0{,}3$ мА.

2) $R_1 = I_{ПО} \sum R / I_1 = 150 \cdot 10^{-6} \cdot 3000 / 30 \cdot 10^{-3} = 15$ Ом; здесь $\sum R = R_{BT} + R_1 + R_2 + + R_3 = 1500 + 1500 = 3000$ Ом.

3) $R_1 + R_2 = I_{ПО} \sum R / I_{n-1} = 150 \cdot 10^{-6} \cdot 3000 / 3 \cdot 10^{-3} = 150$ Ом,

где $I_{n-1} = I_2 = 3$ мА.

4) $R_2 = (R_1 + R_2) - R_1 = 150 - 15 = 135$ Ом.

5) $R_3 = R_1 + R_2 + R_3 - (R_1 + R_2) = 1500 - 150 = 1350$ Ом.

Расчет параметров R_1, R_2 и R_3 по формулам (3.3), (3.4) и (3.5) в данном случае дает те же значения.

Шунты обычно изготовляют из манганина, обладающего ничтожно малым

температурным коэффициентом. Шунты бывают внутренние, вмонтированные в корпус прибора, и наружные, которые разделяются на индивидуальные и калиброванные (взаимозаменяемые). Индивидуальный шунт применяют только с тем прибором, который градуировался с данным шунтом. Калиброванный шунт можно применять с прибором, номинальное напряжение которого соответствует указанному на шунте напряжению. Наружные шунты обычно присоединяются к измерительному механизму двумя калиброванными проводниками с общим сопротивлением 0,035 Ом. Классы точности шунтов – 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 – показывают допустимое отклонение сопротивления шунта от номинального значения, выраженное в процентах.

Шунты преимущественно применяют в цепях постоянного тока, так как на переменном токе влияют частота и индуктивность элементов [1-3].

Добавочные резисторы

Добавочный резистор применяют для того, чтобы расширить предел измерения напряжения и не допустить влияния температуры на сопротивление вольтметра. Добавочный резистор изготовляют из манганина и включают последовательно с измерительным прибором (рис. 3.4). В качестве добавочных используют точные малогабаритные проволочные и микропроволочные резисторы, а также непроволочные резисторы повышенной стабильности (*прецизионные*) и высокоточные, изготовленные с допусками до ± 0,1 % и обладающие минимальным температурным коэффи-циентом сопротивления в рабочем интервале температур.

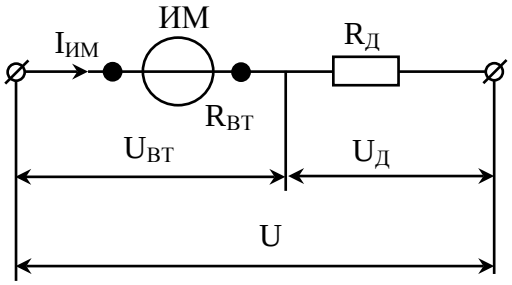


Рисунок 3.4 − Соединение измерительного прибора с добавочным резистором

В результате включения добавочного резистора входное сопротивление вольтметра $R_{ВХ}$ значительно повышается и становится равным $R_{ВТ}+R_Д$, где $R_{ВТ}$ — внутреннее сопротивление измерителя.

Сопротивление добавочного резистора: $R_Д = R_{ВТ}\ (m - 1)$, где m — коэффициент деления, показывающий во сколько раз нужно увеличить предел измерения вольтметра.

Пример. *Милливольтметр М24-155 имеет предел измерения 100 мВ и ток полного отклонения $I_{ПО}$ = 6 мА, что соответствует $R_{ВТ}$ = 16,7 Ом. Необходимо расширить предел измерения этого прибора до 1000 мВ (m = 10).*

Решение. Для этого последовательно к прибору необходимо присоединить резистор с сопротивлением:

$R_Д = R_{ВТ}\ (m - 1) = 16{,}7 \cdot (10 - 1) = 150{,}3$ *Ом.*

В результате присоединения резистора $R_Д$ цена деления шкалы прибора увеличится с 1 до 10 мВ/дел (прибор имеет 100 делений), что следует учитывать при отсчете показаний по прибору, а входное сопротивление прибора увеличится до значения

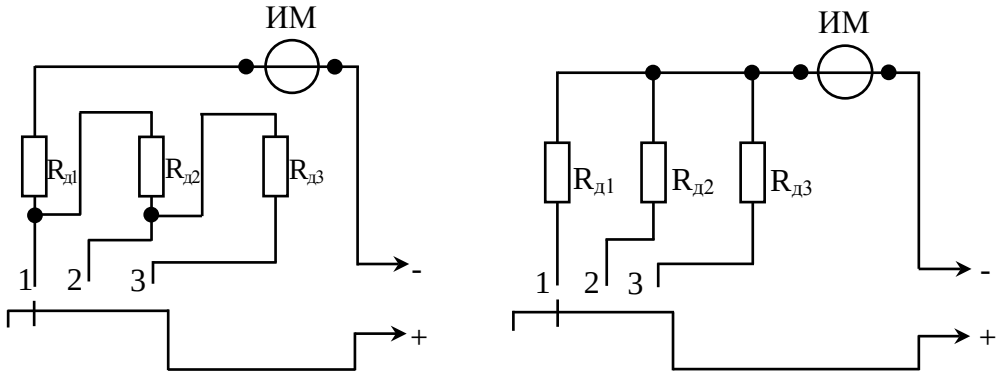
$R_{ВХ} = R_{ВТ}+R_Д = 16,7 + 150,3 = 167$ *Ом.*

Несмотря на значительное увеличение, входное сопротивление остается низким и такой вольтметр непригоден для измерения режимов в радиоэлектронной аппаратуре, где обычно применяют вольтметры, выполненные на базе высокочувствительных микроамперметров с током полного отклонения 50—100 мкА. Для подобных приборов в паспорте часто указывается ток полного отклонения и внутреннее сопротивление. По этим данным можно определить падение напряжения на приборе $U_П = I_{ПО} R_{ВТ}$, соответствующее полному отклонению указателя. Для высокочувствительных микроамперметров это значение составляет десятки и сотни милливольт.

Для удобства сравнения многопредельных вольтметров и оценки их влияния на режим измеряемой цепи пользуются значением не входного, а так называемого относительного входного сопротивления $R_{вхО}$, которое численно равно сопротивлению, приходящемуся на 1 В предельного значения. Это сопротивление можно определить как $R_{ВХ\,О} = 1/I_{ПО}$.

Многопредельный вольтметр можно выполнить в двух основных вариантах. На рис. 3.5, а приведена схема вольтметра с отдельными добавочными резисторами для каждого предела. Схема рис. 3.5, б характерна тем, что в состав добавочного резистора каждого предела входят добавочные резисторы более низковольтных пределов; сопротивление каждого резистора находится как разность сопротивлений добавочных резисторов двух смежных пределов.

Пример. *Рассчитать вольтметр по схеме рис. 3.5, б на три предела измерений: 1 В, 5 В и 10 В. В качестве измерителя использовать микроамперметр, у которого $I_{ПО} = 100$ мкА; $R_{ВТ} = 1000$ Ом.*



а) б)

Рисунок 3.5 − Схемы многопредельных вольтметров постоянного тока

Решение. Для предела в 1 В потребуется

$R_Д = U_{П1}/I_Н - R_{ВТ} = 1/100\,10^{-6} - 1000 = 9000$ *Ом;*

для 5 В –

$R_{Д1} + R_{Д2} = U_{П2}/I_Н – R_{ВТ} = 5/10010^{-6} – 1000 = 49$ *кОм;*

$R_{Д2} = R_{Д1} + R_{Д2} – R_{Д1} = 49 – 9 = 40$ *кОм;*

для 10 В –

$R_{Д1} + R_{Д2} + R_{Д3} = U_{П3}/I_Н – R_{ВТ} = 10/10010^{-6} – 1000 = 99$ *кОм;*

$R_{Д3} = 99 – 49 = 50$ *кОм.*

Температурный коэффициент всего вольтметра при наличии добавочного резистора определяется по формуле:

$$\beta = (\beta_{МД} R_{ВТ} + \beta_{МН} R_Д) / (R_{ВТ} + R_Д) = \beta_{МД} R_{ВТ} / (R_{ВТ} + R_Д),$$

где β — температурный коэффициент всего вольтметра;

$\beta_{МД}$ — температурный коэффициент меди, используемой для намотки рамки прибора ($\beta_{МД} = 0{,}004$ град$^{-1}$);

$\beta_{МН}$ — температурный коэффициент манганина, используемого для изготовления добавочного резистора.

Взяв, например, $R_Д$ в 19 раз больше сопротивления обмотки рамки, получим температурный коэффициент вольтметра в 20 раз меньше; следовательно, во столько же раз будет меньше и температурная погрешность вольтметра.

Калиброванные добавочные резисторы делят на классы точности 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0 и изготовляют на номинальные токи 0,5; 1; 3; 5; 7,5; 15 и 30 мА. Калиброванный резистор может применяться с любым прибором, номинальный ток которого равен номинальному току добавочного резистора. Индивидуальный резистор применяют только с тем прибором, который градуировался с ним [1-3].

Практическое задание

1. Выполнить контрольные задания для СРС по практической работе.
2. Для заданных преподавателем условий рассчитать значения сопротивлений многопредельного универсального шунта.
3. Для заданных преподавателем условий рассчитать значения сопротивлений добавочных резисторов для многопредельного вольтметра постоянного тока.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. – 526 с.
2. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. – 415 с.
3. Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К и др. Электрорадиоизмерения: Учебник для ВУЗов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. – 384 с.

Контрольные задания для СРД [1-3]

1. Рассчитать сопротивление электроизмерительного шунта.
2. Рассчитать сопротивление добавочного резистора.
3. Определить температурный коэффициент всего вольтметра.

Семинар **№4**

Выбор электроизмерительного прибора

Цель работы:

изучение основных правил выбора электроизмерительных приборов; ознакомление с условными обозначениями, наносимыми на шкалу измерительных приборов; получение практических навыков выбора измерительных приборов.

Общие сведения

Как известно, для электроизмерительных приборов стандартом установлено девять классов точности:

0,02; 0,05; 0,1; 0,2 — *образцовые приборы*, применяемые в основном для поверки и градуировки рабочих приборов;

0,5; 1,0 — *лабораторные приборы массового применения*;

1,5; 2,5; 4,0 — *технические приборы*.

Приборы более низкой точности служат для оценочных измерений и называются обычно *указателями* или *индикаторами*. Приборы специального назначения, например, *радиоизмерительные*, могут иметь класс точности, отличающийся от перечисленных значений.

Для электроизмерительных приборов класс точности, как правило, указывается в виде числа, равного основной приведенной погрешности, т. е. максимальной абсолютной погрешности, выраженной в процентах от максимального значения измеряемой величины при работе в нормальных условиях. Это число наносится на шкалу прибора.

Комбинированный измерительный прибор может иметь различные классы точности для разных измеряемых значений и родов тока. *Многопредельный* прибор для измерения одного и того же значения может иметь различные классы точности для различных пределов измерений (различных конечных значений шкалы).

Способность прибора реагировать на изменение измеряемого значения характеризует его *чувствительность* и оценивается отношением изменения $\Delta\alpha$ положения указателя относительно шкалы к изменению ΔX измеряемого значения, вызвавшему это перемещение, т. е. $S_X = \Delta\alpha/\Delta X$, где S_X — чувствительность прибора в данной точке шкалы. Чувствительность электроизмерительного прибора имеет размерность, зависящую от характера измеряемого значения. Например, чувствительность прибора к току можно выразить размерностью *дел/А* или *град/А*, а чувствительность к напряжению — размерностью *дел/В* или *град/В*.

Если шкала прибора равномерная, то во всех точках шкалы одинаковым

изменениям измеряемого значения соответствуют одинаковые угловые или линейные перемещения указателя, т. е. чувствительность прибора постоянна.

Цена деления шкалы (*постоянная прибора*) аналоговых приборов, градуированных просто в миллиметрах, есть значение, обратное чувствительности:

$$C = 1/ S_X.$$

Числовое значение измеряемого значения равно произведению числа делений, прочитанных по шкале, на цену деления шкалы.

Пример. *Определим чувствительность по напряжению и цену деления шкалы комбинированного электроизмерительного прибора М491. Этот прибор является вольтомметром магнитоэлектрической системы и имеет четыре предела измерения по напряжению: 3, 30, 300 и 600 В. Шкала прибора равномерная и имеет 30 делений:*

Для предела 3 В S = 30/3 = 10 дел/В; С = 3/30 =0,1 В /дел;

для 30 В S =30/30 = 1 дел/В, С = 1 В/дел;

для 300 В S =30/300 = 0,1 дел/В, С = 300/30 = 10 В/дел;

для 600 В S = 30/600 = 0,05 дел/В; С = 600/30 = 20 В/дел.

Если при измерении напряжения этим прибором его стрелка отклонилась на 5 делений, то это составит 0,1-5 = = 0,5 В на пределе 3 В и 20-5 = 100 В на пределе 600 В.

Степень влияния прибора на режим электрической цепи, в которую он включается, определяется значением его *внутреннего сопротивления* $R_{ВТ}$ (сопротивление рамки и пружин), указываемого в справочных данных прибора. Часто для измерителей тока указывается падение напряжения на приборе $U_П$, а для вольтметров — ток полного отклонения $I_{ПО}$. Кроме того, всегда известно конечное значение шкалы прибора I_K или U_K, В таких случаях $R_{ВТ}$ вычисляется следующим образом:

а) для измерителя тока

$$R_{ВТ} = U_П / I_K ;$$

б) для вольтметра

$$R_{ВТ} = U_K / I_{ПО.}$$

На практике обычно говорят о входном сопротивлении измерительного прибора — $R_{ВХ}$. Для вольтметра $R_{ВХ} = R_{ВТ} + R_Д$, где $R_Д$ — сопротивление добавочного резистора, включаемого последовательно с прибором для расширения предела его измерения.

Электроизмерительные приборы также классифицируются по степени защищенности от внешнего магнитного поля, температуро- и влагоустойчивости, а также по устойчивости к механическим воздействиям и степени герметичности корпуса.

Выбор электроизмерительного прибора

Выбирая прибор для измерения, необходимо убедиться, что его основные показатели соответствуют всем техническим требованиям, предъявленным к нему условиями измерения и эксплуатации. К таким требованиям относятся,

например, *род тока, значение измеряемой величины (предел измерений), форма кривой, частота тока, условия окружающей среды, механические воздействия* и др.

Особо следует остановиться на выборе прибора по классу точности, а именно:

а) не следует задаваться целью получить погрешность измерений во много раз меньшую допускаемой; например, если допускается относительная погрешность 5 или 10 %, то не следует для измерения выбирать вольтметр, обеспечивающий измерение с погрешностью не более 0,1 %;

б) необходимо помнить, что класс точности прибора характеризует его свойства а отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этого прибора, так как могут быть и другие причины, влияющие на общую погрешность измерений;

в) необходимо помнить, что с меньшей относительной погрешностью измеряется значение, которое отсчитывается при положении стрелки прибора ближе к пределу шкалы (для цифровых приборов – при получении измеряемых значений, приближенных к пределу показаний либо измерений), так как относительная погрешность измерения уменьшается с увеличением значения измеряемой величины. Например, для вольтметра со шкалой 0–100 В класса точности 1,5 предельная абсолютная погрешность равна 1,5 В, а относительные погрешности при измерении 25 и 75 В соответственно равны:

$\delta_{25} = \pm\Delta A_{П}/A \cdot 100 = \pm 1{,}5/25 \cdot 100 = \pm\ 6\%$;

$\delta_{75} = \pm\ \Delta A_{П}/A \cdot 100 = \pm 1{,}5/75 \cdot 100 = \pm\ 2\%$.

Следовательно, для уменьшения относительной погрешности измерения нужно выбирать измерительный прибор с таким верхним пределом, чтобы при измерении положение стрелки прибора находилось в последней трети (или половине) его шкалы (для цифровых приборов – выбирать такой поддиапазон измерений, при котором измеряемые значения были бы по возможности максимально приближены к пределу показаний либо измерений).

Условные графические обозначения

В соответствии со стандартом каждый измерительный прибор имеет следующие обозначения (на лицевой стороне, на корпусе и у зажимов):

обозначение единицы измеряемого значения (для приборов с именованной шкалой) и класса прибора;

указание номера стандарта, установленного на данную группу приборов;

условные обозначения – рода тока, системы прибора и степени защищенности от магнитных и электрических влияний, рабочего положения прибора (если это положение имеет значение), испытательного напряжения изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу и др. [2–4]

Пример. *На рис. 4.1 приведена шкала микроамперметра типа М94.*

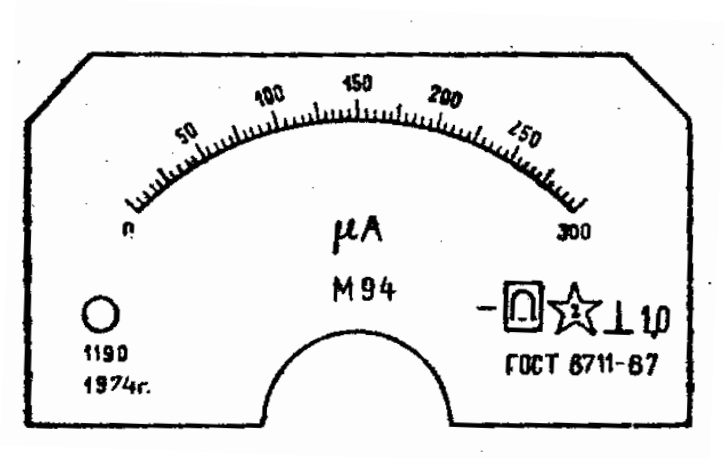


Рисунок 4.1 – Лицевая панель прибора М94

Из обозначений, нанесенных на шкалу, видно, что:

прибор предназначен для измерения на постоянном токе (знак «—»);

прибор магнитоэлектрической системы (знак системы – подковообразный магнит);

снабжен защитой от внешних магнитных полей по первой категории (прямоугольный контур вокруг знака системы);

измерительная цепь прибора изолирована от его корпуса и испытана напряжением 2 кВ – ☆ *;*

рабочее положение прибора вертикальное ⊥*.;*

класс точности – 1,0;

заводской номер прибора – 1190; выпущен в 1974 г.

Кроме того, на шкале могут быть нанесены сведения о наличии защитной изоляции, необходимости ориентации прибора относительно вектора внешнего магнитного поля, наличии в составе прибора принадлежностей, наличии магнитного либо электростатического экранирования, указания по монтажу и др.

Практическое задание

1. Выполнить контрольные задания для СРС по практической работе.
2. Для заданных преподавателем условий произвести выбор электроизмерительного прибора.

Рекомендуемая литература

1. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. – 526 с.
2. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие. – М.: «Дрофа», 2005. – 415 с.
3. Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К и др. Электрорадиоизмерения: Учебник для ВУЗов. – М.: Форум: Инфра-М, 2004. – 384 с.
4. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: Справочник: пер. с нем.: Под ред. Е.И. Сычева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Изучить способы обозначения класса точности для измерительных приборов.
2. Определить чувствительность и постоянную измерительного прибора.
3. Рассмотреть основные положения, используемые при выборе электроизмерительных приборов.
4. Изучить условные графические обозначения, наносимые на шкалу электроизмерительного прибора.

Семинар **№5**

Выбор средств технологического контроля и измерения

Цель работы: изучение основных принципов выбора технических средств систем технологического контроля и измерения, получение практических навыков выбора средств технологического контроля и измерения.

Общие сведения

Первоначальным этапом выбора технических средств систем технологического контроля и измерения является изучение заданного технологического процесса (установки) и составление его технологической схемы. С этой целью необходимо изучить описание данного технологического процесса (установки), отдельных его операций, применяемого оборудования. Особое внимание следует обратить на входные, выходные и промежуточные параметры процесса. В ходе изучения описания процесса (установки) необходимо получить чёткие представления об основных контролирующих и управляющих величинах, установить диапазон их изменения и рабочие значения, определить условия работы приборов и средств технологического контроля и измерения.

Только глубокое знание технологии производства, для которого разрабатывается система, позволяет обоснованно решать вопросы технологического контроля и измерения. В большинстве случаев система создаётся для действующего технологического процесса (установки) с известными технологическим регламентом, режимами работы и конструктивными особенностями, оснащением специальной аппаратурой, оборудованием и приборами. Все эти сведения подлежат тщательному анализу. На основе проведенного анализа определяют функциональное назначение создаваемой системы, критерии эффективности ее функционирования, число пунктов передачи и приема измерительной информации, их размещение, иерархию структуры системы – структурную схему.

При определении перечня информационных функций руководствуются следующим их распределением:

– измерение (непрерывное, периодическое и по вызову);

– оперативное отображение и регистрацию значений технологических параметров и показателей состояния оборудования;

– обнаружение, оперативное отображение, регистрацию и сигнализацию отклонений значений технологических параметров и показателей состояния оборудования от установленных пределов;

– контроль, отображение, регистрацию и сигнализацию срабатывания блокировок и защит [1,4].

Анализ существующих приборов и средств контроля и измерения

После изучения технологической схемы рассматриваемого процесса (установки) и его анализа производится анализ существующих промышленных приборов и технических средств контроля и измерения, применяемых в целях автоматизации данного технологического процесса (установки) и ему подобных (в той же либо смежных отраслях промышленности). Анализ выполняется, исходя из современного состояния развития технических средств, участвующих в заданном технологическом процессе. Особое внимание следует уделить анализу функциональных свойств и возможностей тех или иных технических средств контроля и измерения и оценке этих возможностей в соответствии с результатами предварительно произведённого анализа технологического процесса.

При анализе существующих приборов и технических средств контроля и измерения следует уделять внимание также степени их оснащённости современной элементной базой, уровню их надёжности, экономичности, полноте функциональных возможностей [2,3].

Формулирование основных требований к приборам и техническим средствам контроля и измерения

На основе проведённого анализа технологической схемы и существующих приборов и технических средств контроля и измерения, применяемых в данном технологическом процессе, формулируются основные требования, которые можно подразделить на следующие:

1. функциональные требования, включая технические характеристики;

2. требования, выдвигаемые физическими условиями работы (искро- и взрывобезопасность, вибростойкость, влагонепроницаемость, устойчивость к агрессивной среде и т.п.);

3. требования надежности и ремонтопригодности;

4. весовые и габаритные требования на всю систему в целом и отдельные её элементы (приборы и технические средства контроля и измерения);

5. требования инженерной психологии, связанные с недопустимостью ошибок при эксплуатации системы человеком, эргономически грамотная организация рабочего места оператора и т.п.

Следует иметь в виду, что условия окружающей среды в местах установки технических средств контроля и измерения определяют возможность их применения, особенность работы службы эксплуатации, а в отдельных случаях – работоспособность агрегатов, линий и производств.

Условия пожаро- и взрывоопасности объекта и агрессивности окружающей

среды, а также требования к быстродействию, дальности передачи сигналов измерительной информации и управления являются определяющими при выборе технических средств контроля и измерения по виду энергии носителя сигналов (электрической, пневматической, гидравлической и др.) в канале связи. Так, для пожаро- и взрывоопасных технологических процессов (установок) в большинстве случаев применяют средства пневматические и гидравлические; при высоких требованиях к быстродействию и значительных расстояниях между источниками и приемниками сигналов информации применяют, как правило, электрические и комбинированные технические средства контроля и измерения. Также необходимо ориентироваться на использование серийно выпускаемых приборов и средств контроля и измерения; при этом следует учитывать, что технические средства контроля и измерения общепромышленного применения предназначены для усредненных промышленных условий эксплуатации и не все они могут удовлетворять работе отдельных предприятий.

Следует стремиться к применению однотипных приборов и технических средств, предпочтительно унифицированных комплексов, характеризующихся простотой сочетания, взаимозаменяемостью и удобством компоновки на щитах автоматики. Использование однотипных (унифицированных) средств дает значительные эксплуатационные преимущества как с точки зрения их настройки, так и при техническом обслуживании и ремонте.

В проектируемые системы автоматизации необходимо закладывать технических средств контроля и измерения с тем классом точности, который определяется действительными требованиями технологического объекта. Как известно, чем выше класс точности средства измерения, тем более сложной является конструкция прибора, тем выше его стоимость, сложнее эксплуатация.

Количество приборов и технических средств контроля и измерения на оперативных щитах и пультах должно быть ограниченным. Излишек аппаратуры является не менее вредным, чем ее недостаток: усложняет эксплуатацию, отвлекает внимание обслуживающего персонала от наблюдений за основными приборами, определяющими ход технологического процесса, удлиняет сроки монтажных работ, увеличивает стоимость автоматизируемого объекта [1,2].

Выбор средств технологического контроля и измерения

Выбору средств технологического контроля и измерения предшествует определение необходимого состава и составления функциональной схемы системы технологического контроля и измерения для заданного технологического процесса (объекта), исходя из функциональных задач, которые должна выполнять система и конструктивных особенностей серийных приборов.

При составлении функциональной схемы системы технологического контроля и измерения средства измерения и контроля, электрические

устройства и элементы вычислительной техники необходимо показывать в соответствии с ГОСТ 21.404-85 и отраслевыми нормативными документами.

При определении состава функциональной схемы необходимо руководствоваться следующим:

а) определяются возможные варианты использования сигнала датчика. Информация от датчика (чувствительного элемента) может использоваться несколькими системами контроля и регулирования. В современных системах сигнал датчика часто вводится непосредственно в управляющую вычислительную машину. Это вызывает необходимость выбирать датчики с несколькими выходными преобразователями и комплектовать их первичными приборами с высокоомным усилителем;

б) анализируется возможность использования в системе единого сигнала связи (например, сигнала постоянного тока 4-20 мА). Если современные технические средства контроля и регулирования не дают возможности использовать единый сигнал связи по выбранному информационному каналу, то необходимо ввести в состав системы нормирующий преобразователь (например, преобразователь напряжения постоянного тока 4-20 мА в цифровой сигнал интерфейса RS-485);

в) определяется состав информационной аппаратуры (вторичных приборов, сигнальных устройств и др.), устанавливаемой по месту измерения и контроля, на операторском пульте, на местном щите управления и т.д.;

г) на основании характеристики условий работы проектируемой системы технологического контроля и измерения выбирается соответствующая ветвь промышленных приборов (электрическая, гидравлическая, пневматическая). Кроме того, необходимо учитывать эксплуатационную надёжность элементов системы в данной среде, возможность реализации системы с минимальными затратами, необходимое быстродействие, протяжённость каналов связи от датчика и до исполнительного механизма, используемый на данном предприятии или принятый в проекте род энергии и т.д.

После определения состава функциональной схемы можно приступить к выбору отдельных элементов (комплектованию системы) [1-3].

Рассмотрим подробнее выбор технических средств контроля и измерения на примере выбора датчика.

Пример. *Выбор датчика технологического параметра определяется физической природой этого параметра. При этом анализируются технические характеристики и возможности всего ряда датчиков, пригодных для измерения регулируемой (контролируемой) величины.*

В процессе выбора датчика в первую очередь необходимо учитывать характеристики контролируемой и окружающей сред (температуру, влажность, давление и т.д.), в которых придётся работать датчику. Также учитываются условия, в которых находится контролируемый параметр (в трубопроводах, в открытых ёмкостях под атмосферным давлением, в закрытых емкостях под избыточным давлением и т.д.). В зависимости от условий окружающей среды выбирают исполнение датчика (искробезопасное, тропическое и т.д.).

Диапазон действия датчика выбирается с учетом минимальных и максимальных длительных значений регулируемой величины. Здесь необходимо учитывать, что необоснованно завышенный диапазон действия датчика снижает точность контроля (измерения).

Погрешность датчика не должна превышать допустимой погрешности контроля (измерения) регулируемой величины, которая определяется технологией производства и погрешностью регулирования по выбранному каналу управления.

Датчик должен выбираться с учётом передачи сигнала в последующие элементы системы автоматизации. Это значит, что выходной сигнал датчика должен соответствовать сигналу связи, принятому в проектируемой системе. Число выходных сигналов датчика (количество выходных преобразователей) определяется принятым составом функциональной схемы автоматизации.

При выборе датчика необходимо установить возможность обеспечения условий для нормальной работы выбранного датчика, обеспечивающих паспортные параметры датчика в предлагаемом месте его установки. Так, например, для обеспечения нормальной работы диафрагменного расходомера объемного расхода необходимо иметь длину прямолинейного участка трубопровода 10 D до и 20 D после расходомера, где D – диаметр трубопровода. Для нормальной работы щелевого расходомера объемного расхода необходимо обеспечить перепад высот (уровней) трубопровода и т.д.

В ряде случаев следует учитывать электромагнитную (магнитную) совместимость датчика с другими элементами системы автоматизации и технологического оборудования.

Немаловажное значение имеет стоимость датчика, зависящая от сложности его изготовления, стоимости чувствительного элемента, протяженности необходимых линий связи и масштабов производства (крупносерийные изделия предпочтительнее).

Наконец, необходимо учитывать также фактор морального устаревания технических средств за промежуток времени между созданием проекта системы автоматизации и его воплощением, что вынуждает предъявлять более жесткие требования в отношении новизны и перспективности применяемых датчиков и других технических средств автоматизации [1,3,4].

Практическое задание

1. Выполнить контрольные задания для СРС по практической работе.
2. Для заданного преподавателем технологического объекта (производства) выбрать соответствующие датчики и средства технологического контроля и измерения. Выбор датчиков и средств технологического контроля и измерения обосновать.

Рекомендуемая литература

1. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справ.пособие / [А.С.Клюев, Б.В.Глазов, А.Х.Дубровский, А.А.Клюев]; Под ред. А.С.Клюева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.: ил.

2. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / В.Я.Баранов, Т.Х.Безновская, В.А.Бек и др.; Под общ. ред. В.В.Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 817 с.: ил.
3. Справочник по средствам автоматики / [Б.И.Филиппович, А.П.Шорыгин, В.А.Царьков и др.]; Под ред. В.Э.Низэ и И.В.Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.: ил.
4. Родионов В.Д., Терехов В.А., Яковлев В.Б. Технические средства АСУ ТП: Учеб.пособие для вузов / Под ред. В.Б.Яковлева. – М.: Высш.шк., 1989. – 263 с.: ил.

Контрольные задания для СРД [1-4]

1. Изучить основные требования, предъявляемые к приборам и средствам технологического контроля и измерения.
2. Изучить действия, необходимые при определении состава функциональной схемы системы технологического контроля и измерения.
3. Определить основные критерии, используемые при выборе датчиков.

5 Тематический план самостоятельной работы докторанта с преподавателем

Наименование темы СРДП	Цель занятия	Форма проведения занятия	Содержание задания	Рекомендуемая литература
Тема 1. Введение. Основные представления метрологии	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка ответов на контроль-ные вопросы по данной теме	[1, стр.7-30, 49-63; 2, стр.4-8, 21-23; 4, стр.6-13, 28-31; 6, стр.4-8, 21-24]
Тема 2. Классификация измерений	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[1, стр.30-38; 2, стр.8-11; 4, стр.21-23; 6, стр.8-11]
Тема 3. Погрешности измерений	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, решение задач	Подготовка ответов на контроль-ные вопросы и решение задач	[1, стр.65-92, 104-136; 2, стр.11-20; 4, стр.24-69; 6, стр.11-21]
Тема 4. Средства измерений	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[1, стр.38-49, 92-101; 2, стр.25-32; 4, стр.26-45; 6, стр.26-33]
Тема 5. Измерительные сигналы	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[1, стр.137-154; 4, стр.13-21, 134-138]
Тема 6. Измерение электрических величин	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[1, стр.176-214, 312-329; 2, стр.32-37; 4, стр.231-261; 6, стр.33-38]
Тема 7. Электро-механические приборы и преобразователи	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[1, стр.180-187; 2, стр.50-53; 4, стр.94-118 6, стр.51-55]
Тема 8. Электронные аналоговые измерительные приборы	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы по данной теме	[1, стр.189-196, 244-268; 2, стр.60-72; 4, стр.120-132, 172-211; 6, стр.62-73]
Тема 9. Цифровые	Углубление знаний по данной	Устный опрос, обсуждение	Подготовка докладов и	[1, стр.197-209, 269-271; 2, стр.72-86;

Наименование темы СРДП	Цель занятия	Форма проведения занятия	Содержание задания	Рекомендуемая литература
измерительные приборы	теме	докладов	ответов на контроль-ные вопросы	4, стр.134-154, 212-228; 6, стр.74-88]
Тема 10. Измерение неэлектриче-ских величин	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[2, стр.37-48; 6, стр.38-50; 7, стр.95-120, 143-204, 242-258]
Тема 11. Измерительные мосты	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы по данной теме	[1, стр.357-361; 2, стр.54-57; 4, стр.293-303; 6, стр.55-58]
Тема 12. Регистрирую-щие приборы и устройства	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[2, стр.86-91; 6, стр.88-93; 11, ст.199-214; 12, стр. 257-270]
Тема 13. Измерительные информацион-ные системы	Углубление знаний по данной теме	Устный опрос, обсуждение докладов	Подготовка докладов и ответов на контроль-ные вопросы	[1, стр.414-427; 2, стр.101-116; 4, стр.353-365; 6, стр.103-118]

Примечание – номер рекомендуемой литературы, указанной в квадратных скобках, проставляется согласно нумерации списка основной и дополнительной литературы, предлагаемой в рабочей учебной программе (см. п.1).

6 Материалы для контроля знаний студентов в период рубежного контроля и итоговой аттестации

6.1 Тематика письменных работ по дисциплине

Тематика рефератов и контрольных работ

1. Обзор развития и современное состояние метрологических средств
2. Основные методы и способы измерений
3. Способы уменьшения влияния случайной погрешности
4. Методы обнаружения и исключения систематической погрешности
5. Класс точности средств измерений
6. Условные графические обозначения, применяемые для средств измерений
7. Виды измерительных сигналов средств измерений
8. Восстановление сигнала по его дискретным значениям. Теорема Котельникова
9. Порядок расчета многопредельного шунта
10. Порядок расчета многопредельного делителя напряжения
11. Схемы включения электроизмерительных преобразователей и приборов
12. Виды электромеханических измерительных преобразователей
13. Применение электромеханических измерительных приборов
14. Современное состояние и перспективы развития электронно-лучевых осциллографов
15. Современное состояние и перспективы развития аналоговых комбинированных приборов
16. Современное состояние и перспективы развития цифровых вольтметров
17. Современное состояние и перспективы развития цифровых осциллографов. Скопметры и их применение
18. Параметрические измерительные преобразователи
19. Генераторные измерительные преобразователи
20. Термометры сопротивления
21. Термоэлектрические преобразователи
22. Тензометрические измерительные преобразователи
23. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи
24. Датчики-реле уровня поплавковые, емкостные, индуктивные, радиоизотопные, фотоэлектрические, акустические, мембранные и работающие на принципе проводимости
25. Классификация и применение электроизмерительных мостов
26. Магнитографы и их применение
27. Самопишущие приборы прямого преобразования и их применение
28. Измерительные информационные системы.
29. Измерительно-вычислительные комплексы
30. Интерфейсы ИИС

6.2 Вопросы (тестовые задания) для самоконтроля

1. Кратко охарактеризуйте основные этапы развития средств измерений.
2. Дайте определение терминам «измерение», «результат измерения», «погрешность измерения», «измерительный сигнал», «измерительная информация», «единство измерений».
3. Дайте определение терминам «способ измерения», «метод измерения», «принцип измерения». Кратко охарактеризуйте основные методы и способы измерений.
4. Охарактеризуйте основные виды погрешности измерений.
5. Опишите наиболее известные стандартные законы распределения погрешности.
6. Опишите основные способы уменьшения влияния случайных погрешностей на результаты измерений.
7. Опишите основные методы обнаружения и исключения систематической погрешности.
8. Дайте краткую характеристику основным классам средств измерений.
9. Какие характеристики называют метрологическими? В чем заключается их нормирование?
10. Какие показатели надежности средств измерений вам известны? Как они определяются?
11. Какие параметры измерительных сигналов называют информативными? Приведите пример преобразования сигналов измерительной информации.
12. Дать определение понятиям «дискретизация во времени» и «квантование по уровню». Чем обусловлено возникновение погрешности дискретности?
13. Опишите основные виды измерительных сигналов.
14. Опишите принцип действия, назначение и конструкцию электроизмерительных шунтов и добавочных резисторов.
15. Опишите принцип действия, назначение и конструкцию измерительных трансформаторов переменного тока.

6.3 Экзамены проводятся в форме письменного экзамена

16. Какие средства применяются для измерения электрической мощности? Приведите схемы их включения.
17. Опишите принцип действия, назначение и конструкцию основных видов электромеханических измерительных преобразователей.
18. Опишите принцип действия, назначение и конструкцию универсальных электронно-лучевых осциллографов.
19. Опишите функциональную структуру электронных аналоговых вольтметров.
20. Опишите схемотехнику электронных аналоговых омметров.
21. Дать краткую характеристику основных методов АЦП.
22. Какие помехи называют помехами общего вида? Какие помехи называют помехами нормального вида? Какими способы борьбы с ними вам известны?
23. Опишите структуру цифрового вольтметра двойного интегрирования.

24. Опишите обобщенную структуру цифрового осциллографа.
25. Опишите основные методы дискретизации во времени, применяемые в цифровых осциллографах.
26. На какой диапазон температуры рассчитаны манометрические термометры?
27. Опишите принцип действия термометра сопротивления.
28. В чем заключается термоэлектрический эффект термопары? Какие материалы используются для электродов термопар?
29. Опишите устройство стандартного термоэлектрического термометра. Какие способы применяют для уменьшения погрешности от влияния изменения сопротивления термопары и проводников при колебаниях температуры воздуха?
30. Опишите принцип действия и конструкцию основных типов пирометров излучения.
31. Для каких целей используются тягонапоромеры?
32. Какие замечательные свойства тензорезисторов и пьезоэлектриков (сегнетоэлектриков) вам известны?
33. Дайте характеристику современным измерительным преобразователям давления.
34. Какие виды уровнемеров и сигнализаторов уровня вы знаете? На каких принципах они работают? Какие из них могут быть применены для контроля уровня сыпучих материалов?
35. Сформулируйте условие равновесия одинарного моста постоянного тока?
36. Дайте характеристику основным классам измерительных мостов. Для чего они предназначены?
37. Опишите принцип действия и конструкцию самопишущего прибора прямого преобразования.
38. Опишите принцип действия, назначение и конструкцию измерительного магнитографа. Какие виды записи на магнитный носитель применяются в магнитографах?
39. Опишите обобщенную структуру измерительной информационной системы.
40. Кратко охарактеризуйте современные интерфейсы ИИС.