

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Институт оптики и оптических технологий

Кафедра метрологии и технологии оптического производства

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИБОРОВ

Новосибирск
СГГА

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1 Общие сведения о метрологии и измерениях

Метрология (*metrology*) - сфера деятельности и наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерение (*measurement*) - познавательный процесс, заключающийся в нахождении численного значения измеряемой величины (*of a measurand*) опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений.

Измеряемая величина (*measurand*) - величина, подлежащая измерению.

Величина (*quantity*)- свойство (атрибут) физического объекта (явления, вещества, изделия, биологического объекта), которое может определяться количественно.

Размер величины (*size of a quantity*) - количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию “величина”.

Значение величины (*value of a quantity*) - выражение размера величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Единица величины (*unit of a quantity*)- величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице.

Единство измерений (*traceability of a measurement*) - состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

Достижение единства измерений приводит к обеспечению взаимного доверия к результатам измерений вне зависимости от места их выполнения. Подобное состояние измерений приобретает особое значение для научного, технического и экономического сотрудничества и торговли, при разрешении спорных вопросов и претензий как внутри стран, так и на межгосударственном уровне. Не случайно поэтому первым межгосударственным соглашением в истории нашей планеты, подписанным 20 мая 1875 года, явилась Метрическая Конвенция, а первой межправительственной организацией - Международное Бюро Мер и Весов (МБМВ или в латинской аббревиатуре французского происхождения - ВМР).

Государственное управление по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляет «Государственное техническое регулирование» через Государственные научные метрологические центры (метрологические институты), территориальные органы государственного метрологического надзора, действующие во всех субъектах федерации, а также через метрологические службы юридических лиц, аккредитованные в установленном порядке.

Метрологическое обеспечение (*metrological assurance*) - установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и

норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, которые выполняются во всех без исключения сферах деятельности человека.

Метрологическое обеспечение отраслей науки и промышленности, экологического мониторинга, здравоохранения, торговли, контроля безопасности, вооружений и судебного производства заключается в выполнении следующих основных функций:

- разработка, изготовление и хранение государственных эталонов, воспроизводящих единицы измеряемых величин,
- осуществление международных сличений государственных эталонов, передача размеров единиц величин рабочим средствам измерений,
- разработка законодательных актов и нормативных документов в области метрологии и практических измерений, контроль за их исполнением,
- разработка и промышленный выпуск рабочих средств измерений,
- контроль за состоянием и сохранностью декларированных производителем метрологических свойств средств измерений, выпускаемых из производства, а также находящихся в эксплуатации или на хранении,
- выполнение рабочих измерений во всех сферах деятельности и в отраслях народного хозяйства,
- разработка методик выполнения измерений, включающих в себя методики оценки характеристик погрешностей результатов измерений, выполнение измерений, контроль за исполнением методик выполнения измерений.

Основные работы по метрологическому обеспечению, выполняемые в интересах государства, а именно, разработка и хранение государственных эталонов, фундаментальные исследования в области метрологии, разработка государственных нормативных документов, государственный метрологический надзор подлежат обязательному государственному финансированию. При разработке федеральных и иных государственных программ, в том числе, программ создания и развития производства оборонной техники в них должны быть предусмотрены разделы метрологического обеспечения.

К подобным программам относятся программы обеспечения всех видов безопасности населения по отношению к причинам техногенного, экологического, медицинского, преступного и иного характера.

1.2. Роль и значение измерений и метрологии в развитии общества

Измерение становится важным видом человеческой деятельности еще на раннем этапе развития торговли, строительства, землевладения и навигации. Этот этап начался задолго до наступления новой эры в древних царствах: ассиро-вавилонском и в Египте .

На ранних стадиях измерительный процесс заключался в простом счете количества содержания той или иной меры в измеряемой величине. Позднее, как свидетельствуют результаты многочисленных археологических исследований, под влиянием хозяйственной необходимости в древней Вавилонии, в древнем

Египте, не говоря уже о древней Греции и Риме, материальное обеспечение измерений заключалось в изготовлении и хранении мер, в основном, мер длины, объема и массы, а также в организации процесса сопоставления значения измеряемой величины с мерой. Тем не менее несмотря на сильное влияние стройной системы древнеегипетских мер, которая сложилась примерно в III веке до н.э, в разных государствах системы мер различались. Позже превалирующую роль начали играть системы мер, складывавшиеся в древней Греции и Риме, но до унификации мер было еще далеко, и при выполнении торговых операций это создавало значительные трудности, которые преодолевались специальными соглашениями о согласовании мер. Древним прототипом одной из задач современной законодательной метрологии была задача согласования этих мер. Кроме того осуществлялись и надзорные действия, имевшие целью предотвращение злоупотреблений при измерениях.

Насколько важными были во все времена вопросы обеспечения единства и правильности практических измерений, свидетельствует такой авторитетный источник, как Библия, где содержатся многочисленные указания об этом. Приведем лишь два из них.

“Гиря твоя должна быть точная и правильная, ... , чтобы продлились дни твои на Земле, которую Господь, Бог твой дает тебе” (Второзаконие, гл. 25, ст. 14).

“Неодинаковые весы, неодинаковая мера, то и другое - мерзость перед Господом” (Притчи Соломоновы, гл. 20, ст.10).

Вплоть до XV века надзор за единством и правильностью измерений, за сохранностью образцовых мер осуществляло духовенство. Образцовые меры находились на ответственном хранении в храмах, а для практического использования рассылались официальные копии этих мер с удостоверением их правильности. Наряду с этим существенную регулирующую роль в области измерений играли директивные акты руководителей государств. В частности, большое историческое значение для становления единства измерений в России сыграла деятельность князей Владимира (Устав о церковных судах, X век), Святослава Ярославича (“золотой пояс”, как мера длины, XI век), Всеволода Мстиславича (“Устав о церковных судах и о людех и о мерилах торговых” 1134 - 1135 г.г.), царей Ивана Грозного и Петра Великого. Так, князь Всеволод Мстиславич, как это ранее делал Владимир, поручал “блюсти ... мерила и спуды и звесы и ставила” высшим церковным иерархам, и наказывал им, чтобы они заботились о сохранности порученных мер, “якоже и о душах человеческих”.

Основная научная деятельность в области измерений и обеспечения их единства в период времени до XV века состояла в попытках сопоставления и гармонизации систем мер, применяемых в государствах, ведущих торговые отношения. Примером такой деятельности могут служить сопоставительные измерения, которые производил дьякон Игнатий в 1389 году в Иерусалимском храме и в храме близ Истры.

Среди выдающихся достижений в области практических измерений следует отметить угловые измерения, выполненные Улугбеком в своей гигантской обсерватории близ Самарканда. В результате этих измерений задолго до изобретения оптических линз Улугбеку удалось построить карту звездного неба с погрешностью, не превышающей одной угловой минуты.

Начиная с XVII - XVIII веков в связи с ускорением развития науки и техники и для удовлетворения растущих потребностей в измерениях номенклатура измеряемых величин и соответствующих мер начала расширяться в точном соответствии с известным высказыванием Г.Галилея “Измеряй все доступное измерению и делай доступным все недоступное ему”. Появилась необходимость в измерении температуры, давления, плотности, скорости, ускорения, магнитных, а затем и электрических величин. Стали совершенствоваться методики выполнения измерений, появились новые средства измерений, создание которых и методики их применения нуждались в существенной теоретической поддержке. В области измерений и метрологии в XVIII веке вели исследования М.В.Ломоносов, Г.В.Рихман (электрометр и принцип преобразования электрических величин в силу), Л.Эйлер (теория весов), И.Ньютон (исторические исследования древнеегипетских мер [7]), И.И.Ползунов (водяной манометр), А.К.Нартов (приборы для измерения механических величин) и многие другие. С другой стороны, совершенствование методов и средств измерений способствовало новым изобретениям и открытиям, ибо “каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить” (Кельвин). Среди многих известных примеров, подтверждающих это обстоятельство, можно назвать нормальную плотность распределения случайных величин, выведенную Гауссом на основе анализа разброса результатов многократных измерений, что явилось началом теории вероятностей, закон движения планет и закон земного притяжения, полученные Кеплером по результатам измерений траекторий планет, периодический закон Д.И.Менделеева, установленный им по результатам измерения масс атомов химических элементов, открытие Н.Бором “тяжелой воды” на основе точных измерений плотности воды, опыты и открытия Майкельсона, по результатам которых были развиты новые науки: спектроскопия и волновая оптика, эксперименты Ампера, Вольты, Кулона и многие другие.

Замечательным примером использования естественного измерительного прибора может служить предсказание Адамса и Леверье в 1845 году и последующее обнаружение астрономом Галле в 1846 году в предсказанном месте планеты Нептун по результатам точных измерений отклонения орбиты Урана от теоретической траектории. Роль измерительного прибора выполняла солнечная система, роль стрелки или индикатора - орбита Урана. Математической моделью служила совокупность расчетных орбит известных в то время планет.

Отмеченный выше значительный подъем науки и техники в XVIII потребовал усовершенствования и гармонизации системы мер. С этой целью в России в 1736 году была образована Комиссия об учреждении весов и мер под председательством графа М.Г.Головкина. Экспериментальной базой этой Комиссии

служила лаборатория А.К.Нартова. В завершение этого столетия во Франции была создана метрическая система мер, принятая в настоящее время в большинстве стран. В дальнейшем XIX и XX столетия ознаменовались радикальным продвижением в направлении к унификации мировой системы мер. В 1842 году в России было создано Депо образцовых мер и весов во главе с академиком А.Я.Купфером, которое затем было преобразовано в Главную палату мер и весов, ныне - ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. С 1892 по 1907 год Главную палату мер и весов возглавлял Д.И.Менделеев. В 1875 году было образовано Международное бюро мер и весов (МБМВ) - первая среди всех международных организаций на нашей планете. В этом же году первые 17 стран и среди них - Россия подписали Международную метрическую конвенцию. В настоящее время эта конвенция подписана уже 48 странами.

Фантастическое ускорение научно - технического прогресса в XX веке и связанные с этим не всегда удовлетворяющиеся потребности в измерениях вызывают повышенный интерес к развитию методов и средств измерений, ибо “новые средства измерений знаменуют собой настоящий прогресс” (Б.С.Якоби, 1857 г.). Предназначение теории измерений в этой ситуации - теоретическое обеспечение создания новых средств измерений, разработка прогрессивных методов выполнения измерений и обработки результатов, разработка эталонов на новых физических принципах, опирающихся на физические константы, расширение номенклатуры величин, поддерживаемых эталонами.

1.3. Современное состояние измерительных информационных технологий

За истекший XX век стремительно расширилась номенклатура величин, в измерении которых нуждались фундаментальные и прикладные науки, промышленность, медицина, торговля. По данным АН СССР, уже в 1970 году перечень величин, подлежащих измерениям в науке, народном хозяйстве и в социальных сферах, содержал более 2000 наименований. Менее чем за два предшествующих столетия измерения, методы измерений и измерительные инструменты прошли путь развития от простейших измерений длины (строительство, землепользование), массы, объема (торговля), углов (навигация, астрономия) к измерению электрических величин (заряд, сила тока, напряжение) и далее в течение XX века - до сложнейших *измерительных информационных технологий*, в которых используются последние достижения физики и самые совершенные средства вычислительной техники: от микропроцессоров до компьютерных сетей.

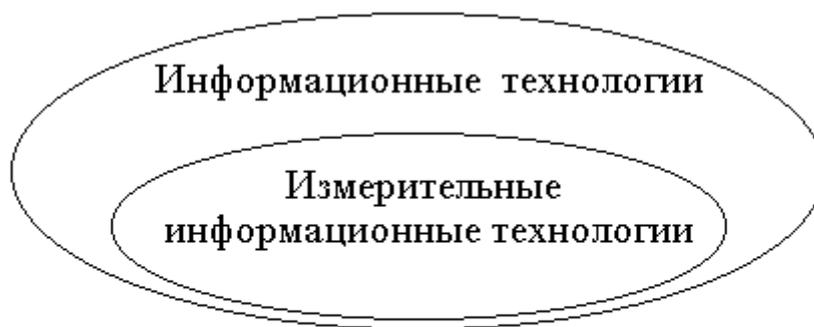


Рис. 1. Измерительные информационные технологии в группе информационных технологий

Измерительная информационная технология - (*measuring information technology*) - технология подготовки и выполнения измерений, включающая в себя описание приемов осуществления информационного взаимодействия средств измерений с объектом, а также методов получения, обработки, представления и передачи количественной информации о значениях измеряемых величин и обеспечивающая требуемую достоверность и сохранность этой информации.

Современные измерительные информационные технологии (ИИТ) являются подмножеством информационных технологий (см. рис. 1). Специфическими признаками, выделяющими ИИТ из общего многообразия информационных технологий, являются:

- ярко выраженные познавательные цели и функции,
- получение первичной информации в результате специально организованного физического взаимодействия с объектом,
- особая ответственность за достоверность измерительной информации, возложенная действующим законодательством.

Продукцией ИИТ являются результаты измерений, которые “поставляются” для использования в иных информационных технологиях в качестве исходной информации.

На рис. 2 в укрупненном виде представлено функционирование (поведение) любой технической, управленческой, социальной или биологической системы, как последовательность операций, первой среди которых является получение первичной информации от объекта в результате информативного взаимодействия с ним. Конкретная форма, в которой исполняется эта первая операция в той или иной сфере деятельности, различна. При научных исследованиях, при разработке, производстве и эксплуатации промышленных

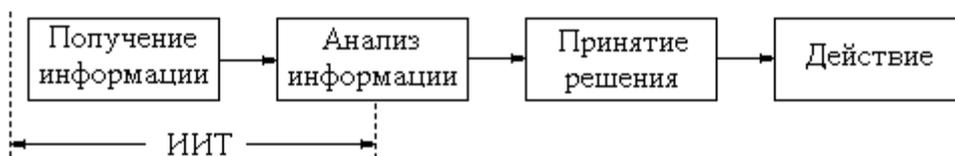


Рис.2. Место ИИТ в технических системах управления, в испытаниях продукции, в экологическом мониторинге, в медицинской диагностике и других сферах деятельности.

объектов, технических средств, транспорта, систем управления, при экологическом мониторинге, во многих других сферах первой операцией являются измерения. В поведении человека или иной биологической системы источником первичной информации являются органолептические измерения, в армии - разведывательные действия, в социальных и государственных системах - социологический опрос. Понятно, что конечный результат действий в сильной степени зависит от качества информации, получаемой на первом этапе, поэтому к ней должны предъявляться весьма высокие требования.

Обеспечение взаимного доверия к результатам измерений в таких сферах, как торговля, экология, научно-техническая кооперация, Интерпол, является важнейшим фактором для развития международного сотрудничества. Решение этой задачи в масштабе планеты достигается, благодаря созданию, совершенствованию, хранению и международному сличению государственных эталонов, разработке единых правил и норм выполнения измерений. Эти задачи решаются на основе межправительственных соглашений под методическим руководством международных метрологических организаций, среди которых в первую очередь следует назвать Международное Бюро Мер и Весов (МБМВ, создано 20 мая 1875 года в день подписания метрической конвенции) и Международную Организацию Законодательной Метрологии (МОЗМ, создана в 1963 году). Деятельность этих организаций поддерживается международной организацией по стандартизации (ИСО). С ними тесно сотрудничает Международная Электротехническая Комиссия (МЭК). Кроме этих глобальных организаций созданы и действуют региональные организации на территориях Европы, Северной Америки, Азии и других континентов.

1.4. Номенклатура основных величин, подлежащих измерениям в электротехнике, электроэнергетике и электронике

В электротехнике, электроэнергетике и электронике измерению подлежат:

- все электрические величины (сила тока, напряжение, параметры переменного тока и напряжения, электрические мощность и энергия, поверхностный и объемный электрический заряд, электрические характеристики материалов, параметры электрических, магнитных и электромагнитных полей, параметры

электрических цепей - сопротивление, индуктивность, емкость, и многие другие),

- состав и свойства электротехнических и других материалов,
- температура от 4°К до 2000°К и выше,
- масса, сила, деформации, моменты вращения и торможения,
- давление, скорость и расход жидкостей и газов,
- параметры вибраций (виброперемещения, виброскорость и виброускорение),
- скорость вращения,
- линейные и угловые перемещения,
- уровень и доза радиации,
- акустические величины,
- параметры окружающей среды, влияющие на безопасность жизнедеятельности работников,
- параметры промышленных выбросов, подлежащие экологическому мониторингу,

и многое другое в широком диапазоне изменения измеряемых величин при разнообразных рабочих условиях эксплуатации оборудования.

1.5. Номенклатура параметров среды жизнедеятельности, подлежащих измерениям

Перечень параметров среды жизнедеятельности, подлежащих измерениям, заимствован из справочника “Метрологическое обеспечение безопасности труда” (В 2 томах, ред. И.Х.Сологян, М.: Издательство стандартов, 1998, 1999 г.) и приводится в таблице 1.

Таблица 1

Параметры среды жизнедеятельности, подлежащие измерениям

Наименование параметра, подлежащего Измерению	Диапазон измерения	Требования к точности
<u>1. Параметры электрического тока, напряжения, электрического и магнитного полей</u>		
1.1. Постоянное напряжение В длит-сть воздействия 1 с длит-сть воздействия 0,1 с	40 (допуст. уров.) 650 (допуст. уров.)	(0.5÷1.5) %
1.2. Переменное напряжение, 50 Гц (действ.знач.) В длит-сть воздействия 1 с	36 (допуст. уров.) 650 (допуст. уров.) 0.015 (до-	- “ - - “ - - “ -

1.3.	длит-сть воздействия 0,1 с Постоянный ток	пуст.уров.) 0.006	(до-	- “ - (10÷20)%
А		пуст.уров.)		(10÷20)%
1.4.	Переменный ток , частота 50 Гц	0.3 - 2500		(5÷10)%
А		0 - 1600		3%
1.5.	Напряженность электростатического поля	0 - 2.0		
кВ/м				5%
1.6.	Напряженность магнитного поля,	0 ÷ 1000		5%
кА/м		0 ÷ 1000		5%
1.7.	Индукция магнитного поля	0 ÷ 1000		5%
Тл		0 ÷ 1000		5%
1.8.	Напряженность электромагнитного поля	0 ÷ 1000		5%
кВ/м				
	частота $f < 50$ Гц	0 ÷ 0.1		(3÷5)%
	$50 \leq f < 1000$ Гц	0 ÷ 3		(3÷5)%
	$1000 \leq f < 12000$ Гц			
	$12000 \leq f < 60000$ Гц	0 ÷ 110		0.5
	$0.06 \leq f < 300$ МГц	0 ÷ 110		0.5
<u>2. Параметры вибрации</u>		0 ÷ 110		0.5
2.1.	Среднеквадр. значение виброскорости			
м/с		10 ÷ 30		0.5
2.2.	Среднеквадр. значение виброускорения			
м/с ²		40 ÷ 60		5
		(0.8 ÷ 1.3)·10 ⁵		2·10 ²
<u>3. Параметры шума</u>		0 ÷ 5		0.1
3.1.	Звуковое давление инфразвука $2 \leq f < 40$ Гц			
дцБ				
3.2.	Звуковое давление звука $40 \leq f < 8000$ Гц			
дцБ				
3.3.	Звуковое давление ультразвука			
дцБ				
<u>4. Параметры атмосферного воздуха</u>				
4.1.	Температура			
°С				
4.2.	Относительная влажность			
%				
4.3.	Давление воздуха			
Па				
4.4.	Скорость движения воздуха			
м/с				

Продолжение таблицы 1

Наименование параметра, подлежащего Измерению	Диапазон измерения	Требования к точности
4.5. Пылевой фактор мг/м ³	0 ÷ 10 Зависит от вида газа	25%
4.6. Концентрация токсичных газов		5%
<u>5. Параметры излучений</u>		
5.1. Интенсивность теплового излучения Вт/м ²	10 ÷ 1000 0 ÷ 500	(10 ÷ 0)%
5.2. Излучения оптического диапазона Вт/м ²	0 ÷ 4000 0 ÷ 3000	<10% <5%
в том числе: яркость видимого света Кд/м ²	(0.01 ÷ 10 ⁷) (10 ² ÷ 10 ⁶)	25% 50%
освещенность видимым светом лк	1 ÷ 500 10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻²	(15 ÷ 50)%
5.3. Ионизирующие излучения Р/час	10 ⁻² ÷ 10 ³	15%
5.4. Аэроионизация 1/см ³		20%
5.5. Инфракрасная радиация Вт/м ²		
5.6. Ультрафиолетовая радиация Вт/м ²		
5.7. Лазерное излучение лк		
5.8. Опасные факторы взрыва и пожара		

Методы и средства измерений, допускаемые нормы параметров устанавливаются стандартами Системы Стандартов Безопасности Труда (ССБТ, обозначение стандартов этой системы: ГОСТ 12.X. XXX “ССБТ. Название стандарта”), стандартами Государственной Системы обеспечения единства измерений (ГСИ, обозначение стандартов этой системы: ГОСТ 8.XXX “ГСИ. Название стандарта”), стандартами на объекты промышленности, продукцию, виды работ.

1.6. Средства измерений, разновидности

Качество выполняемых измерений в значительной степени определяется качеством применяемого технологического оборудования и корректностью его использования в измерительных технологиях.

Используемое технологическое оборудование:

- измерительные инструменты - средства измерений - основное оборудование,

- вспомогательное оборудование, в том числе, средства вычислительной техники - компьютеры, процессоры, микропроцессоры, периферийные устройства.

Средство измерений (*measuring instrument*) - техническое средство, предназначенное для выполнения измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Метрологические характеристики (*metrological characteristics*) - характеристики свойств средств измерений, оказывающих влияние на результаты и погрешности измерений.

Качество основного технологического оборудования - средств измерений определяется его метрологическими характеристиками, их сохранностью во времени и независимостью от действия внешних влияющих факторов.

Средства измерений подразделяются на следующие 4 вида.

Мера (*material measure*) - средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины одного или нескольких заданных размеров с нормированной точностью.

Однозначная мера - мера, воспроизводящая физическую величину одного размера. Например, гиря, стержень длиной 1 метр, нормальный элемент, катушка сопротивления размером 1 Ом, стандартный образец двухкомпонентного вещества (газа, жидкости, сплава).

Многозначная мера - мера, воспроизводящая одну физическую величину нескольких размеров. Например, набор гирь разной массы, магазин сопротивлений.

Стандартный образец - средство измерения в виде вещества (материала), состав или свойство которого установлены при аттестации.

Калибратор - многозначная мера, как правило, допускающая управление от компьютера.

Измерительный прибор (*measuring instrument*) - средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой величины в форме, доступной для непосредственного восприятия оператором.

Аналоговые и цифровые измерительные приборы отличаются видом представления (индикации) значений измеряемой величины. Множество значений, которые представляет индикатор аналогового прибора, - непрерывно. Самыми распространенными аналоговыми измерительными приборами являются стрелочные измерительные приборы, в которых отсчет значения измеряемой величины осуществляется по взаимному положению стрелки (или иного указателя) и материальной шкалы. При этом чаще всего подвижная стрелка перемещается относительно неподвижной шкалы. Иногда подвижной является шкала, а стрелка (указатель) неподвижна. В некоторых аналоговых приборах (например, ртутных термометрах) значение измеряемой величины преобразуется в длину визуально фиксируемого отрезка, снабженного шкалой.

Индикатор цифрового прибора является цифровым и представляет результаты измерений в единицах измеряемой величины из дискретного множества значений, разделенных, как правило, одинаковыми интервалами, называемыми *интервалами квантования*. Ширина интервала квантования есть не что иное, как погрешность округления, и обратно пропорциональна количеству разрядов кода (как правило, десятичного), применяемого в конкретном приборе.

Измерительный преобразователь (measuring transducer) - средство измерений, предназначенное для взаимнооднозначного преобразования *сигнала измеряемой величины* или *сигнала измерительной информации*, действующего на входе преобразователя, в выходной сигнал, удобный для дальнейших преобразований, обработки, передачи и (или) хранения.

Сигнал измеряемой величины - изменяющаяся во времени измеряемая величина. Сигнал измеряемой величины - частный случай сигнала измерительной информации.

Сигнал измерительной информации - сигнал, функционально взаимно однозначно связанный с сигналом измеряемой величины.

Выходной сигнал измерительного преобразователя не может быть непосредственно воспринят оператором без применения индикатора.

Датчик (сенсор, первичный измерительный преобразователь) - измерительный преобразователь, на который непосредственно действует измеряемая величина. Под действием измеряемой величины датчик вырабатывает сигнал измерительной информации, то есть сигнал, функционально взаимнооднозначно связанный с сигналом измеряемой величины.

Измерительными преобразователями кроме датчиков являются усилители, фильтры (вторичные измерительные преобразователи), коммутаторы, преобразователи непрерывных (аналоговых) величин в цифровой код (*аналого-цифровые преобразователи*, АЦП), преобразователи цифрового кода в аналоговый сигнал тока или напряжения (*цифроаналоговые преобразователи*, ЦАП).

Примеры измерительных преобразователей: термopара, измерительный трансформатор, измерительный усилитель, термометр сопротивления, датчики давления, параметров вибраций, скорости газа и пр.

Измерительная информационная система (measuring information system) - средство измерений, предназначенное для измерения нескольких однородных или неоднородных величин и представляющее собой совокупность датчиков, измерительных преобразователей и вспомогательных устройств, функционирующих, как единое целое.

Типовая структура современных измерительных информационных систем (ИИС) представлена на рис. 3.

Обычно ИИС состоит из нескольких (до нескольких тысяч) измерительных каналов. Каждый канал представляет собой последовательное соединение измерительных преобразователей, первым из которых является датчик. С помощью коммутатора, управляемого от процессора, сигналы измерительной информации каждого из каналов поочередно подключаются на вход АЦП, на вы-

ходе которого при каждом таком подключении формируется числовой эквивалент значения соответствующей измеряемой величины, как правило, в двоичном коде. Полученные таким образом числа передаются в компьютер (или в

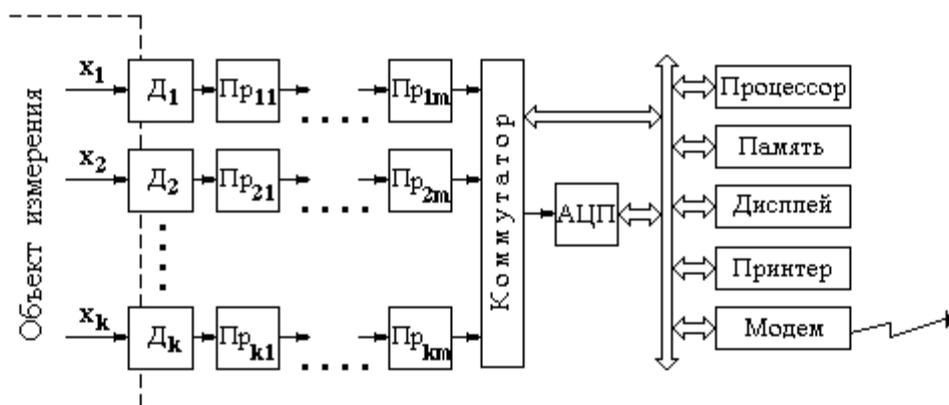


Рис. 3. Типовая структура современных измерительных информационных систем

процессор), где выполняется сопоставление каждого из этих чисел со шкалой соответствующей измеряемой величины, представленной в компьютере в том же коде. В результате этого сопоставления формируются значения измеряемых величин в их единицах и тем самым выполняется прямое измерение. Последующие операции (математическая обработка, хранение, передача, визуализация результатов измерений) выполняется в соответствии с целями эксперимента компьютером и иными средствами, входящими в состав системы.

Многие современные ИИС строятся на базе компьютерных сетей. Диспетчеризация работы таких распределенных ИИС и обмен информацией выполняются с помощью сетевого программного обеспечения и средств межмашинной связи (телефонные каналы, радиоканалы, оптоволоконные линии связи, каналы спутниковой связи и другие). Для соединения с этими каналами предусматривается соответствующий модем.

1.7. Характеристики качества результатов измерений

Результат любого измерения отличается от истинного значения измеряемой величины в силу следующих причин:

- несовершенство средств измерений,
- некорректное применение средств измерений, в результате которого могут изменяться свойства объекта,
- воздействие на средство измерений разнообразных мешающих факторов, называемых *влияющими величинами*.

Влияющая величина (*influence quantity*) - величина, оказывающая влияние на результаты и на погрешности измерений, но не являющаяся измеряемой.

Предположим вначале, что измеряемая величина не изменяется во времени, а ее истинное значение есть x . Пусть \tilde{x} результат измерения, тогда разность $\Delta x = \tilde{x} - x$ есть *абсолютная погрешность результата измерений*.

Истинное значение измеряемой величины, конечно, неизвестно. Поэтому в последующем тексте этот термин используется в качестве модельного понятия, которое участвует в описании математической модели измерений и погрешностей измерений.

Абсолютная погрешность результата измерений (*absolute error*) - разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины, выражается в единицах измеряемой величины.

Значение абсолютной погрешности не может быть определено в виде числа из-за того, что истинное значение x измеряемой величины неизвестно. По этой причине результат каждого измерения содержит неустранимую неопределенность значения измеряемой величины, и поэтому на практике может идти речь только об оценке каких-либо характеристик погрешности измерений, но не значений погрешности. Наиболее распространенной характеристикой погрешности является интервал (Δ_H, Δ_B) , ограниченный предельными или предельно допускаемыми значениями. Обычно принимают $\Delta_H = -\Delta_B = -\Delta_X$, то есть считают этот интервал симметричным относительно нуля: $(-\Delta_X, \Delta_X)$.

В общем случае погрешность измерения Δx может содержать систематическую и случайную составляющие.

Систематическая составляющая погрешности, систематическая погрешность) - погрешность, значения которой остаются неизменными при повторных измерениях одной и той же неизменной измеряемой величины в одинаковых условиях.

Случайная составляющая погрешности, случайная погрешность - погрешность, значения которой изменяются случайным образом при повторных измерениях одной и той же неизменной измеряемой величины в одинаковых условиях.

При многократном измерении величины, истинное значение которой равно x , результаты измерений будут попадать на ось с различной плотностью, которая будет определяться характером случайной составляющей погрешности. Обычно с наибольшей плотностью результаты измерений группируются вблизи значения $x + \Delta_c$, где Δ_c - систематическая составляющая погрешности измерений. В этом случае вид кривой, описывающей плотность распределения результатов измерений, будет иметь колоколообразный вид, как это показано в правой части рис. 4 а. Пусть \tilde{x} - один из результатов измерений. В соответствии с определением абсолютной погрешности мы можем заключить, что форма плотности распределения $\Delta x = \tilde{x} - x$, представленной в левой части рис. 4 а, должна повторять форму плотности распределения результатов измерений. Тогда можно назначить такие границы $(-\Delta_X, \Delta_X)$, чтобы интервал, лежащий между ними содержал сумму обеих составляющих погрешности с вероятностью P_0 . Этот

интервал представлен графически в левой части рис. 4 а, а его математическая запись имеет вид:

$$P(-\Delta_X \leq \Delta x \leq \Delta_X) = P_0,$$

где Δ_X есть не что иное, как характеристика общей абсолютной погрешности результата измерения, $P(\bullet)$ - вероятность события, обозначенного в скобках.

В этой ситуации из правой части рис. 4 а видно, что по результату \tilde{x} однократного измерения об истинном значении измеряемой величины можно заключить, что с этой же вероятностью оно находится в пределах $(\tilde{x} - \Delta_X, \tilde{x} + \Delta_X)$, то есть

$$P(\tilde{x} - \Delta_X \leq x \leq \tilde{x} + \Delta_X) = P_0.$$

Если при измерениях существует возможность определить систематическую погрешность и внести в результат поправку на нее, то интервалом неопределенности достаточно характеризовать только случайную составляющую, как это показано на рис. 4 б. В этом случае ширина интервала, содержащего погрешность, уменьшается. Интервал неопределенности истинного значения измеряемой величины определяется выражением

$$P(\tilde{x} - \Delta_c - \Delta_X \leq x \leq \tilde{x} - \Delta_c + \Delta_X) = P_0.$$

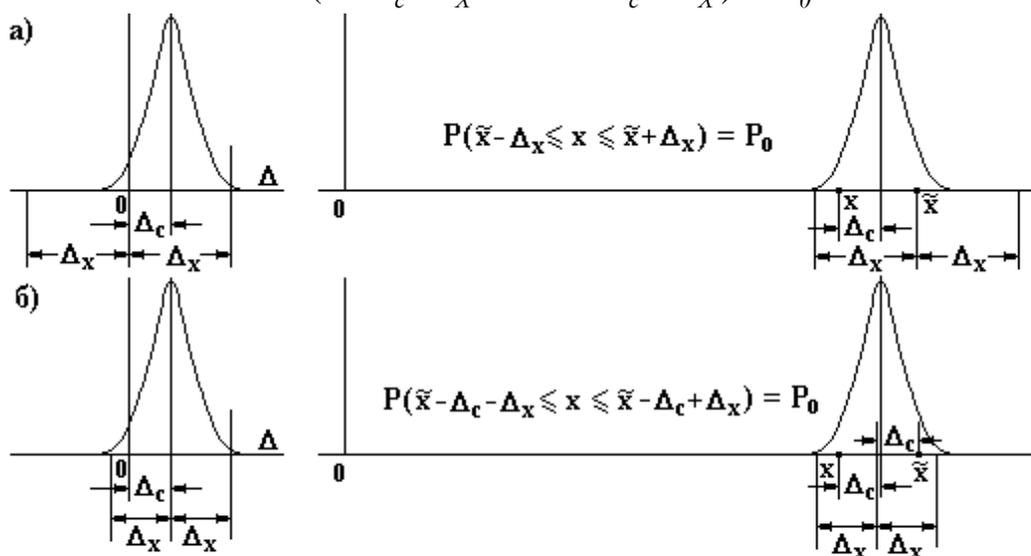


Рис.4. Интервалы неопределенности погрешности (слева) и истинного значения измеряемой величины (справа)

Однако, точное определение систематической погрешности невозможно, и после ее исключения всегда остается неисключенная часть систематической погрешности. Если предельное значение модуля неисключенной систематической погрешности обозначить через Δ_c , то тогда и после введения поправки на систематическую погрешность интервал неопределенности результата измерения будет определяться так, как показано на рис. 4 а, где в этом случае Δ_c - это предельное значение модуля неисключенной систематической погрешности измерений, которое входит в характеристику Δ_X общей погрешности измерений.

Итак, если погрешности имеют случайный характер, то этому интервалу сопоставляется вероятностная мера P_0 , близкая к единице (от 0.8 до 0.95). Именно такая трактовка характеристики погрешности измерений содержится в определении термина “единство измерений”, которое приведено выше в п. 1.1.

Повторим еще раз, что указанная интервальная характеристика погрешности результата измерения есть не что иное, как интервальная характеристика остаточной неопределенности значения измеряемой величины.

Характеристика погрешности Δ_x есть основная характеристика качества результата измерения и остаточной неопределенности значения измеряемой величины. Результат каждого измерения должен сопровождаться оценкой этой характеристики.

Форма выражения характеристики погрешности может быть двоякой: в виде предельного значения Δ_x абсолютной погрешности, либо в виде предельного значения γ_x относительной погрешности, где $\gamma_x = \Delta_x/x$.

Относительная погрешность результата измерений (relative error)- отношение абсолютной погрешности результата измерений к истинному значению измеряемой величины, выражается в относительных единицах или в процентах.

Поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно, относительная погрешность вычисляется по отношению к результату измерения. Покажем, что такая замена в большинстве случаев допустима, ибо она приводит к изменению значения погрешности на величину второго порядка малости по сравнению с погрешностью:

$$\begin{aligned} \gamma_x &= \frac{\Delta x}{\tilde{x}} = \frac{\Delta x}{x + \Delta x} = \frac{\Delta x}{x} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)} = \frac{\Delta x}{x} \left(1 - \frac{\Delta x}{x} + \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 - \dots\right) = \\ &= \frac{\Delta x}{x} - \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \dots \approx \frac{\Delta x}{x} \end{aligned}$$

2. Метрологические структурные схемы измерений, режимы измерений

Цели составления метрологических структурных схем измерений:

- анализ причин возникновения погрешности результата измерений
- получение расчетных формул для оценки характеристик погрешности результатов измерений.

В настоящем разделе рассматриваются метрологические структурные схемы измерений в статическом и динамическом режимах.

Статический режим измерений - режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины и инерционностью средств измерений, пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

Динамический режим измерений - режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины, существенны по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

2.1. Режим измерений - статический, прямые измерения

2.1.1. Общая метрологическая структурная схема

На рис. 8. приведена метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме для общего случая применения нелинейных средств измерений.

Данная схема пригодна для анализа измерений, выполняемых как аналоговыми, так и цифровыми средствами измерений, в том числе, отдельными измерительными каналами ИИС,

На рис. 8 обозначено:

x - истинное значение измеряемой величины,

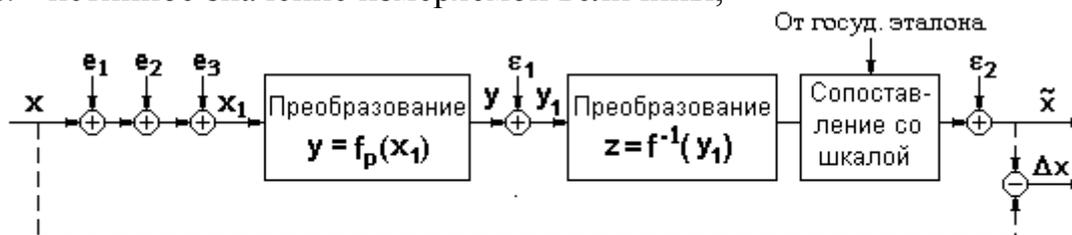


Рис.8. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме

e_1 - погрешность, вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям (см. также пп. 2.1),

e_2 - погрешность, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом (см. п.2.2),

e_3 - погрешность, вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами,

$y = f_p(x)$ - реальная фактическая функция преобразования конкретного экземпляра средства измерения,

$y = f(x)$ - номинальная функция преобразования, декларированная для средств измерений данного типа,

$x = f^{-1}(y)$ - функция, обратная функции $y = f(x)$,

ε_1 - собственная погрешность преобразования средства измерения, вызванная дрейфом выходного сигнала преобразователя, собственными тепловыми шумами и помехами,

ε_2 - погрешность, состоящая из погрешности реализации обратной функции $x = f^{-1}(y)$, погрешности воспроизведения шкалы и погрешности сопоставления со шкалой, в том числе погрешности округления, выполняемого оператором при отсчете показаний аналогового прибора, или вызванного конечной разрядностью цифрового прибора или аналого-цифрового преобразователя,

\tilde{x} - результат прямого измерения величины x ,

Δx - погрешность результата измерения, $\Delta x = \tilde{x} - x$.

Различие между функциями $y = f_p(x)$ и $y = f(x)$ вызвано неточностью воспроизведения функции $y = f_p(x)$ из-за погрешностей изготовления и старения комплектующих изделий, из-за воздействия внешних влияющих факторов, а также из-за разброса на множестве экземпляров средств измерений. Разность между этими функциями обозначим через $\Delta f(x) = f_p(x) - f(x)$. Эта разность случайна на множестве экземпляров средств измерений одного типа, и в целях обеспечения надлежащего метрологического качества должна быть ограничена пределами допускаемых различий $(-\Delta_f, +\Delta_f)$ между этими функциями для всех значений измеряемой величины из диапазона измерения:

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f.$$

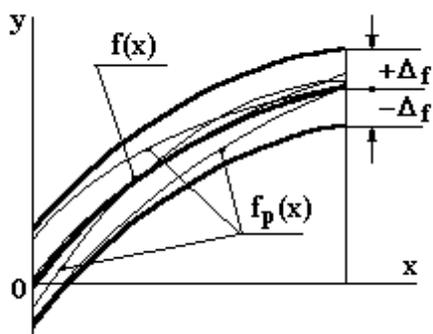


Рис.9. Пример области допускаемого разброса функций преобразования средств измерений одного типа

Это неравенство ограничивает область, в которой должны находиться функции преобразования всех средств измерений, признаваемых пригодными к применению. Пример такой области приведен на рис. 9.

Значение Δ_f должно быть указано в технической документации на средство измерений.

Естественными требованиями, предъявляемыми к функциям преобразования средств измерений, являются

требования монотонности (а, следовательно, взаимной однозначности преобразования) и гладкости, то есть ограниченности модуля производных. Однако, с другой стороны, производная функции преобразования - это *чувствительность* средства измерений:

$$S = df_p(x) / dx \cong df(x) / dx. \quad (1)$$

Близость производных функций $y = f_p(x)$ и $y = f(x)$ можно выразить неравенством

$$\left| \frac{f'_p(x)}{f'(x)} - 1 \right| \leq \delta$$

где значение $\delta > 0$ и имеет один порядок величины с собственной относительной погрешностью средства измерений.

Для удобства дальнейших рассуждений обозначим:

$$e = e_1 + e_2 + e_3. \quad (2)$$

Тогда, пользуясь схемой рис. 8, запишем выражение для абсолютной погрешности результата прямого измерения, выполняемого подобным средством:

$$\Delta x = f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) + \varepsilon_2 - x$$

и перегруппируем слагаемые:

$$f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) = \Delta x + x - \varepsilon_2.$$

В силу монотонности функции $f(x)$ это выражение равносильно следующему:

$$f_p(x + e) + \varepsilon_1 = f(x + \Delta x - \varepsilon_2),$$

Применим разложение функций в степенной ряд относительно точки x и воспользовавшись малостью погрешностей, оставим только первые и линейные члены этих рядов. Тогда после перегруппировки слагаемых получим:

$$f'(x) \cdot \Delta x = f_p(x) - f(x) + f'_p(x) \cdot e + f'(x) \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_1.$$

Производная $f'(x)$ номинальной функции, то есть чувствительность средства измерений не должна быть равна нулю, поэтому мы имеем право разделить обе части последнего равенства на $f'(x)$:

$$\Delta x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \varepsilon + e, \quad (3)$$

где $\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2$ - собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений.

Первое и второе слагаемые, находящиеся в правой части равенства (3), порождены собственными свойствами средства измерений, поэтому сумма

$$\Delta_{инст} x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2 \quad (4)$$

называется *инструментальной составляющей абсолютной погрешности* или *инструментальной погрешностью*. При выпуске средства измерений из произ-

водства, при его транспортировании, хранении и эксплуатации инструментальная погрешность не должна превышать (может быть, с некоторой вероятностью) некоторого заранее установленного значения Δ_x . Значение Δ_x нормы погрешности $\Delta_{инст}x$, устанавливается при проектировании средства измерений и сообщается пользователю в сопроводительной технической документации. Процесс установления нормы на инструментальную погрешность называется *нормированием характеристики инструментальной погрешности средства измерений*. Норма погрешности Δ_x в соответствии с определением, приведенным в п. 1.5, является метрологической характеристикой средства измерений. Ответственность за инструментальную погрешность несет разработчик и производитель средства измерений.

Последнее слагаемое в правой части равенства (3) порождено причинами, возникающими при применении средства измерений, а именно, взаимодействием с объектом, неадекватностью принятых математических моделей измеряемой величины и объекта, пульсациями и помехами, источником которых является объект. Это слагаемое составляет *различие между погрешностями средства измерений и погрешностями результата измерений*, и за него несет ответственность пользователь средства измерений.

Поэтому в дальнейшем будем называть погрешность $e = e_1 + e_2 + e_3$ *погрешностью применения* средства измерений. Оценку характеристики погрешности применения для конкретных условий выполняет пользователь средства измерений. Норма на эту погрешность, как правило, не устанавливается.

Как было отмечено ранее в п. 1.6, значение погрешности результата каждого измерения определено быть не может, поэтому на практике пользуются оценками интервальных характеристик погрешности. Исходными данными для расчета характеристики абсолютной погрешности результата измерений в виде границ интервала неопределенности $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$ могут быть только предельно допускаемые значения Δ_f и Δ_ε составляющих абсолютной инструментальной погрешности, которые должны быть сообщены пользователю в технической документации на средство измерений. Гарантии в отношении сохранности этих характеристик обеспечивает изготовитель средства измерений и контролирующие метрологические органы. Предельно возможные границы $(-\Delta_e, +\Delta_e)$ погрешности e определяются пользователем в привязке к конкретным условиям измерений.

Итак, если эти исходные данные известны, то есть, если известно (может быть, с некоторой вероятностью), что

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f, \quad |\varepsilon| = \left| \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon, \quad |e| \leq \Delta_e,$$

то об абсолютной погрешности результата измерений на основании равенства (4) можно заключить, что ее значения не должны выходить за пределы, которые определяются неравенством

$$|\Delta x| \leq \frac{\Delta_f}{f'(x)} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (5)$$

Таким образом границы интервала остаточной неопределенности значения измеряемой величины суть $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$, где

$$\Delta_x = \frac{\Delta_f}{f'(x)} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon, \quad (6)$$

\tilde{x} - результат измерения.

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой величины, лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах $(-\Delta_{инст}, +\Delta_{инст})$, где

$$\Delta_{инст} = \frac{\Delta_f}{f'(x)} + \Delta_\varepsilon. \quad (7)$$

В рассмотренном общем случае удобно устанавливать норму $\gamma_{отн}$ на относительную инструментальную погрешность средства измерений или норму $\gamma_{прив}$ на погрешность, отнесенную к наибольшему значению измеряемой величины в диапазоне измерения. Такие нормы выражаются в процентах:

$$\left| \frac{\Delta_{инст} x}{x} \right| \cdot 100\% \leq \frac{\Delta_{инст}}{x} \cdot 100\% = \frac{\Delta_f}{x \cdot f'(x)} \cdot 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} \cdot 100\% = \gamma_{отн}, \quad (8)$$

$$\left| \frac{\Delta_{инст} x}{x_{max}} \right| \cdot 100\% \leq \frac{\Delta_{инст}}{x_{max}} \cdot 100\% = \frac{\Delta_f}{x_{max} \cdot f'(x)} \cdot 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{max}} \cdot 100\% = \gamma_{прив}. \quad (9)$$

2.1.2. Примеры погрешности применения средства измерений

1*. Погрешность e_1 , вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям.

Объект измерения - стержень с неровными краями. При постановке задачи измерения длины такого стержня рассматриваемая погрешность определяется неровностью его краев вне зависимости от точности применяемого средства измерений. Варианты корректной постановки задачи измерения в этом случае:

- измерить среднюю длину стержня,
- измерить минимальную (или максимальную) длину.

Аналогичная ситуация возникает, например, при измерении высоты облаков над уровнем Земли или уровня воды в парогенераторе тепловой или атомной электростанции. Для корректной постановки задачи измерений в этих случаях необходимо определить математическую модель границы облаков и уровня Земли или границы между водой и перегретым паром. В противном случае

результат измерений будет содержать неопределенность, равную неопределенности математического определения указанных границ и уровней.

Объект измерения - вал, сечение которого не является идеальным кругом. При постановке задачи измерения диаметра поперечного сечения такого вала рассматриваемая погрешность определяется отличием формы поперечного сечения от круговой вне зависимости от точности применяемого средства измерений.

Объект измерения - помещение. При трактовке результата измерения температуры в одной точке, как температуры воздуха в данном помещении, имеет место погрешность, равная разности между максимальной и минимальной температурами, вне зависимости от точности применяемого термометра. Варианты корректной постановки задачи измерений:

- измерить температуру воздуха в конкретной точке,
- измерить минимальную (или максимальную) температуру воздуха в помещении,
- измерить среднюю температуру воздуха в помещении.

Объект измерения - акватория Ладожского озера. Задача - измерение концентрации загрязнений воды (токсичных веществ, или нефтепродуктов, или ионов тяжелых металлов и т.д.). Ситуация аналогична предыдущей. Если результат количественного химического анализа пробы, изъятый в одном месте, распространяется на всю акваторию, рассматриваемая погрешность будет определяться неравномерностью содержания исследуемого загрязнения по всему озеру, каким бы точным не был этот анализ,

2.* Погрешность e_2 , вызванная взаимодействием средства измерений с объектом.

Примеры этой составляющей погрешности применения приведены выше в п. 2.3.

3* Погрешность e_3 , вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами

Эта погрешность возникает при измерении среднего значения пульсирующего давления, среднего значения выпрямленного переменного напряжения, при измерении малых напряжений в условиях действия помех, а также при преобразовании слабых сигналов измерительной информации, например, выходных сигналов датчиков в условиях энергоемкого промышленного производства.

2.1.3. Частная метрологическая структурная схема.

Средство измерений линейное

Метрологическая схема измерений в этом случае существенно упрощается (см. рис. 10).

Поскольку здесь $f_p(x) = K_p \cdot x$, $f(x) = K \cdot x$, $f'_p(x) = K_p$, $f'(x) = K$, $\Delta f(x) = f_p(x) - f(x) = K_p \cdot x - K \cdot x = \Delta K \cdot x$, выражение (3) для абсолютной погрешности результата измерений приобретает вид

$$\Delta x = \frac{\Delta K}{K} \cdot x + e + \varepsilon, \quad (10)$$

где $\Delta K = K_p - K$ - абсолютная погрешность коэффициента преобразования, вызванная разбросом его значений на множестве средств измерений данного типа, e - погрешность, возникающая при применении средства измерений,

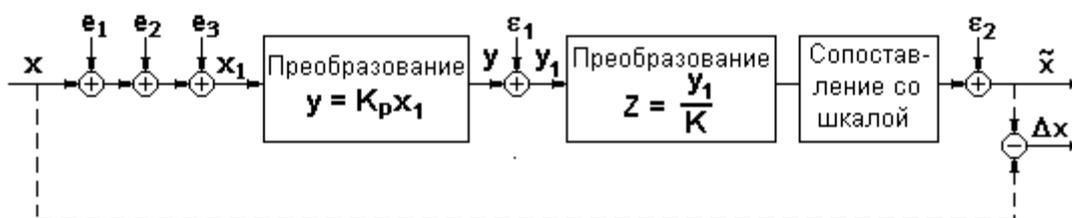


Рис. 10. Метрологическая структурная схема прямых измерений. Средство измерений линейное.

ε - собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений (инструментальная абсолютная аддитивная погрешность):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2.$$

Первое слагаемое равенства (10) линейно зависит от измеряемой величины и представляет собой произведение относительной погрешности коэффициента преобразования на значение измеряемой величины. Поэтому данная составляющая погрешности называется *мультипликативной составляющей погрешности* или *мультипликативной погрешностью*.

Второе и третье слагаемые не зависят от измеряемой величины, в сумме эти слагаемые образуют *аддитивную составляющую погрешности* или *аддитивную погрешность результата измерений*. Последнее из этих слагаемых порождено собственными свойствами средства измерений, и это слагаемое является *аддитивной погрешностью средства измерений*. Точно так же исключительно свойствами средства измерений порождена мультипликативная составляющая погрешности (10). В связи с этим, как это было в п. 3.1.1, *инструментальная составляющая абсолютной погрешности* или *инструментальная погрешность* равна

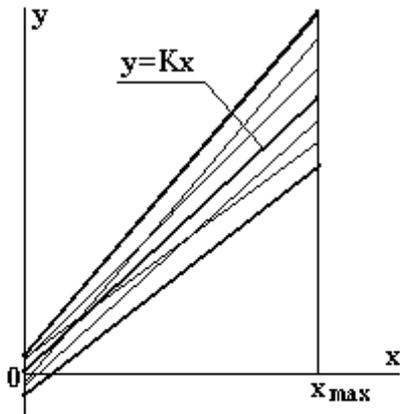


Рис.11. Пример разброса функций преобразования линейных средств измерений

$$\Delta_{инст}x = \frac{\Delta K}{K} \cdot x + \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \quad (11)$$

По аналогии с п. 3.1.1 характеристикой разброса коэффициентов преобразования на множестве средств измерений одного типа является предельное допустимое значение Δ_K , такое, что:

$$|K_p - K| = |\Delta K| \leq \Delta_K.$$

При выполнении этого условия разброс функций преобразования подобных средств измерений на множестве однотипных экземпляров будет иметь вид, показанный на рис. 11.

Как видно из рисунка, границами интервала погрешности будут расходящиеся прямые линии. В самом деле, используя обозначения предельных значений составляющих погрешности, введенные в п. 3.1.1, получим линейное выражение для границ интервала $(-\Delta_x, +\Delta_x)$, содержащего (может быть, с некоторой вероятностью) значение абсолютной погрешности результата измерений:

$$\Delta_x \leq \frac{\Delta_K}{K} \cdot x + \Delta_e + \Delta_\varepsilon, \quad (12)$$

где Δ_ε - предельное значение аддитивной погрешности:

$$\left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon.$$

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах $(-\Delta_{инст}, +\Delta_{инст})$, где

$$\Delta_{инст} = \frac{\Delta_K}{K} \cdot |x| + \Delta_\varepsilon \quad (13)$$

Предельное значение γ_x относительной погрешности результата измерений выражается формулой

$$\left| \frac{\Delta x}{x} \right| \leq \gamma_x = \frac{\Delta_K}{K} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} + \frac{\Delta_e}{x}, \quad (14)$$

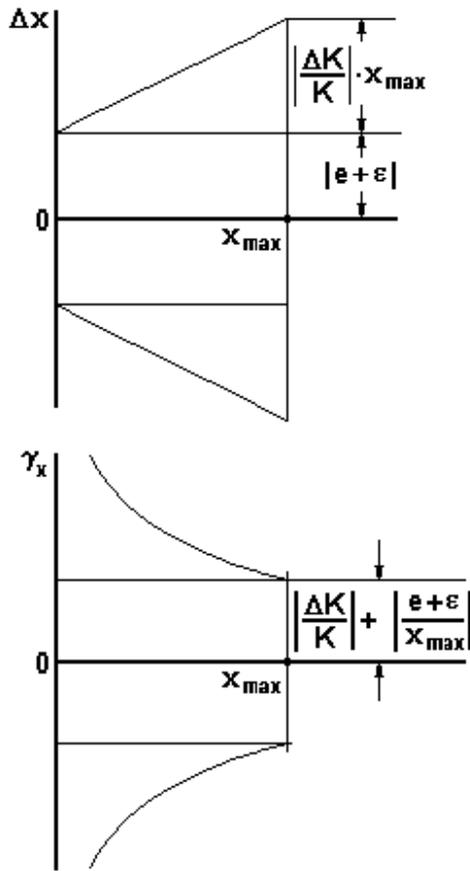


Рис.12. Характеристики погрешности измерений

правая часть которой есть сумма предельно допускаемых относительных погрешностей e и ε .

Здесь характеристика относительной мультипликативной составляющей уже не зависит от измеряемой величины и равна предельному значению относительной погрешности коэффициента преобразования $\gamma_K = \frac{\Delta_K}{K}$. Аддитивные составляющие со-

держат значение измеряемой величины в знаменателе, а это значит, что относительная погрешность результатов измерения увеличивается при уменьшении значений измеряемой величины.

Соответствующая область возможных значений абсолютной погрешности измерений показана в верхней части рис. 12, где x_{max} - верхний предел диапазона измерения. В нижней части рис. 12 показана область возможных значений относительной погрешности.

В рассмотренном случае оказывается удобным установить отдельные нормы на две составляющие инструментальной по-

грешности: на относительную погрешность коэффициента преобразования и на аддитивную составляющую погрешности средства измерений. Именно так нормируется инструментальная погрешность линейных средств измерений в зарубежной практике, а именно,

- норма γ_K устанавливается на относительную погрешность коэффициента преобразования в процентах (*gain error*):

$$\left| \frac{\Delta K}{K} \right| \cdot 100\% \leq \gamma_K, \quad (15)$$

- норма Δ_ε устанавливается на абсолютное значение аддитивной погрешности в единицах измеряемой величины (*offset error*):

$$\left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon.$$

В отечественной практике применяется иное нормирование инструментальной погрешности линейных средств измерений: нормируется относительная инструментальная погрешность средства измерений с помощью двучленной формулы:

$$\left| \frac{\Delta_{инст}}{x} \right| \cdot 100\% \leq c + d \left(\left| \frac{x_{max}}{x} \right| - 1 \right), \quad (16)$$

где x_{max} - максимальное значение измеряемой величины в диапазоне измерения, x - истинное значение измеряемой величины, на практике вместо него используется результат измерения (см. также п. 1.6),

$$d = \left| \frac{\Delta_{\varepsilon}}{x_{max}} \right| \cdot 100\%, \quad c = \left(\left| \frac{\Delta_K}{K} \right| \cdot 100\% + d \right). \quad (17)$$

Раскрывая скобки в (16) с учетом обозначений (17), получим ограничение, накладываемое этой формулой на относительную инструментальную погрешность средства измерений:

$$\left| \frac{\Delta_{инст}}{x} \right| \cdot 100\% \leq \left| \frac{\Delta_K}{K} \right| \cdot 100\% + \left| \frac{\Delta_{\varepsilon}}{x} \right| \cdot 100\%,$$

что согласуется с (13). Сравнение зарубежных и отечественных методов нормирования показывает, что при отечественном нормировании пользователю предоставляется более наглядная и полная информация об инструментальной погрешности средства измерений.

2.1.4. Частная метрологическая структурная схема.

Функция преобразования средства измерений незначительно отличается от линейной

Выше в п. 3.1.3 рассмотрен идеализированный случай линейного средства измерений. Однако в большинстве случаев, несмотря на стремление добиться линейной функции преобразования, все-таки незначительная нелинейность у многих средств измерений остается. Тем не менее, если это целесообразно, подобные средства измерений декларируется в рекламной и сопроводительной документации, как линейные. При этом остаточная нелинейность входит в состав инструментальной погрешности. Рассмотрим эту ситуацию с помощью метрологической структурной схемы, представленной на рис. 13. Эта схема отличается от схемы рис. 10 лишь первой операцией.

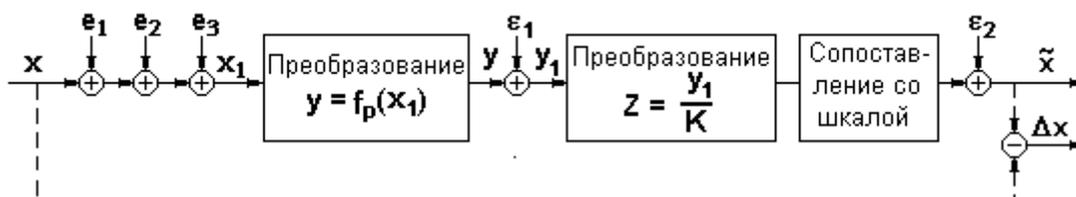


Рис. 13. Метрологическая структурная схема прямых измерений. Средство измерений незначительно отличается от линейного.

Реальные функции $y = f_p(x_1)$ нелинейного преобразования измеряемой величины, возмущенной погрешностями $e = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (то есть погрешностями применения) отличаются от линейной функции $y = K \cdot x_1$ незначительно,

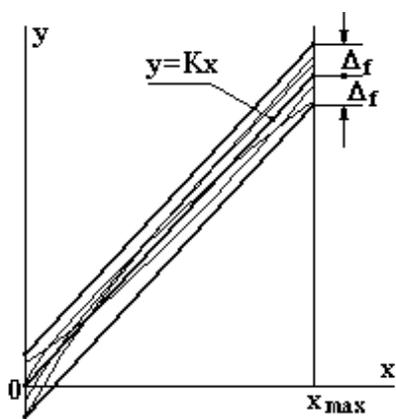


Рис. 14. Пример разброса функций преобразования внутри допустимых пределов

так, что модуль разности между ними при всех значениях измеряемой величины из диапазона измерений не превосходит некоторого значения Δ_f , которое составляет лишь часть общей инструментальной погрешности:

$$|f_p(x_1) - K \cdot x_1| \leq \Delta_f,$$

где K - номинальный коэффициент преобразования, объявленный в документации.

Зона, в которой должны находиться реальные функции преобразования, представлена на рис. 14. Эта зона порождена погрешностями воспроизведения функции преобразования из-за неточности изготовления и старения комплектующих изделий, ее изменением под воздействием внешних влияющих факторов, а также разбросом на множестве экземпляров средств измерений.

Применяя к рассматриваемому случаю обозначения, использованные в (3), получим равенство для абсолютной погрешности измерения:

$$\Delta x = \frac{f_p(x+e) - K \cdot x}{K} + \varepsilon = \frac{f_p(x+e) - K \cdot (x+e)}{K} + e + \varepsilon. \quad (18)$$

По аналогии с неравенством (5) и с теми же обозначениями устанавливаются граничные значения для абсолютной погрешности:

$$|\Delta x| \leq \frac{|\Delta_f|}{K} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (19)$$

Как видим, в этом случае, как и в п. 3.1.1, мультипликативная составляющая погрешности не выделяется. В силу непредсказуемого различия реальных функций преобразования у различных экземпляров средств измерений здесь вся погрешность считается аддитивной, и максимально возможное или допустимое значение правой части неравенства (19) принимается в качестве предельного значения погрешности измерений во всем диапазоне измерений.

Простым делением обеих частей неравенства (19) на x мы получаем выражение для пределов допускаемой относительной погрешности:

$$|\gamma_x| \leq \frac{|\Delta_f|}{K \cdot x} + \frac{\Delta_e}{x} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x}. \quad (20)$$

Для средств измерений с незначительной нелинейностью нормируется приведенная погрешность, то есть абсолютная погрешность, отнесенная к максимальному значению измеряемой величины в диапазоне измерения:

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x_{\text{max}}} \right| \cdot 100\% \leq \left| \frac{\Delta_f}{K \cdot x_{\text{max}}} \right| \cdot 100\% + \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\text{max}}} \right| \cdot 100\% = \gamma_{\text{прив}}$$

2.2. Режим измерений - динамический. Прямые измерения

2.2.1. Применяемые средства измерений

Номенклатура средств измерений, применяемых для измерения мгновенных значений изменяющейся во времени измеряемой величины, ограничена. Стрелочные приборы или иные приборы, снабженные индикаторами (такие, например, как ртутные термометры), в силу своей инерционности и длительности визуального отсчитывания показаний не позволяют измерять значения величин, изменяющихся во времени с заметной скоростью. То же самое относится к цифровым приборам, на входе которых может находиться инерционный аналоговый преобразователь, например, фильтр или интегратор, а для визуального считывания показаний цифрового прибора и их записи необходимо значительное время.

По этим причинам для измерения мгновенных значений изменяющихся измеряемых величин применяются средства измерений из числа следующих:

- аналоговые регистрирующие приборы с непрерывной или дискретной записью результатов (заметим, что считывание значений величины с непрерывной записи сопровождается неизбежной дискретизацией),

- быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) в комплекте с устройствами памяти (например, сопряженные с процессором или с компьютером), в которые записывается каждый полученный результат (выходной код АЦП или результат измерения - в зависимости от последовательности выполнения операций: регистрации и сопоставления со шкалой измеряемой величины),

- измерительные информационные системы, каждый измерительный канал которых, по сути дела, выполняет функции аналогового и последующего аналого-цифрового преобразования измеряемой величины с записью результатов в память компьютера, при выводе этих результатов на дисплей в реальном времени такие каналы, по сути дела, являются цифровыми осциллографами.

Корректный метрологический анализ погрешностей измерения изменяющихся величин возможен при условии, что в применяемых средствах измерений выполняются *линейные преобразования измеряемой величины*. В этом случае для анализа могут использоваться частотные методы, аппарат передаточных функций и интегральных операторов типа свертки. Измеряемые величины, погрешности и помехи на метрологических структурных схемах представляются, как функции времени.

2.2.2. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью аналоговых средств измерений

Преобразование изменяющихся во времени величин (далее - сигналов), выполняемое физическими устройствами, приводит к искажению формы сигналов вследствие того, что частотная характеристика любого физически реализуемого преобразователя неравномерна, а это означает, что коэффициенты преобразования различных гармонических составляющих входного сигнала различны. С увеличением частоты коэффициент преобразования в конечном итоге уменьшается вплоть до нуля. Во временной области процесс преобразования описывается интегральным оператором типа свертки, который при нулевых начальных условиях имеет вид

$$y(t) = \int_0^t k(t - \tau) x_1(\tau) d\tau, \quad (21)$$

где $k(t - \tau)$ называется ядром оператора, а в теории измерений и автоматического управления - *импульсной переходной функцией* или *весовой функцией*. Это преобразование показано на метрологической структурной схеме рис. 15, где использованы все обозначения, принятые ранее в п. 3.1.1. Индекс 'р' у обозначения импульсной переходной функции означает, что в составе конкретного экземпляра средства измерений используется реальный преобразователь. Характеристики реальных преобразователей на множестве всех экземпляров имеют разброс, вызванный теми же причинами, которые перечислены выше в п. 3.1.1 в отношении реального коэффициента преобразования.

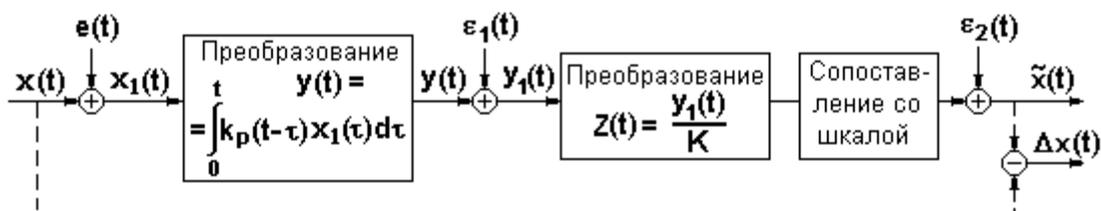


Рис.15. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное аналоговое.

Отличие настоящей схемы от предыдущих состоит лишь в том, что в данной схеме все величины зависят от времени, а погрешности применения, действующие на входе средства измерений, обозначены единым символом $e(t)$.

Сигнал, полученный в итоге первого преобразования, подвергается масштабированию с коэффициентом K , принятым в качестве номинального для данного средства измерений. После этого выполняется сопоставление со шкалой и регистрация значений измеряемой величины на носителе информации (диаграммной ленте, фотопленке, магнитной пленке и т.п.) в единицах ее изме-

рения. В ходе неизбежной расшифровки полученной непрерывной записи результатами измерений оказываются дискретные значения, а в состав погрешности ε_2 входит погрешность расшифровки.

В соответствии с приведенной схемой погрешность прямого измерения мгновенных значений изменяющейся измеряемой величины может быть записана в виде равенства

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \cdot \left[\int_0^t k_p(t-\tau) x(\tau) d\tau \right] + \frac{1}{K} \cdot \int_0^t k_p(t-\tau) \cdot e(\tau) d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t) - x(t),$$

откуда

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \cdot \left[\int_0^t k_p(t-\tau) \cdot x(\tau) d\tau - K \cdot x(t) \right] + \frac{1}{K} \cdot \int_0^t k_p(t-\tau) \cdot e(\tau) d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t). \quad (22)$$

Применяя к этому равенству преобразование Фурье, получим выражение для комплексного спектра погрешности измерения через спектры сигналов и реальную комплексную частотную характеристику преобразователя $K_p(j\omega)$:

$$\Delta x(j\omega) = \frac{1}{K} \left[K_p(j\omega) - K \right] \cdot x(j\omega) + \frac{K_p(j\omega)}{K} \cdot e(j\omega) + \frac{\varepsilon_1(j\omega)}{K} + \varepsilon_2(j\omega), \quad (23)$$

где частотные характеристики суть преобразования Фурье соответствующих импульсных переходных характеристик:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad K_p(j\omega) = \int_0^{\infty} k_p(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

Как видно, структура правой части равенств (22) и (23) аналогична структуре правых частей равенств (3), (4) п. 3.1.1. Мало того, равенство (3) есть частный случай (22) и (23), поскольку при неизменной во времени измеряемой величине (или неизменном сигнале измерительной информации), то есть при $\omega = 0$

$$K(0) = \int_0^{\infty} k(t) dt = K, \quad K_p(0) = \int_0^{\infty} k_p(t) dt = K_p,$$

$$\int_0^t k_p(t-\tau) \cdot x \cdot d\tau = x \cdot K_p, \quad \int_0^t k_p(t-\tau) \cdot e \cdot d\tau = e \cdot K_p.$$

Первые слагаемые в правой части каждого из равенств (22) и (23) представляют собой погрешности, вызванные двумя причинами: разбросом импульсных переходных характеристик и комплексных частотных характеристик на множестве экземпляров и их нестабильностью, а также отличием реального преобразования от идеального безинерционного, то есть такого, когда частотная характеристика практически не отличается от единицы, и тогда форма сигнала $x(t)$ не искажается. Эта вторая причина вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения мгновенных значений быстропеременных величин, если их спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя.

Вторые слагаемые в формулах (22) и (23) своим происхождением обязаны погрешности применения, которая претерпела то же преобразование, что и из-

меряемая величина, и если ее спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя, то она частично фильтруется. Получившаяся в результате составляющая погрешности измерения называется *наследственной погрешностью*.

Последние два слагаемых каждого из равенств (22) и (23) образуют в сумме собственную аддитивную абсолютную погрешность средства измерений.

2.2.3. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью цифровых средств измерений

Данная метрологическая структурная схема приведена на рис. 16 и отличается от предыдущей тем, что в цифровых средствах измерений осуществляется дискретизация непрерывно изменяющейся измеряемой величины, в результате чего может возникать погрешность, вызванная смещением моментов времени фактического измерения по отношению к заданным моментам t_i на Δt_i . Это обстоятельство отражено в метрологической структурной схеме посредством представления в цепочке идеального преобразования, показанной пунктиром, операции идеальной дискретизации, которая должна выполняться строго по расписанию, а именно, в моменты времени t_i . В цепочке реальных преобразований дискретизация выполняется в моменты времени t_i , смещенные на время Δt_i .

Смещение моментов дискретизации Δt_i называется *погрешностью датирования отсчетов*. Эта погрешность порождается затратами времени на аналого-цифровое преобразование, в общем случае она непостоянна и зависит от значения измеряемой величины. Несмотря на смещение моментов измерения относительно расписания, результаты измерений регистрируются, как относящиеся к заданным моментам времени t_i . Но за время Δt_i значение измеряемой

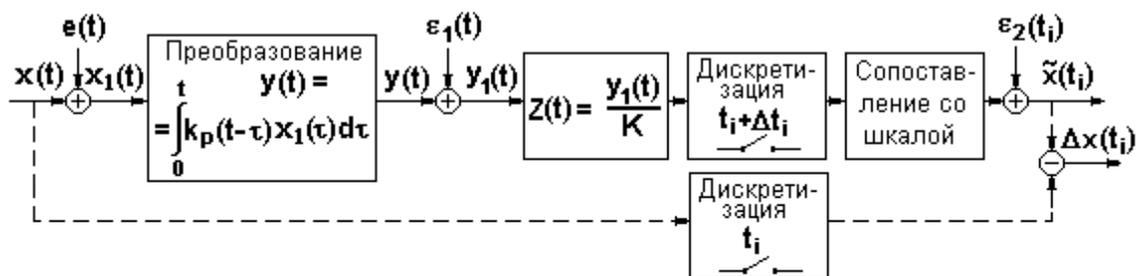


Рис. 16. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное цифровое.

величины изменяется, в силу чего возникает погрешность измерения мгновенного значения изменяющейся величины, именуемая *апертурной погрешностью*, которая должна учитываться в составе погрешности ϵ_2 . Аналогичная погрешность возникает и при расшифровке аналоговых записей переменных во

времени величин, и в этих случаях она входит в состав погрешности расшифровки, как это было отмечено в предыдущем пункте.

Апертурная погрешность аналого-цифрового преобразования может быть существенно снижена за счет применения перед АЦП специальных устройств, а именно, “устройств выборки-хранения” (УВХ).

Апертурная погрешность равна нулю при измерении неизменных во времени величин.

В данном случае для погрешности измерений, как функции времени, применимо выражение (22), в котором следует все обозначения времени t снабдить индексом ‘ i ’. Выражение в частотной области получается применением к такому выражению *дискретного преобразования* Фурье.

Вторая особенность цифровых средств измерений заключается в том, что выходной величиной (для приборов - показанием) является число, которое представлено конечным числом разрядов, двоичных или десятичных. Поэтому реальная и номинальная функции преобразования цифровых измерительных приборов (выходной код - десятичный) может быть записана в виде

$$\hat{N} = Ent [f_p(x) \cdot 10^n], \quad N = Ent [f(x) \cdot 10^n]. \quad (24)$$

Функции преобразования аналого-цифровых преобразователей с двоичным выходным кодом имеют вид

$$\hat{N} = Ent [f_p(x) \cdot 2^n], \quad N = Ent [f(x) \cdot 2^n], \quad (25)$$

где x - величина на входе средства измерений, N - выходной код (показание) цифрового средства измерений, n - целое число, $Ent[\bullet]$ - операция выделения целой части числа ‘ \bullet ’.

В результате функции преобразования цифровых средств измерений имеют ступенчатый характер и, строго говоря, никогда не могут быть линейными. Тем не менее характер зависимости выходного кода от входной величины именуют по характеру номинальной функции $f(x)$, которая участвует в выражениях (24) и (25). Наиболее распространенными являются линейные цифровые средства измерений, номинальная функция преобразования которых есть $\hat{N} = Ent [K \cdot x \cdot 2^n]$. В специальных случаях могут применяться квадратичные ($f(x) = K \cdot x^2$) и логарифмические ($f(x) = K \cdot \log x$) цифровые средства измерений.

Примеры функций преобразования цифровых средств измерений приведены на рис. 17, на которых высота каждой ступени ΔN есть единица младшего разряда выходного кода, а длина ступеньки ΔX - цена единицы младшего разряда выходного кода, которая выражается в единицах измеряемой величины.

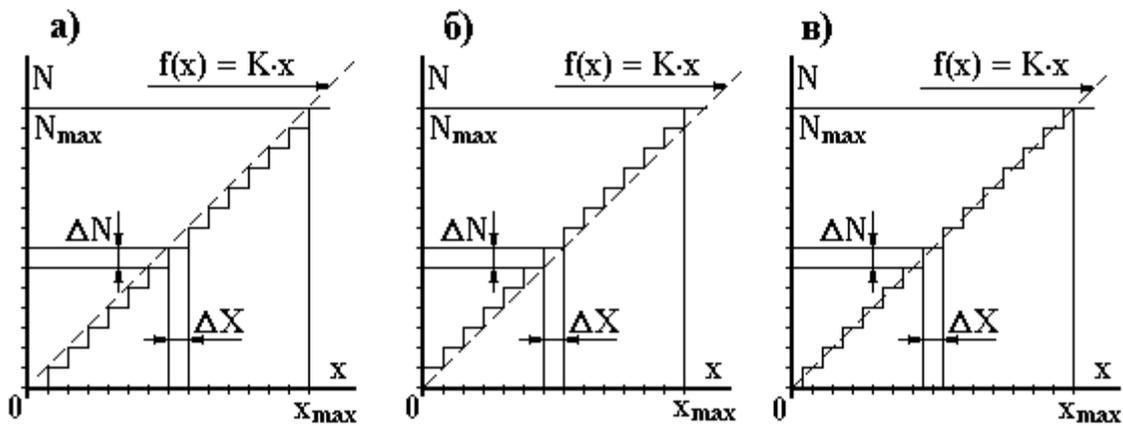


Рис.17. Примеры функций преобразования цифровых измерительных приборов и АЦП.

Из этих рисунков видно, что помимо погрешности, возникающей из-за отличия $f_p(x)$ от $f(x)$, и собственной аддитивной погрешности, в составе инструментальной погрешности цифровых средств измерений непременно присутствует погрешность округления, не превышающая значения цены младшего разряда выходного кода.

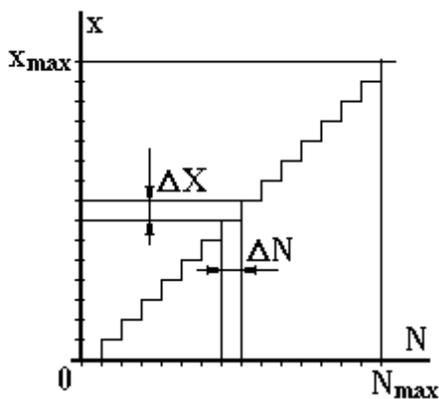


Рис.18. Пример функции преобразования линейного ЦАП

Три примера, показанные на рис.17, демонстрируют три варианта расположения реальной ступенчатой функции преобразования по отношению к номинальной. Наиболее выгодным является показанное на рис.17 в) размещение ступенчатой функции со сдвигом на половину цены деления младшего разряда.

Функции преобразования цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) обратны функциям цифровых приборов и АЦП, и точно так же являются ступенчатыми (см. рис. 18). У ЦАП длина каждой ступеньки функции

преобразования ΔN есть единица младшего разряда входного кода, а высота ступеньки ΔX - цена единицы младшего разряда входного кода, которая выражается в единицах выходной величины.

Показателем и характеристикой линейности цифровых измерительных приборов, АЦП и ЦАП является постоянство цены единицы младшего разряда кода (выходного или входного) во всем диапазоне измеряемых или воспроизводимых на выходе (у ЦАП) величин. В случаях, когда цена единицы младшего разряда не постоянна, это свойство называется *дифференциальной нелинейностью* и может нормироваться в специфических ситуациях. *Интегральная не-*

линейность (то есть отличие функции $f(x)$ в (24) и (25) от линейной) также может нормироваться.

2.3. Метрологическая структурная схема косвенных измерений

Метрологическую структурную схему косвенных измерений рассмотрим для случаев, когда результаты косвенных измерений вычисляются компьютером, в память которого поступают или в нем формируются результаты прямых измерений, являющиеся входными данными для компьютерных программ. Эта же структурная схема справедлива и для тех случаев, когда результаты прямых измерений отсчитываются со шкал аналоговых приборов, в том числе, стрелочных, или с цифровых индикаторов цифровых приборов, или с диаграмм, на которых зарегистрированы значения изменяющихся измеряемых величин, а затем эти результаты вводятся в компьютер с клавиатуры или обрабатываются вручную.

Наиболее общая процедура получения результатов косвенных измерений реализуется в многоканальных измерительных информационных системах (ИИС). В общем случае искомый результат вычисляется, как функция многих переменных - результатов прямых измерений параметров сложного объекта, полученных в различных измерительных каналах ИИС. В частных случаях результат косвенного измерения может быть функцией одной величины, измеряемой прямым методом. Такая ситуация может возникать не только в ИИС, но и при применении цифрового прибора, оснащенного процессором или компьютером, или при ручной обработке результатов прямых измерений одной величины.

В метрологической структурной схеме, представленной на рис. 19, в качестве исходных данных используются результаты прямых измерений постоянных или изменяющихся измеряемых величин.

Итак, пусть искомая величина w связана с величинами x_1, x_2, \dots, x_k , подлежащими прямым измерениям, функциональной зависимостью $w = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$. Реальные вычисления дадут результат косвенного измерения $\tilde{w} = f_p(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k)$, содержащий абсолютную погрешность

$$\Delta w = \tilde{w} - w = f_p(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k) - f(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

где $\tilde{x}_1 = x_1 + \Delta x_1, \tilde{x}_2 = x_2 + \Delta x_2, \dots, \tilde{x}_k = x_k + \Delta x_k$ - результаты прямых измерений величин x_1, x_2, \dots, x_k , индекс 'p' обозначает функцию, фактически реализуемую при вычислениях.

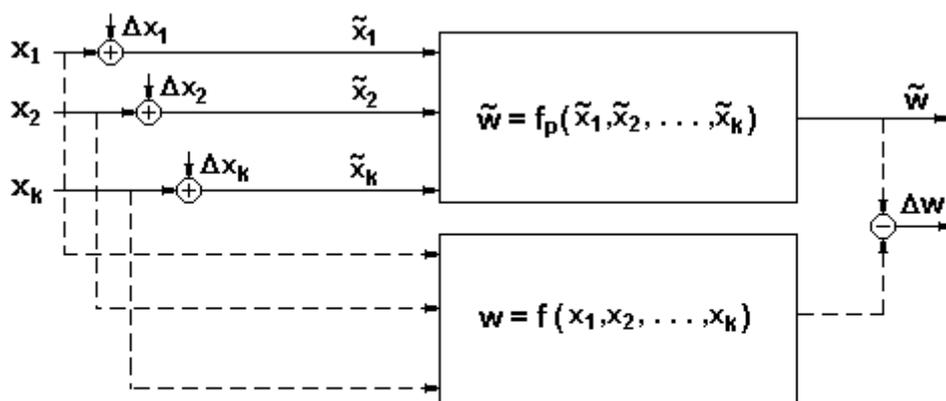


Рис.19. Метрологическая структурная схема косвенных измерений, выполняемых ИИС

Погрешность результатов косвенных измерений возникает по следующим причинам:

- приближенная реализация в цифровых ЭВМ непрерывных функций и операций, таких, например, как интегрирование и дифференцирование,
- погрешности $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_k$ результатов прямых измерений, порождающие *наследственные погрешности* результата косвенных измерений,
- погрешности, вызванные округлением при вычислениях, остановкой итерационных процессов и иными причинами.

При измерениях изменяющихся во времени измеряемых величин, выполняемых с помощью многоканальных ИИС, *апертурная погрешность*, входящая в состав погрешности результатов прямых измерений, может сильно возрасти. Это вызвано тем, что измерительные каналы ИИС опрашиваются компьютером последовательно, поэтому моменты фактических измерений, выполняемых этими каналами, различаются. В то же время каждый результат косвенного измерения приписывается одному моменту времени, как правило, моменту времени обращения к первому каналу. При большом количестве каналов различие моментов времени фактических измерений величин, входящих в расчетные формулы, может оказаться существенным и вызвать значительные апертурные погрешности результатов косвенных измерений.

Таким образом, при измерении изменяющихся во времени величин с помощью многоканальных ИИС выражение для погрешности результата косвенных измерений будет иметь вид:

$$\Delta w(t_i) = f_p(\tilde{x}_1(t_i + \Delta t_1), \tilde{x}_2(t_i + \Delta t_2), \dots, \tilde{x}_k(t_i + \Delta t_k)) - f(x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_k(t_i)), \quad (26)$$

где $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_k$ - *погрешности датирования отсчетов* в измерительных каналах ИИС, с увеличением номера канала эти погрешности возрастают.

Значения погрешностей датирования отсчетов в ИИС зависят от быстродействия устройств, обеспечивающих опрос каналов, и от быстродействия программ, управляющих опросом каналов.

Радикальным средством уменьшения погрешностей датирования отсчетов в многоканальных измерительных системах является многоканальное устройство выборки - хранения (УВХ). УВХ устанавливается перед коммутатором, и нормальный режим его работы - это режим слежения, то есть повторения выходным сигналом сигнала на входе. В момент t_i начала опроса каналов от компьютера по интерфейсному соединению приходит сигнал, переводящий УВХ в режим одновременного запоминания всех сигналов на выходе всех каналов системы. Коммутатор опрашивает каналы и по очереди отправляет мгновенные значения выходных сигналов, относящихся к одному и тому же моменту времени, на вход АЦП и далее в память компьютера для регистрации или обработки. Время перехода УВХ от режима слежения в режим запоминания составляет десятки наносекунд, а разброс этого времени еще меньше. Таким образом влияние погрешности датирования отсчетов убирается практически полностью.

2.4. Классификация погрешностей средств измерений и результатов измерений

В соответствии с определениями (п. 1.2) и видами погрешностей средств измерений и результатов измерений эти погрешности классифицируются по следующим признакам.

Признак - происхождение (см. п.3):

- инструментальные,
- *методические погрешности*, то есть погрешности, вызванные несовершенством используемого метода измерений,
- погрешности применения.

Признак - условия эксплуатации :

- *основная погрешность (intrinsic error)* - погрешность средства измерений, то есть инструментальная погрешность в *нормальных условиях эксплуатации (in reference conditions)*,
- погрешность в *рабочих условиях эксплуатации (in normal conditions)* - состоит из двух составляющих: основной погрешности и *дополнительной погрешности*.

Такое разделение погрешностей необходимо для того, чтобы обеспечить арбитражные испытания средств измерений в одних и тех же условиях. Это обстоятельство подчеркнуто в английском наименовании нормальных условий: "*reference conditions*".

Нормальные условия эксплуатации устанавливаются в соответствии с ГОСТ 8.395 "Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования". Нормальные условия - это довольно жесткие ограничения на пределы допускаемых изменений значений влияющих величин (например, температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления, параметров внешних электрических и магнитных полей, напряжения питания, солнечной радиации, амплитуды вибраций,

интенсивности солнечной радиации и других), при которых определяется и контролируется основная погрешность средств измерений во время их метрологических испытаний. Такие ограничения необходимы для обеспечения взаимного доверия к результатам контроля метрологических характеристик, проводимого в стандартизованных условиях. Рекламации, вызванные превышением основной погрешностью установленной для нее нормы, принимаются только в том случае, когда это превышение установлено в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность (complementary error) - составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или ее выхода за пределы нормальной области значений.

Признак - характер зависимости от измеряемой величины (см. п.3.1):

- мультипликативная, пропорциональная значению измеряемой величины,
- аддитивная - не зависит от измеряемой величины.

Признак - характер проявления (см. пп. 1.2, 1.3):

- систематическая,
- случайная.

Признак - режим измерения (см. п.3):

- погрешность измерений в статическом режиме,
- погрешность измерений в динамическом режиме.

Признак - способ представления (см. п. 1.2):

- абсолютные,
- относительные,
- приведенные (fiducial errors).

Абсолютные и относительные погрешности могут служить характеристиками качества результатов измерений и средств измерений. Приведенные погрешности являются характеристикой только инструментальной погрешности средств измерений.

Приведенные погрешности вычисляются, как отношение абсолютной инструментальной погрешности средства измерений, определяемой формулами (7), (11), (15) п. 3.1.1, к нормирующему значению измеряемой величины (fiducial value of a measurand) и выражаются, как правило, в процентах:

$$\gamma_{СИ} = \frac{\Delta_{инст}}{x_{нрм}} \cdot 100\%.$$

В зависимости от особенностей средства измерений и характера зависимости абсолютной погрешности от измеряемой величины в качестве нормирующего значения $x_{нрм}$ могут использоваться следующие значения:

- $x_{нрм} = |x|_{max}$ - максимальное абсолютное значение измеряемой величины из диапазона измерения, выбирается, когда основной вклад в инструментальную погрешность вносит аддитивная составляющая,

- $x_{нр.м} = |x|$ - модуль текущего значения измеряемой величины или результат измерения, выбирается, когда основной вклад в инструментальную погрешность вносит мультипликативная составляющая,

- $x_{нр.м} = |x_{max} - x_{min}|$ - ширина диапазона измерения, выбирается, когда нуль шкалы находится внутри или вне диапазона измерения.

Только для аналоговых омметров (п. 4.2), на шкале которых имеются отметки границ диапазона измерения: '0' и '∞', применяется особое выражение для приведенной погрешности, в котором абсолютная погрешность и нормирующее значение измеряемой величины выражаются в единицах длины шкалы:

$$\Delta l [мм] = k \cdot \Delta_{инст}, \quad L [мм] \text{ и}$$

$$\gamma_{аном} = \frac{\Delta l}{L} \cdot 100\%.$$

Приведенные погрешности применяются при назначении и установлении норм (пределов допускаемых значений) на инструментальные погрешности средств измерений, как правило, для нормальных условий эксплуатации. Установленный предел допускаемой основной (п. 1.2) приведенной погрешности, выраженный в процентах от нормирующего значения измеряемой величины, используется в качестве условного обозначения *класса точности* (class index, accuracy class) измерительных приборов и преобразователей.

В тех случаях, когда для средств измерений нормируется предел допускаемой *относительной* погрешности и для них указывается класс точности, то для обозначения класса точности используется число равное нормированному пределу относительной погрешности. Если этот предел представлен двучленной формулой с коэффициентами c и d , то для обозначения класса точности используется дробь c/d .

4. Аналоговые измерительные приборы.

Принципы действия, свойства и применения

4.1. Общие характеристики

Аналоговые измерительные приборы, как правило, обеспечивают выполнение прямых измерений, отсчет результата измерений производится по шкале. Режим измерений, выполняемых аналоговыми средствами измерений - статический. Большинство аналоговых измерительных приборов - стрелочные с неподвижной шкалой и подвижной стрелкой, перемещение которой (поворот или линейное перемещение) относительно шкалы функционально взаимнооднозначно связано со значением измеряемой величины.

Другие разновидности аналоговых измерительных приборов:

- с неподвижной стрелкой или иным указателем и подвижной шкалой,

- с линейным индикатором в виде совмещенной со шкалой полосы, длина которой функционально взаимно однозначно связана со значением измеряемой величины (например, ртутный термометр).

Рассмотрим метрологическую структурную схему измерений, выполняемых стрелочным измерительным прибором, представленную на рис. 26.

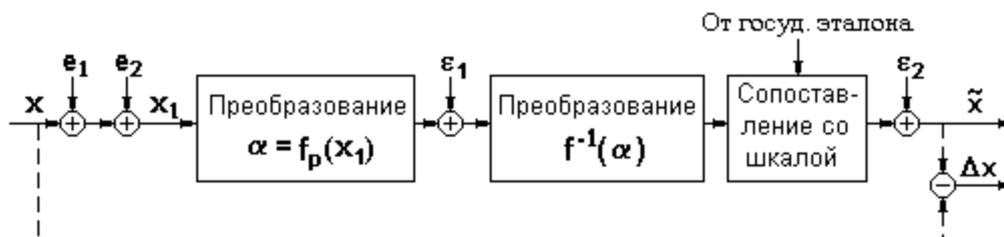


Рис. 26. Метрологическая структурная схема измерений, выполняемых стрелочным измерительным прибором

По сравнению с метрологической структурной схемой рис. 8 здесь в составе погрешности применения отсутствует погрешность, вызванная пульсациями и помехами, которые наложены на измеряемую величину и однородны с ней. Это вызвано тем, что механизм, перемещающий стрелку относительно шкалы или, наоборот, шкалу относительно стрелки, обладает значительной инерционностью: время установления показаний прибора равно примерно 1 секунде. Поэтому высокочастотные пульсации и помехи, действующие на большинстве объектов, фильтруются почти полностью.

Примеры погрешностей e_1 и e_2 приведены выше в пп. 2.2, 3.1.2.

В стрелочном приборе измеряемая величина преобразуется в угол поворота стрелки (или в перемещение шкалы) с некоторой погрешностью ϵ_1 . Обратное преобразование и совмещение со шкалой осуществляется за счет того, что отметки на шкале наносятся в соответствии с номинальной обратной функцией $f^{-1}(\alpha)$ и оцифровываются в единицах измеряемой величины. Перенос размеров измеряемой величины на шкалу выполняется путем подачи на вход прибора образцовых значений от специального источника (калибратора), связанного с государственным эталоном через поверочную схему (см. п. 3.6.4). Эти действия также сопровождаются погрешностями, которые обозначены, как ϵ_2 .

В конструкторских и нормативных документах на аналоговые измерительные приборы устанавливаются следующие метрологические характеристики:

- диапазон изменения измеряемой величины,
- предел допускаемой основной абсолютной инструментальной погрешности $\Delta_{\text{доп}}$ или (гораздо чаще) предел допускаемой основной приведенной инструментальной погрешности $\gamma_{\text{прив}}$ (п. 3.4),

- пределы допускаемых дополнительных погрешностей (п. 3.4), вызываемых отклонением каждой из влияющих величин от значений, соответствующих нормальным условиям,

- характеристики параметров, влияющих на погрешность e_2 , вызванную взаимодействием прибора с объектом измерений (см. п. 2.2); для вольтметров - это сопротивление или ток полного отклонения стрелки, для амперметров - это собственное сопротивление амперметра.

Нормы на указанные метрологические характеристики устанавливаются следующим образом.

Нормы на предел допускаемой основной абсолютной погрешности устанавливаются в единицах измеряемой величины числом, содержащим не более двух значащих цифр.

Нормы на предел допускаемой основной приведенной, в том числе, относительной погрешности устанавливаются числом, выраженным в процентах, из ряда чисел по ГОСТ 8.401, представленного в п. 3.5.5.

Нормы на предел допускаемой дополнительной погрешности устанавливаются, как на дополнение к пределу основной (абсолютной или приведенной) погрешности в следующих долях от предела основной погрешности:

- для дополнительной погрешности от температуры окружающей среды - на половину или на целый предел основной погрешности при отклонении температуры от нормального значения на каждые 10 град.,

- для остальных влияющих величин - на половину или на целый предел основной погрешности при отклонении каждой влияющей величины (п. 1.2) от нормального значения на весь диапазон изменения каждой влияющей величины в рабочих условиях применения прибора.

Нормы на параметры, влияющие на погрешность e_2 , устанавливаются указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от этого значения.

Кроме записей в нормативной или сопроводительной документации некоторые характеристики и свойства аналоговых измерительных приборов указываются на их шкалах или корпусах в соответствии с ГОСТ 23217.

Обозначения системы прибора:

- | | |
|---|---|
|  | - прибор магнитоэлектрической системы, |
|  | - прибор магнитоэлектрической системы с выпрямителем, |
|  | - прибор электродинамической системы, |
|  | - прибор ферродинамической системы, |
|  | - прибор электромагнитной системы, |
|  | - прибор электростатической системы, |
|  | - прибор индукционной системы. |

Обозначения классов точности прибора (см. п. 3.4)

1,5 - обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности, которая определена при нормирующем значении $x_{нр.м} = |x|_{max}$ (нормируется, если мультипликативная составляющая погрешности мала по сравнению с аддитивной составляющей); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x|_{max}}{100},$$

где $\gamma_{СИ}$ - численное обозначение класса точности средства измерения (СИ).

В приведенном примере $|\Delta_{инст}| \leq 0.015 \cdot |x|_{max}$.

1,5 - обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной относительной погрешности которая определена при нормирующем значении $x_{нр.м} = |x|$ (нормируется, если аддитивная составляющая погрешности мала по сравнению с мультипликативной составляющей); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x|}{100},$$

где $\gamma_{СИ}$ - численное обозначение класса точности средства измерения (СИ), x - результат измерения.

В приведенном примере $|\Delta_{инст}| \leq 0.015 \cdot |x|$.

1,5 - обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности которая определена при нормирующем значении $x_{нр.м} = |x_{max} - x_{min}|$ (нормируется, когда нулевое значение измеряемой величины находится либо внутри диапазона, либо вне его); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x_{max} - x_{min}|}{100},$$

где $\gamma_{СИ}$ - численное обозначение класса точности средства измерения (СИ).

В приведенном примере $|\Delta_{инст}| \leq 0.015 \cdot |x_{max} - x_{min}|$.

1,5 - обозначение класса точности прибора (только аналогового омметра), численно равное пределу основной приведенной погрешности, которая определена, как выраженное в процентах отношение длины участка шкалы Δl [мм], соответствующего максимальной абсолютной погрешности, к общей длине шкалы L [мм] (см. п. 3.4).

Примеры практического применения последнего выражения нормы, которая устанавливается на основную погрешность аналогового омметра, приведены в лабораторном практикуме [11].

Обозначения вида тока (напряжения)

- - постоянный ток (напряжение),
- ~ - переменный ток (напряжение),
- ⎓ - постоянный и переменный ток (напряжение),

Другие обозначения

- ⊥ - нормальное рабочее положение прибора вертикальное (на щите),
- ┌ - нормальное рабочее положение прибора горизонтальное,
- ☆ - испытательное напряжение прочности изоляции 500 В,
- ☆₂ - испытательное напряжение, превышающее 500 В (здесь 2 кВ),
- ☆₀ - прибор не подлежит испытанию прочности изоляции,
- ⚠ - перед использованием прибора внимательно изучить инструкцию по его эксплуатации,
- ⚡ - зажим не изолирован от высокого напряжения,
- ⊥ - зажим соединен с корпусом, не заземляется,
- ⊥ - зажим соединен с корпусом, заземляется.

4.2. Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы (или, иначе, магнитоэлектрические приборы) являются самыми распространенными стрелочными электроизмерительными приборами. Эти приборы обладают высокой чувствительностью и применяются не только, как самостоятельные приборы для измерения силы тока и напряжения, но и встраиваются в другие, более сложные приборы, снабженные измерительными преобразователями различного назначения, принципа действия и исполнения.

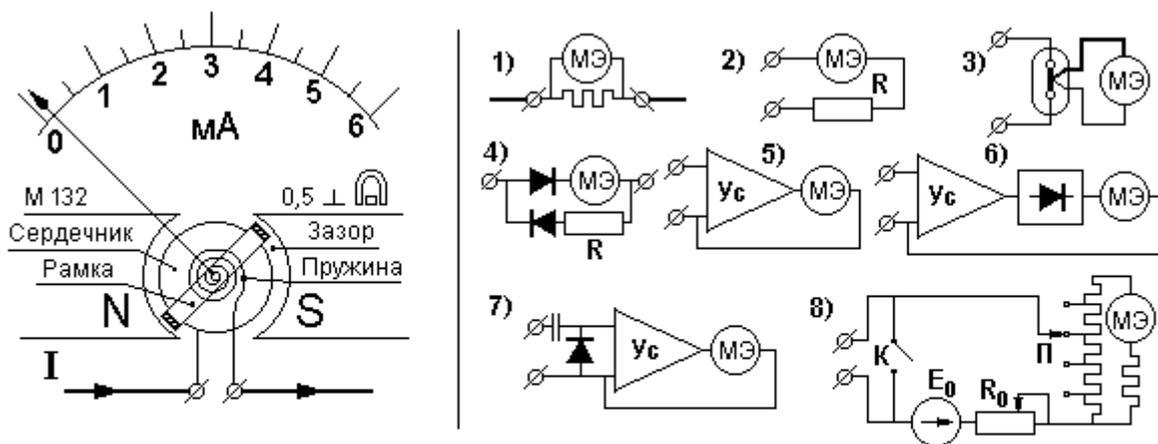


Рис. 27. Приборы магнитоэлектрической системы, принцип действия, варианты применения

Принцип действия магнитоэлектрического прибора (в дальнейшем МЭ - прибора) основан на взаимодействии проводника с током и магнитного поля. На рис. 27 представлен схематический чертеж МЭ - прибора с примером возможных надписей на его шкале. Обозначение типа отечественных приборов содержит сведения о системе ('М' - магнитоэлектрический) и о заводе-изготовителе (первая цифра '1' - завод "Вибратор").

Магнитное поле создается постоянным магнитом, прошедшим стабилизацию. Между полюсами магнита расположен сердечник таким образом, чтобы воздушный зазор, в котором движется рамка с обмоткой, был равномерным. В обмотку рамки через пружинки или иные упругие элементы, например, растяжки, поступает ток I , и в результате его взаимодействия с постоянным магнитным полем возникает вращающий момент $M_{BP} = B \cdot S w I$, где B - индукция магнитного поля в зазоре, S - площадь обмотки рамки, w - число витков обмотки рамки. Вращающему моменту противодействует момент, создаваемый пружинкой или растяжкой, который в пределах упругих деформаций этих элементов линейно зависит от угла поворота рамки α : $M_{np} = W \cdot \alpha$, где W - жесткость пружинки (растяжки). В установившемся состоянии, когда $M_{BP} = M_{np}$,

$$\alpha = \frac{BSw}{W} \cdot I$$

с такой точностью, которая обеспечивается стабильностью индукции магнитного поля в зазоре и жесткости пружинки (растяжки). Современные технологии изготовления и стабилизации магнитов и упругих элементов позволяют достигать значений основной приведенной погрешности МЭ - приборов вплоть до 0,1%.

Поскольку угол поворота рамки и, стало быть, стрелки линейно зависит от тока в рамке, шкалы автономно применяемых МЭ - приборов равномерные.

В переходном режиме, когда ток в рамке изменяется, движение рамки описывается дифференциальным уравнением второго порядка, как колебательной системы, имеющей инерционную массу и жесткость:

$$J\alpha'' + P\alpha' + W\alpha = B \cdot S_w \cdot i(t), \quad (28)$$

где J - момент инерции подвижной части (рамки и стрелки), второе слагаемое есть момент сопротивления, пропорциональный скорости движения рамки. Этот момент для МЭ - приборов складывается из момента сопротивления воздуха и момента торможения, вызванного током, возбужденным перемещением обмотки рамки в магнитном поле (аналог рекуперативного торможения электрического двигателя). Указанное свойство МЭ - приборов используют для предохранения стрелки от повреждений при транспортировании путем закорачивания обмотки рамки. В этом случае ток, возбужденный в обмотке рамки при тряске и ударах, будет максимальным, следовательно, максимальным будет и торможение стрелки.

Предельно достижимые значения параметров МЭ - приборов:

- предел допускаемой основной приведенной погрешности - от 0,1%,
- ток полного отклонения стрелки от 10 мкА.

В силу таких высоких показателей МЭ - приборы имеют широкое применение. Примеры применений 1) ÷ 8) показаны на рис. 27 справа.

1) Использование в качестве амперметра со стандартными шунтами, падение напряжения на которых 10 мВ, 45 мВ, 75 мВ. Пределы измерения постоянного тока с помощью таких амперметров - от $3 \cdot 10^{-7}$ А (гальванометры) до 10 000 А (с шунтом). Основная приведенная погрешность от 0,2%.

2) Вольтметр постоянного тока с добавочным сопротивлением R . Высокая чувствительность МЭ - приборов позволяет достичь довольно высокого сопротивления подобных вольтметров. Так, при токе полного отклонения стрелки прибора 10 мкА сопротивление вольтметра на основе МЭ - прибора составит 100 000 Ом/В. При диапазоне измерений $[0 \div 10]$ В собственное сопротивление вольтметра составит 1.0 МОм. Такое высокое сопротивление вольтметра обеспечивает благоприятные условия взаимодействия с объектом (см. п. 2.2).

Пределы измерений от $3 \cdot 10^{-4}$ В до $1 \cdot 10^3$ В. Основная приведенная погрешность от 0,2%.

3) Амперметры для измерения действующего значения переменного тока в пределах от 0.005 А до 100 А (с трансформатором тока) в частотном диапазоне до 10^8 Гц с погрешностью от 1%. Измеряемый ток поступает в термопреобразователь и нагревает проволоку, температура которой определяется выделяемой в ней активной мощностью этого тока, то есть действующим значением тока. До этой же температуры нагревается горячий спай термопары, и возникающий в ней ток измеряется МЭ - прибором.

4) Выпрямительный амперметр. Показанные на схеме диоды включены в противоположных направлениях для того, чтобы включение такого амперметра в исследуемую цепь не приводило к выпрямлению тока в этой цепи. Сопротивление R должно быть равно сопротивлению рамки прибора. Ток в цепи должен оставаться переменным.

Пределы измерений от $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ до 10^4 А (с трансформатором тока). Основная приведенная погрешность от 1,5%.

5) Высокочувствительные электронные аналоговые амперметры и вольтметры постоянного тока и напряжения с усилителем. Используемые здесь усилители помимо повышения чувствительности обеспечивают благоприятные условия взаимодействия с объектом измерений (см. п. 2.2) за счет того, что входное сопротивление усилителя тока (для амперметра) может быть сделано пренебрежимо малым, а входное сопротивление усилителя напряжения (для вольтметра), напротив, - очень большим до $10^7 \div 10^{14} \text{ Ом}$.

Пределы измерений силы тока от $5 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ до 1.0 А, напряжения - от $5 \cdot 10^{-6} \text{ В}$ до 10^3 В . Основная приведенная погрешность от 1,5%.

6) Высокочувствительные электронные амперметры и вольтметры параметров переменного тока и напряжения. В этих приборах, как и в предыдущих, усилитель исполняет одинаковые функции. Кроме того здесь могут быть предусмотрены частотные фильтры, обеспечивающие частотный анализ измеряемого (исследуемого) сигнала.

Пределы измерений силы тока от 10^{-5} А до 1.0 А, напряжения - от $3 \cdot 10^{-6} \text{ В}$ до $3 \cdot 10^2 \text{ В}$. Основная приведенная погрешность амперметров и вольтметров от 1,5%.

Недостаток выпрямительных амперметров и вольтметров переменного тока: угол отклонения стрелки МЭ-прибора пропорционален постоянной составляющей выпрямленного тока, но все такие приборы градуируются в действующих значениях тока и напряжения. Это означает, что объявленные характеристики инструментальной погрешности подобных приборов справедливы только для той формы кривой тока или напряжения, для которой выполнена градуировка, а именно, для синусоидальной. Погрешность, вызванная отличием формы кривой от синусоидальной, может составить величину до 11%, что соответствует максимальному значению коэффициента формы кривой.

7) Амплитудный электронный вольтметр. Показанная на рисунке входная цепь, состоящая из конденсатора и диода (схема фиксатора), при высоком входном сопротивлении усилителя обеспечивает выделение на диоде пульсирующего напряжения с постоянной составляющей, примерно равной двойной амплитуде измеряемого напряжения. Это происходит потому, что конденсатор, зарядившись до амплитудного значения напряжения в следующий полупериод запирает диод и тем самым поднимает входное напряжение на величину его амплитуды. Погрешность такого преобразования вызывается частичным разрядом конденсатора на входное сопротивление усилителя.

8) Аналоговый омметр. На схеме показаны:

E_0 - внутренний источник постоянного напряжения,

П - переключатель пределов измерения,

К - ключ, замыкание которого имитирует нулевое значение измеряемого сопротивления, при замкнутом ключе К с помощью переменного сопротивления R_0 устанавливается электрический '0' шкалы омметра, которому соответствует ток полного отклонения стрелки МЭ - прибора.

После установки нуля ключ К размыкается, и выполняется измерение сопротивления R_x . Очевидно, что при $R_x = \infty$ ток через МЭ - прибор не течет, стрелка не отклоняется, и отметка ' ∞ ' оказывается на левой границе шкалы сопротивлений омметра.

Пределы измерения - от единиц Ом до сотен тысяч Ом. Основная приведенная погрешность - не лучше, чем 1,5% .

9) Магнитоэлектрический кулонометр. Чтобы на основе МЭ - прибора создать прибор для измерения заряда, следует уменьшить, по возможности, момент инерции подвижной части и противодействующий момент. Поэтому у кулонометров отсутствуют пружинки (растяжки), ток в обмотку рамки подается через безмоментные подводы, а подвижная часть максимально облегчена. Тогда в идеальном случае уравнение движения подвижной части кулонометра находится из выражения (28):

$$P \cdot \alpha' = BSw \cdot i(t),$$

откуда, по определению тока, как скорости изменения заряда, получим

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = \frac{BSw}{P} i(t), \quad \alpha(t_2) - \alpha(t_1) = \frac{BSw}{P} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{BSw}{P} q,$$

где $[t_1, t_2]$ - интервал времени, в течение которого измеряемый заряд проходил через обмотку рамки. Результат измерения отсчитывается по шкале прибора в кулонах, как разница двух положений стрелки в момент времени присоединения к объекту и в момент завершения разряда объекта через обмотку рамки. В связи с таким действием МЭ кулонометр снабжается устройством принудительной установки стрелки в некоторое начальное положение перед каждым измерением.

10) Магнитоэлектрический веберметр предназначен для измерения разности потокосцепления исследуемого постоянного магнитного поля с испытательной катушкой веберметра, площадь которой S и число витков w_{60} известны. Он устроен и действует точно так же, как МЭ кулонометр.

Плоская катушка, присоединенная к зажимам веберметра, перемещается из одной в другую точку исследуемого магнитного поля. Пусть Φ_1, Φ_2 - магнитные потоки в двух точках поля, тогда $\Psi_1 = w_{60} \Phi_1$ и $\Psi_2 = w_{60} \Phi_2$ - потокосцепления в этих точках. ЭДС и соответственно, ток, индуцирующиеся в катушке при ее перемещении из точки к точке, вычисляются через производную от потокосцепления по времени. В частности, $i(t) = \Psi'_t(t) / R$, где R - сопротивление цепи. Подставляя эти выражения в формулы, записанные выше для кулонометра, получим:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{BSw}{P} i(t), \quad \alpha(t_2) - \alpha(t_1) = \frac{BSw}{P} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{BSw}{PR} (\Psi_2 - \Psi_1).$$

Таким образом, для измерения разности между магнитными потоками (или потокосцеплениями) в двух точках магнитного поля необходимо установить стрелку веберметра в некоторое положение, затем присоединить к нему плоскую катушку с известной площадью и числом витков и переместить ее между этими точками магнитного поля. Стрелка веберметра переместится, и результатом измерения будет разность положений стрелки, отсчитанная в единицах магнитного потока.

Пределы измерений от 500 мкВб до 10^4 мкВб. Основная приведенная погрешность от 1,5%.

4.3. Приборы электродинамической системы

Принцип действия приборов электродинамической системы (в дальнейшем ЭД-приборов) и пример обозначений на шкале показаны на рис. 28.

Вращающий момент создается в результате взаимодействия токов, протекающих в подвижной и неподвижной катушках. Этот момент пропорционален произведению мгновенных значений токов:

$$M_{BP}(t) = K_{ЭД} \cdot i_1(t) i_2(t).$$

Момент инерции подвижной части прибора (катушка и стрелка) достаточно велик, и поэтому она не успевает реагировать на быстрые изменения токов, то есть является простым механическим низкочастотным фильтром. Поскольку эти приборы, как правило, предназначены для измерения характеристик перио-

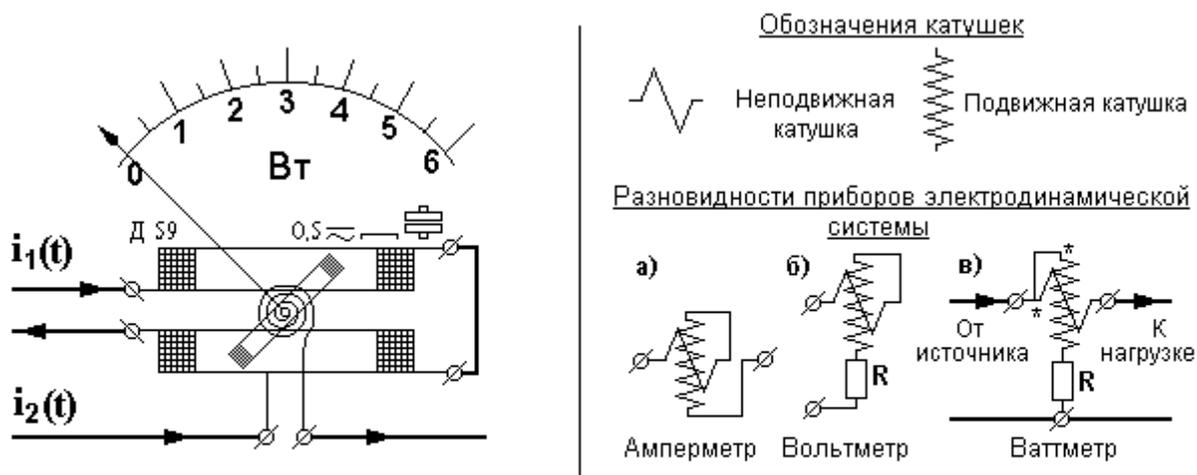


Рис. 28. Приборы электродинамической системы. Принцип действия, обозначения, варианты применения

дических сигналов, то постоянная составляющая вращающего момента записывается в виде среднего значения

$$\bar{M}_{BP} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T} \int_t^{t+T} i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot dt,$$

где T - период сигналов тока $i_1(t), i_2(t)$, $K_{\text{ЭД}}$ - постоянный коэффициент.

На основе механизма электродинамической системы создаются амперметры, вольтметры и ваттметры (см. схемы **а**), **б**), **в**) рис. 28).

а) ЭД амперметр. Из схемы рис. 28 видно, что через обе катушки течет один и тот же ток, поэтому среднее значение вращающего момента пропорционально действующему значению измеряемого тока вне зависимости от формы кривой тока:

$$\bar{M}_{BP} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) \cdot dt.$$

Из этой формулы следует, что ЭД амперметр позволяет измерять постоянный ток и действующее значение переменного тока, о чем говорит специальный знак на шкале. Вследствие значительной индуктивности катушек частотный диапазон ЭД амперметров ограничен сверху значением 5000 Гц. В связи с этим при наличии в кривой тока высокочастотных составляющих, которые превышают частотный диапазон прибора, все-таки появляется незначительная зависимость результатов измерений от формы кривой.

Предельные свойства ЭД амперметров.

- предел допускаемой основной приведенной погрешности - от 0,2% до 1,0%,
- диапазон измерений - от 0,005 А и выше, с трансформатором тока - до 6 000 А,
- диапазон частот - 0; 45 ÷ 5000 Гц,
- собственное сопротивление не более нескольких Ом.

Шкала ЭД амперметра неравномерна. Конструктивными мерами путем подбора формы катушек ее стремятся сделать равномерной. На шкалах отечественных ЭД амперметров обычно нанесены жирные точки, за пределами которых объявленный класс точности не обеспечивается.

б) ЭД вольтметр. В силу отмеченных обстоятельств ЭД вольтметр используется для измерения постоянного и действующего значения переменного напряжения практически вне зависимости от формы кривой, если частоты высших гармоник кривой напряжения не выходят за пределы его частотного диапазона. Из-за большого потребляемого тока (3 мА) сопротивление ЭД вольтметра не может быть большим. Так, на пределе 30 В его сопротивление не может быть больше 10 000 Ом. Поэтому ЭД вольтметры применяются для измерений в мощных цепях, в которых шунтирующее действие их невысокого сопротивления не будет заметно сказываться на результатах измерений.

Предельные свойства ЭД вольтметров.

- предел допускаемой основной приведенной погрешности - от 0,2% до 1,0%,

- диапазон измерений - от 5 В до 600 В, с трансформатором - до $3 \cdot 10^4$ В.
- диапазон частот - до 5000 Гц,
- собственное сопротивление - (100 - 2000) Ом.

Свойства шкал ЭД вольтметров такие же, как у шкал ЭД амперметров.

в) ЭД ваттметр. Предназначен для измерения мощности, выделяемой постоянным и переменным током в нагрузке. Ток нагрузки, который может достигать десятков ампер, проходит через неподвижную катушку, называемую *последовательной цепью ваттметра*. Через подвижную катушку (*параллельную цепь ваттметра*) пропускается ток, пропорциональный напряжению, подаваемому от источника. Для периодических сигналов с учетом сдвига фаз φ между током и напряжением выражение для среднего вращающего момента имеет вид:

$$\bar{M}_{BP} = \frac{K_{ЭД}}{T} \int_t^{t+T} i(t) \cdot \frac{u(t + \varphi)}{R} \cdot dt = K_{BT} \cdot I_D U_D \cdot \cos \varphi,$$

где I_D, U_D - действующие значения тока и напряжения, K_{BT} - постоянный коэффициент.

Из последнего выражения видно, что вращающий момент, и следовательно, угол отклонения стрелки электродинамического ваттметра прямо пропорционален активной мощности. Поэтому шкала электродинамического ваттметра линейна.

Зажимы ваттметра, помеченные звездочкой, как это показано на рис. 28 в), присоединяются к проводам, идущим от источника, и потому эти зажимы называются *генераторными*.

Предельные свойства электродинамических ваттметров.

- предел допускаемой основной приведенной погрешности от 0,05%,
- пределы измерения от единиц ватт до $10^8 \div 10^{10}$ Вт (с трансформаторами тока и напряжения).
- диапазон частот - 45 ÷ 2000 Гц.

4.4. Приборы ферродинамической системы

Назначение, схемы включения и принцип действия - те же, что и у ЭД - приборов. Как видно из рис. 29, конструктивное различие заключается в том, что с целью усиления электромагнитного поля неподвижной катушки, она снабжена магнитопроводом из листовой наборной электротехнической стали. По аналогии с МЭ - приборами, магнитопровод снабжен наконечниками и - для уменьшения магнитного сопротивления - сердечником, так что для подвижной катушки обеспечивается равномерный воздушный зазор.

За счет указанных мероприятий вращающий момент ФД - приборов существенно увеличен, а вся магнитная система оказывается экранированной от действия внешних магнитных полей, которые могут возникать на энергоемких предприятиях, особенно в местах расположения приборных щитов. Поэтому чаще всего ФД - приборы применяются, как щитовые приборы для вертикаль-

ного расположения. Из-за сравнительно большого вращающего момента ФД - приборы устойчивы к тряске и вибрациям и успешно применяются на железнодорожных, морских и воздушных транспортных средствах. Стрелка и шкала и другие индикаторы ФД - приборов обычно делаются хорошо видимыми с обычного расстояния от щита 1 - 2,5 м, за которым следит технолог, управляющий производственным процессом.

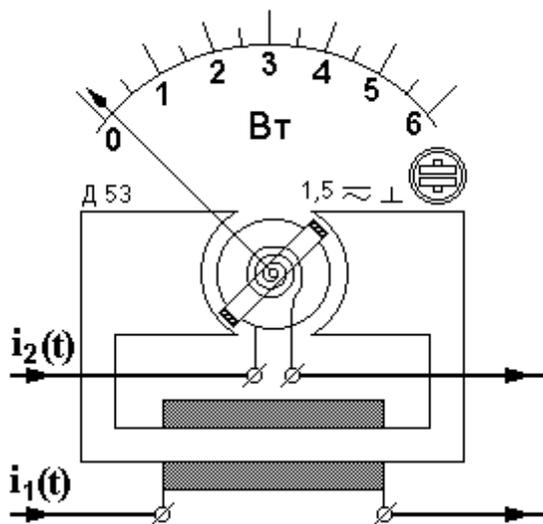


Рис. 29. К принципу действия прибора ферродинамической системы

С другой стороны, наличие магнитопровода значительно увеличивает индуктивность неподвижной катушки, и поэтому частотный диапазон ФД - приборов существенно уже частотного диапазона ЭД - приборов.

Диапазоны измерений действующих значений тока, напряжения и активной мощности те же, что и у ЭД - приборов. Точность ФД - приборов ниже и не бывает лучше, чем 0,5%.

Частотный диапазон 0 Гц, 45 ÷ 500 Гц. Собственное сопротивление ФД вольтметров составляет (100 ÷ 2000) Ом. Большое значение вращающего момента дает возможность использовать ФД механизм для построения самопишущих приборов. Для этого на стрелке устанавливается пишущий инструмент (перо, чернильница), и в прибор встраивается лентопротяжный механизм, перемещающий бумажную ленту - диаграмму.

4.5. Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы (в дальнейшем ЭМ - приборы) поясняется рис. 30, на котором приведены типичные надписи на шкале. Вращающий момент создается за счет того, что ток $i(t)$, протекающий по катушке, выполненной, как соленоид со щелевидным отверстием, создает электромагнитное поле, которое втягивает внутрь катушки фигурную пластину, изготовленную из электротехнической стали. Этот момент пропорционален квадрату силы тока и содержит поэтому постоянную и переменную составляющие. Частота первой гармоники переменной составляющей равна удвоенной частоте первой гармоники измеряемой силы тока. В силу инерционности подвижной части переменная составляющая фильтруется, и средний вращающий момент равен

$$\bar{M}_{BP} = \frac{K_{ЭМ}}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) \cdot dt,$$

где T - период измеряемого тока, $K_{ЭМ}$ - постоянный коэффициент.

Как видно из этого выражения, ЭМ - приборы позволяют измерять действующее значение переменного тока, а также силу постоянного тока, о чем свидетельствует также соответствующий знак на шкале.

Из принципа действия ЭМ - приборов следует, что на его показания могут оказывать сильное воздействие внешние магнитные поля. Чтобы уменьшить их действие, в ЭМ - приборах предусматривается дифференциальная конструкция,

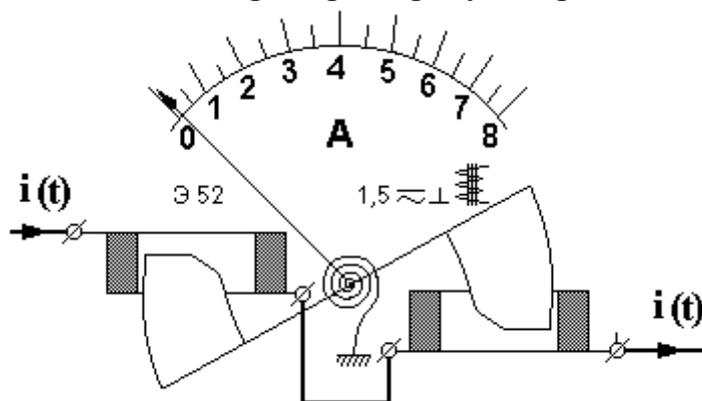


Рис. 30. К принципу действия прибора электромагнитной системы

как это показано на рис. 30. Компенсация действия внешнего поля происходит за счет того, что моменты, которые оно создает при воздействии на обе стороны подвижной части, действуют в противоположных направлениях, а моменты, создаваемые измеряемым током, действуют в одном направлении. Эта компенсация будет неполной, если внешнее

поле неоднородно в объеме подвижного механизма прибора.

На рис. 30 показан ЭМ амперметр. ЭМ вольтметр получается присоединением к ЭМ амперметру последовательно добавочного сопротивления.

В силу квадратичной зависимости вращающего момента от силы тока шкала ЭМ - приборов неравномерна. Равномерности шкалы на рабочей части добиваются путем подбора формы пластин, втягивающихся в катушку.

Метрологические и эксплуатационные свойства ЭМ - приборов невысоки. Ток полного отклонения стрелки не менее 5 мА, предел допускаемой основной приведенной погрешности не менее 0,5%, частотный диапазон составляет 0 Гц и 40÷3000 Гц. Собственное сопротивление ЭМ - вольтметров составляет (100 ÷ 2000) Ом.

Достоинством ЭМ - приборов является отсутствие токоподводов к подвижной части, низкая трудоемкость в изготовлении и низкая стоимость используемых материалов и, следовательно, пониженная цена по сравнению с другими приборами, имеющими равные метрологические свойства.

Основное применение - в качестве щитовых приборов, в том числе, на транспортных средствах.

4.6. Приборы электростатической системы

Действие электростатического прибора (в дальнейшем ЭС - прибора) основано на использовании силы, возникающей между пластинами воздушного конденсатора, заряды на которых имеют разные знаки. Схематический чертеж ЭС - прибора представлен на рис.31. Измеряемое напряжение $u(t)$ прикладывается к неподвижным и подвижным пластинам, которые под действием указанной силы

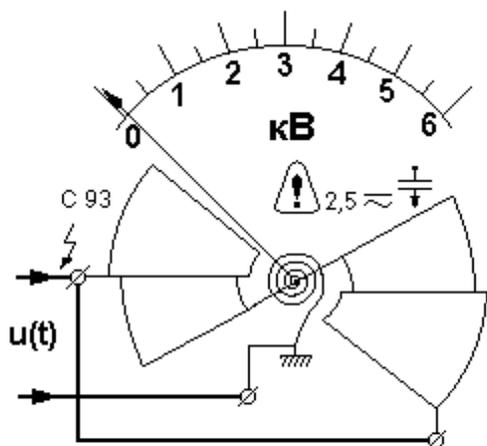


Рис. 31. К принципу действия прибора электростатической системы

втягиваются в пространство между неподвижными пластинами. Вращающий момент пропорционален квадрату напряжения и содержит поэтому постоянную и переменную составляющую. Частота первой гармоники переменной составляющей в два раза больше частоты первой гармоники измеряемого напряжения. В силу инерционности подвижной части переменная составляющая вращающего момента фильтруется, и подвижная часть отклоняется на угол, пропорциональный постоянной составляющей, то есть среднему значению вращающего момента:

$$\bar{M}_{BP} = \frac{K_{ЭС}}{T} \int_t^{t+T} u^2(t) \cdot dt,$$

где T - период измеряемого тока, $K_{ЭС}$ - постоянный коэффициент.

Устройство и принцип действия ЭС - прибора говорят о том, что ЭС - прибором может быть только вольтметр, обеспечивающий измерение постоянного напряжения и действующего значения переменного напряжения. ЭС - вольтметр выделяется среди вольтметров всех систем, в том числе и электронных, своим экстремально высоким сопротивлением, которое при измерении постоянного напряжения равно сопротивлению изоляции. При измерении переменного напряжения собственное сопротивление ЭС-вольтметра определяется его емкостью, не превышающей нескольких сот пикофарад.

Основным недостатком вольтметров электростатической системы является низкий вращающий момент, из-за чего диапазон измеряемых напряжений ограничен снизу значением 30 В, и он может применяться только при условии защиты от вибраций и тряски.

С другой стороны, вольтметры электростатической системы обеспечивают измерение высоких напряжений до 300 кВ без использования делителя напряжения и практически без собственного потребления мощности от объекта.

Достигнутый предел допускаемой основной приведенной погрешности ЭС вольтметров - 0,5%. Частотный диапазон: 0 Гц, $40 \div 10^7$ Гц.

4.7. Приборы индукционной системы

Единственной разновидностью приборов индукционной системы являются счетчики активной и реактивной электрической энергии переменного тока, по-

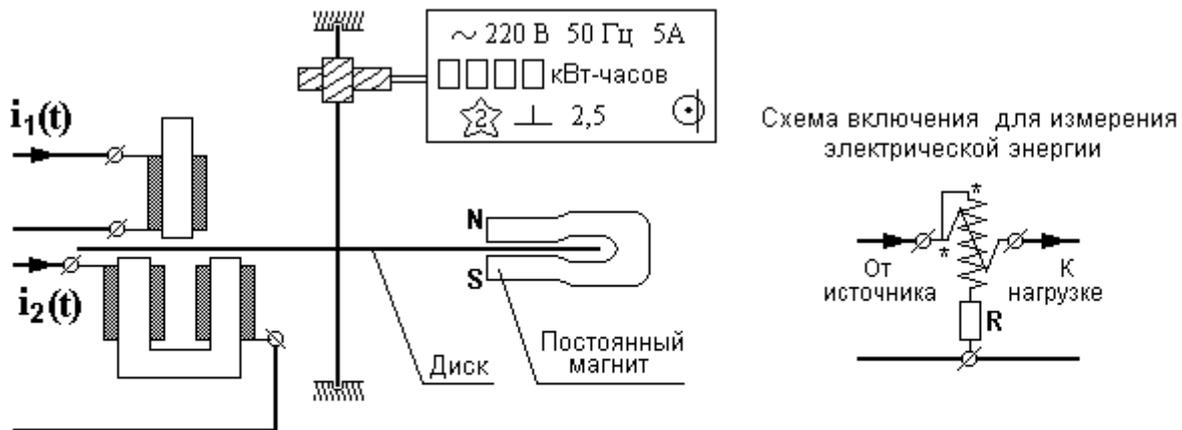


Рис. 32. Прибор индукционной системы (счетчик электрической энергии). Принцип действия, обозначения, схема включения.

требляемой нагрузкой. Устройство счетчика электрической энергии схематически представлено на рис. 32. Подвижной частью этого прибора является диск из электропроводящего материала (обычно это алюминий, как обладающий наименьшим весом). Диск вращается на оси, закрепленной в подпятниках, которые должны быть износостойчивыми и создавать минимальный и неизменный во времени момент трения. Вращающий момент создается двумя электромагнитами, расположенными по разные стороны от диска. Их расположение таково, что вихревые токи, создаваемые ими в диске, взаимодействуют с полями этих электромагнитов, и при этом взаимодействии возникает момент, пропорциональный произведению токов:

$$M_{BP}(t) = K_{ИИД} \cdot i_1(t) i_2(t).$$

Если в одном из электромагнитов протекает ток нагрузки (назовем эту цепь по аналогии с подобной цепью ЭД ваттметра *последовательной*, см. п. 4.3), а в другом электромагните протекает ток, пропорциональный напряжению на нагрузке, то есть $i_2(t) = u(t) / R$ (назовем эту цепь *параллельной*, как соответствующую цепь ЭД ваттметра, см. п. 4.3), где R - добавочное сопротивление параллельной цепи, то средний вращающий момент, как и в случае ЭД ваттметра, будет пропорционален активной мощности:

$$\bar{M}_{BP} = \frac{K_{ИИД}}{T} \int_t^{t+T} i(t) \cdot \frac{u(t + \varphi)}{R} \cdot dt = K_{СЭ} \cdot I_D U_D \cdot \cos \varphi,$$

где φ - угол сдвига фазы между током и напряжением в нагрузке.

Собственное сопротивление последовательной обмотки (тока) делают как можно меньше (десятые доли Ом), а сопротивление параллельной обмотки (напряжения) - как можно больше (единицы и десятки кОм).

Если бы противодействующий момент создавался пружинкой, то угол поворота диска был бы пропорционален мощности. Однако, отсутствие противодействующей пружинки позволяет диску вращаться, то есть выполнять операцию интегрирования угловой скорости его вращения. Если угловая скорость вращения диска пропорциональна мощности, то угол поворота диска (который индицируется индикатором с округлением до целого числа оборотов) пропорционален интегралу от мощности, то есть энергии. Для обеспечения этой пропорциональности противодействующий момент создается стабилизированным постоянным магнитом. Тормозной противодействующий момент возникает за счет того, что при движении диска в поле магнита в диске возникает ток, пропорциональный скорости его вращения, и этот ток взаимодействует с полем магнита, тормозя вращение, как это происходит при рекуперативном торможении электрического двигателя постоянного тока.

Равномерное вращение имеет место тогда, когда равны моменты: вращающий и противодействующий, то есть, когда $M_{BP} = M_{ПР}$. Поскольку вращающий момент пропорционален мощности P , а противодействующий пропорционален угловой скорости вращения ω ,

$$K_{BP} \cdot P = K_{ПР} \cdot \omega + M_{ТР},$$

где K_{BP} , $K_{ПР}$ - коэффициенты пропорциональности, $M_{ТР}$ - момент трения в подпятниках.

Отсюда, пренебрегая моментом трения, получаем:

$$\omega = \frac{K_{BP}}{K_{ПР}} \cdot P, \quad \alpha(t) = \int_0^t \omega \cdot dt = \frac{K_{BP}}{K_{ПР}} \cdot \int_0^t P \cdot dt = K_{ЭН} \cdot A(t),$$

где $\alpha(t)$ - угол поворота диска счетчика за время t , $A(t)$ - электрическая энергия, потребленная за время t , $K_{ЭН}$ - коэффициент пропорциональности.

Таким образом, количество оборотов диска счетчика, пропорционально энергии. Вращение диска через червячное зацепление передается на счетчик числа оборотов, которое индицируется на цифровом индикаторе.

Бытовые и промышленные счетчики предназначены для измерения количества электрической энергии, выделяемой переменным током частотой 50 Гц.

Метрологические свойства счетчиков электрической энергии:

- бытовые счетчики предназначены для измерения электрической энергии при напряжении 220 В и токах 5.0, 10.0, предел допускаемой основной относительной погрешности (то есть приведенной к текущему показанию) 2.5%,

- промышленные счетчики предназначены для измерения перетоков большой электрической энергии при напряжении 3000 В и токах до 1000 А, предел допускаемой основной относительной погрешности (то есть приведенной к текущему показанию) от 0.5%.

Нормированием и международной унификацией свойств счетчиков электрической энергии занимается специальный комитет международной электротехнической комиссии (МЭК), поскольку результаты измерений перетоков

электрической энергии через государственные границы являются основой для соответствующих расчетов и экономических санкций.

Схема включения счетчика электрической энергии точно такая, как схема включения ваттметра (сравнить рис. 28 в и схему рис. 32). Так же, как у ваттметра, генераторные зажимы счетчика обозначены звездочкой. После присоединения счетчика к электрической цепи корпус счетчика и все присоединительные зажимы пломбируются во избежание экономических злоупотреблений.

4.8. Средства расширения пределов измерения и правила выбора подходящего предела

4.8.1. Типичные способы и средства расширения пределов измерений

Расширение пределов измерения приборов - это важная технико - экономическая задача, целью которой является уменьшение объема приборного парка предприятия без ущерба для метрологического обеспечения испытаний изделий и управления технологическими процессами. При наличии средств расширения пределов измерения оказывается возможным применять один и тот же обычно дорогостоящий прибор для измерения величин различного размера. В конкретных ситуациях может потребоваться изменить предел измерения в сторону увеличения верхнего предела измерений, то есть уменьшить чувствительность прибора, а в других случаях наоборот, - повысить чувствительность, то есть изменить предел измерения в сторону уменьшения верхнего предела измерения. Возможны два варианта решения этой задачи.

В первом варианте средства расширения пределов измерения встраиваются в измерительный прибор, который снабжается ручным переключателем пределов. Такой прибор является многопредельным, и метрологические характеристики этого прибора (см. п. 3.5.5) на разных пределах могут различаться. Тогда они нормируются для каждого предела измерения по отдельности. Об этом потребителю сообщается надписями на шкале или в сопроводительной документации.

Во втором варианте используются внешние средства расширения пределов измерений. Этот вариант используется там, где измерения на одном выбранном пределе выполняются в течение длительного времени, например, в системах управления технологическим процессом.

Такое внешнее средство расширения пределов измерения есть не что иное, как *масштабирующий линейный измерительный преобразователь*, который изменяет не вид измеряемой величины, а лишь ее масштаб. Эти преобразователи выпускаются промышленностью, как автономные средства измерений (СИ). Каждая группа таких преобразователей имеет унифицированные свойства, присоединительные размеры и метрологические характеристики. Поэтому при их соединении с однопредельным измерительным прибором фактически получает-

ся новый прибор, метрологические характеристики которого должны быть рассчитаны по метрологическим характеристикам соединенных компонентов.

В качестве внешних средств расширения пределов измерения используются:

- шунты - для расширения пределов измерения силы тока в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности,

- делители напряжения и добавочные сопротивления - для расширения пределов измерения напряжения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности,

- усилители тока и напряжения - для расширения пределов измерения тока или напряжения в сторону уменьшения максимального значения измеряемой величины, то есть для увеличения чувствительности,

- измерительные трансформаторы тока и напряжения - могут применяться для расширения пределов измерения тока или напряжения в обе стороны, но чаще всего применяются для расширения пределов измерения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности.

4.8.2. Шунты

Схема соединения однопредельного амперметра с шунтом показана на рис. 33. Шунт имеет четыре зажима. Пара зажимов L_1, L_2 называются *токовыми зажимами*, к ним подключается линия с измеряемым током. Два других зажима P_1, P_2 - *потенциальные*, к ним подключается амперметр, собственное сопротивление которого показано на рисунке и обозначено через R_A . Потенциальные зажимы жестко соединены между определенными точками шунта путем сварки или другими методами, обеспечивающими высокую стабильность расположения этих точек и пренебрежимо малое и стабильное переходное сопротивление от этих точек к потенциальным зажимам. Непосредственное присоединение амперметра к токовым зажимам недопустимо, поскольку в этом случае нестабильность сопротивления контактов в токовых зажимах из-за различных усилий при винтовом соединении, из-за попадания грязи и пыли при большой силе тока будет вызывать соответствующую нестабильность падения напряжения на этих контактах и погрешность измерения, которая не может быть гарантирована изготовителями амперметра и шунта и не может быть определена при измерении.

Сопротивление шунта между точками присоединения потенциальных зажимов обозначено через $R_{ш}$.

Пусть I_A - ток полного отклонения стрелки, соответствующий верхнему

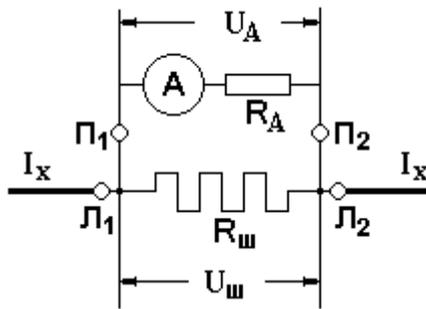


Рис. 33. Соединение амперметра с шунтом

пределу диапазона измерения амперметра А, а U_A - падение напряжения на сопротивлении амперметра при этом токе:
 $U_A = I_A R_A$.

Пусть I_{max} - верхний предел диапазона измерения силы тока, который желательно обеспечить с помощью шунта.

Очевидно, что при этой силе тока должно выполняться равенство $I_A R_A = (I_{max} - I_A) R_{ш}$, откуда получаем значение масштабного коэффициента

расширения предела измерения силы тока:

$$K = \frac{I_{max}}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}}.$$

Всегда $K > 1$.

В нормативной и сопроводительной документации на шунты указываются следующие метрологические характеристики шунтов:

- номинальное падение напряжение на шунте при максимальном значении силы тока в диапазоне измерения из следующего стандартного ряда: 10 мВ, 45 мВ, 75 мВ,
- верхний предел диапазона измерений, который обеспечивает данный шунт,
- верхний предел измерения силы тока амперметром, с которым может быть использован данный шунт,
- предел допускаемой основной относительной погрешности преобразования (основным источником погрешности является погрешность воспроизведения масштабного коэффициента K , которая порождает мультипликативную составляющую инструментальной погрешности, см. п. 3.1.3),
- пределы допускаемой дополнительной погрешности.

В документации на шунты, предназначенные для работы на переменном токе, указывается частотный диапазон, в котором их основная погрешность не превышает нормированный предел.

Для обеспечения совместимости шунта с амперметром в документации на амперметр и, как правило, на его шкале указывается падение напряжения на внутреннем сопротивлении амперметра при токе полного отклонения стрелки из ряда 10 мВ, 45 мВ, 75 мВ.

4.8.3. Добавочные сопротивления

Для расширения пределов измерения напряжения могут использоваться делители напряжения и добавочные сопротивления. Однако, из-за того, что де-

литель напряжения должен потреблять от объекта ток, превышающий ток собственного потребления вольтметра, на практике для расширения пределов измерения вольтметров применяют добавочные сопротивления. Исключение составляет только электростатический вольтметр, который практически не потребляет ток, и с ним могут использоваться делители напряжения, составленные из активных сопротивлений или конденсаторов.

Добавочное сопротивление соединяется последовательно с вольтметром. Если собственное сопротивление вольтметра R_B , а значение добавочного сопротивления R_D , то при подключении к вольтметру добавочного сопротивления верхний предел измерения увеличивается до напряжения

$$U_{max} = I_{Bmax} (R_B + R_D),$$

где I_{Bmax} - ток полного отклонения стрелки вольтметра.

Поэтому коэффициент расширения предела измерения равен:

$$K = \frac{I_{Bmax} (R_B + R_D)}{I_{Bmax} R_B} = 1 + \frac{R_D}{R_B}.$$

Всегда $K > 1$.

Для обеспечения совместимости добавочного сопротивления и вольтметра, к которому оно подключается, в документации на вольтметр и, как правило, на его шкале указывается ток полного отклонения стрелки. Подходящее добавочное сопротивление подбирается по следующим признакам:

- по коэффициенту расширения предела измерения $R_D = R_B (K - 1)$,
- по максимально допустимому току через R_D , который не должен быть меньше, чем I_{Bmax} , чтобы добавочное сопротивление не перегревалось этим током,
- по характеристикам инструментальной погрешности созданного таким образом нового вольтметра, которая будет складываться из собственной погрешности вольтметра и погрешности добавочного сопротивления, в том числе, возникающей в результате перегрева протекающим по нему током.

С учетом изложенного в документации на добавочное сопротивление приводятся следующие метрологические характеристики:

- номинальное значение сопротивления,
- предел допускаемой основной относительной погрешности (поскольку, по аналогии с п. 4.8.2, аддитивная составляющая пренебрежимо мала по сравнению с мультипликативной),
- максимально допустимое значение силы тока,
- предел допускаемой дополнительной погрешности.

4.8.4. Измерительные трансформаторы тока

Применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного тока. Измерительные трансформаторы тока имеют существенное пре-

имущество перед шунтами, которое заключается в том, что при их применении отсутствует гальваническая связь между первичной обмоткой, включенной в мощную электрическую цепь объекта, и вторичной обмоткой. Разрыв этой гальванической связи способствует обеспечению безопасности персонала, снижению действия помех и облегчает выполнение необходимых соединений

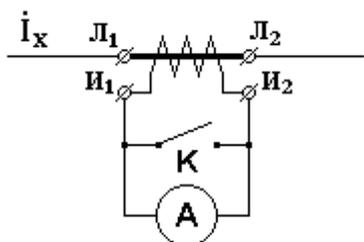


Рис. 34. К применению трансформатора тока

во вторичной цепи. Кроме того в ограниченном частотном диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и мало зависит от внешних влияющих факторов. Схема включения измерительного трансформатора тока в линию с измеряемым током I_x и присоединения амперметра ко вторичной обмотке представлена на рис. 34. На этом

рисунке L_1, L_2 - зажимы первичной обмотки трансформатора, к которым подключена линия, H_1, H_2 - зажимы вторичной обмотки, к которым подключается амперметр, K - ключ, замыкающий вторичную обмотку.

Как известно, опасным режимом для трансформатора тока является режим холостого хода, при котором на вторичной обмотке развивается высокое напряжение, и возможен пробой изоляции. Напротив, благоприятным режимом для трансформатора тока является режим короткого замыкания вторичной обмотки. В связи с этим чрезвычайно важно выполнять следующие правила включения трансформатора тока с амперметром в линию.

Перед включением первичной обмотки в линию вторичная обмотка обязательно должна быть замкнутой на амперметр или ключем K , показанным на рис. 34. Если обмотка была замкнута ключем, то его можно разомкнуть для работы только тогда, когда включен амперметр и проверена целостность его цепи и качество контактов в местах присоединений.

Как уже было сказано, коэффициент преобразования трансформатора тока в ограниченном диапазоне частот равен отношению числа витков обмоток трансформатора и может быть как больше, так и меньше единицы.

Особенностью измерительного трансформатора тока является также то, что в отличие от других трансформаторов тока он имеет нормированные метрологические характеристики:

- пределы изменения силы тока первичной обмотки, подлежащего измерению,
- предел измерения амперметра, включаемого во вторичную обмотку,
- предел допускаемой основной относительной погрешности по амплитуде,
- предел допускаемой основной погрешности по фазе,
- предельные значения сопротивления нагрузки во вторичной обмотке, при которых инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности

- пределы допускаемых дополнительных погрешностей,
- частотный диапазон, в котором инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности.

4.8.5. Измерительные трансформаторы напряжения

Измерительные трансформаторы напряжения применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного напряжения. Применение измерительных трансформаторов напряжения дает те же преимущества перед применением добавочных сопротивлений, что и применение трансформаторов тока (п. 4.8.4). В ограниченном частотном диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и практически не зависит от действия внешних влияющих факторов. С увеличением частоты сверх этого диапазона начинают расти погрешности передачи амплитуды и фазы измеряемого напряжения. Схемы соединений трансформатора напряжения с участком электрической цепи и с вольтметром во вторичной обмотке особенностей не имеют.

Измерительный трансформатор напряжения отличается от других трансформаторов напряжения тем, что он имеет следующие нормированные метрологические характеристики:

- пределы изменения напряжения, действующего на первичной обмотке,
- предел измерения вольтметра, включаемого во вторичную обмотку,
- предел допускаемой основной относительной погрешности по амплитуде,
- предел допускаемой основной погрешности по фазе,
- предельные значения сопротивления нагрузки во вторичной обмотке, при которых инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности
- пределы допускаемых дополнительных погрешностей,
- частотный диапазон, в котором инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности.

6. Цифровые средства измерений

6.1. Цифроаналоговые преобразователи

Примером простейшего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) десятичного кода в аналоговую величину может служить шестидекадный магазин сопротивлений с ручным управлением. Цена единицы младшей декады 0.1 Ом. Выходной величиной этого ЦАП является сопротивление постоянному току, которое соответствует десятичному числу

$$N = (a_0 10^0 + a_1 10^{-1} + a_2 10^{-2} + a_3 10^{-3} + a_4 10^{-4} + a_5 10^{-5}) \cdot 10^4,$$

где коэффициенты $a_i, i = 0, 1, \dots, 5$ принимают значения от 0 до 9 и устанавливаются вручную путем переключения декад магазина. Диапазон изменения выходной величины (сопротивления) $0 \div 99999.9 \text{ Ом}$.

Современные ЦАП с управлением от ЭВМ (процессора) преобразуют в аналоговую величину (напряжение, силу тока, сопротивление, емкость и т.д.) двоичные числа. Упрощенная схема подобного преобразователя представлена на рис. 44. Напряжение на выходе этого ЦАП равно

$$U_{\text{вых}} = 2 \cdot I_0 R \cdot (a_0 2^0 + a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_m 2^{1-m}) \text{ В.}$$

где $a_i, i = 0, 1, \dots, m-1$ - коэффициенты, принимающие значения 0 и 1. Эти коэффициенты реализуются включением и выключением ключей под управлением компьютера в соответствии с программой - драйвером.

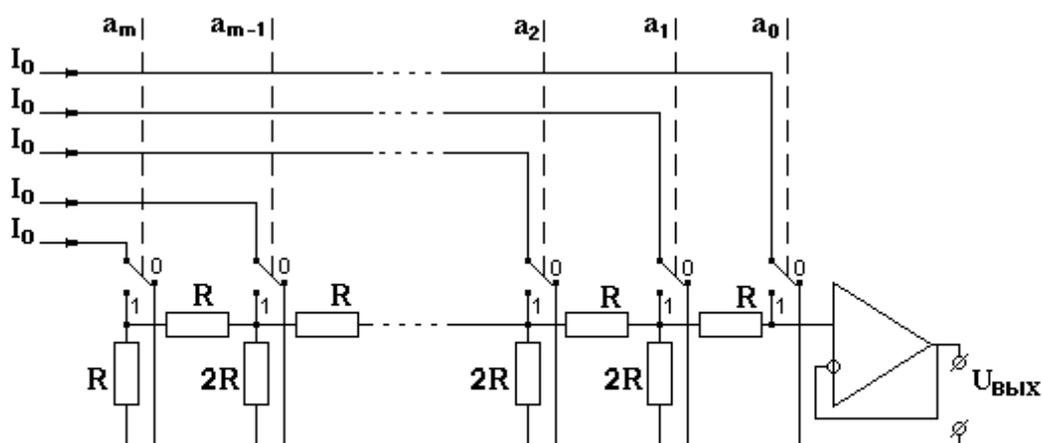


Рис. 44. К принципу действия цифроаналогового преобразователя

Для связи с компьютером применяется один из стандартных интерфейсов. Любой из интерфейсов представляет собой совокупность

- правил обмена информацией (протокол обмена),
- стандартов на параметры информационных и служебных сигналов,
- стандартов на конструкции соединительных устройств.

Конструктивно ЦАП может быть оформлен в виде одной микросхемы, которая в минимальном составе может содержать только цепочку сопротивлений, ключи и усилитель. Однако такой состав не дает возможности нормировать метрологические характеристики, а потому подобные микросхемы не могут выполнять функции средства измерений. Поэтому ЦАП, который может считаться средством измерений, должен содержать в своем составе помимо показанного на рис. 44, как минимум, следующие обязательные компоненты: источник стабильного рабочего тока I_0 и стабилизатор напряжения питания. Помимо этого в каждом ЦАП, предназначенном для совместной работы с компьютером (процессором) должно быть предусмотрено устройство интерфейсного сопряжения

с компьютером и устройство гальванической развязки по цифровому входу/выходу, как это схематически показано на рис. 45.



Рис. 45. Состав ЦАП, сопрягаемого с компьютером

Источниками погрешности ЦАП являются: неточность изготовления сопротивлений, нестабильность рабочего тока и нестабильность питания. Кроме того при переключениях ключей возникают переходные процессы. Поэтому требуется задержка на время затухания этих процессов между моментом подачи входного кода и моментом считывания значения выходного сигнала.

Метрологические характеристики ЦАП.

1. Количество разрядов.
2. Диапазон изменения выходного сигнала.
3. Характеристики основной погрешности.
4. Характеристики дополнительных погрешностей.
5. Цена единицы младшего разряда входного кода.
6. Время установления выходного сигнала при смене входного кода.
7. Выходное сопротивление.

Кроме перечисленных могут дополнительно нормироваться следующие характеристики.

8. *Интегральная нелинейность* - максимальное отклонение значений функции преобразования ЦАП от номинальной линейной функции, нормируется в %% от верхнего значения выходного сигнала.

9. *Дифференциальная нелинейность* - погрешность единицы младшего разряда входного кода, нормируется в %% от верхнего значения выходного сигнала.

В редких случаях для контроля работы ЦАП может быть предусмотрена индикация входных кодов. Для этой цели служат дешифратор и индикатор.

Применение ЦАП:

- при построении аналого - цифровых преобразователей,
- при построении калибраторов постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления, силы тока, емкости, индуктивности и др.,
- при построении систем регулирования и моделирования,

- в технике воспроизведения цифровой записи звука и видеоизображения.

Иногда ЦАП может применяться в качестве умножающего устройства для перемножения значения силы тока I_0 на входной код.

6.2. Аналого - цифровые преобразователи

6.2.1. АЦП поразрядного уравнивания

АЦП поразрядного уравнивания, принцип действия которого поясняется рис. 46, является довольно популярным. При запуске АЦП компаратор начинает сравнивать входное (преобразуемое) напряжение с напряжением, поступающим с выхода ЦАП, которое в начальный момент равно 0. Компаратор вырабатывает сигнал “больше”, по которому устройство управления устанавливает значение коэффициента $a_0 = 1$, тем самым устанавливая старший разряд ЦАП в ‘1’. После этого компаратор вновь сравнивает входное напряжение U_x с напряжением, поступающим с выхода ЦАП. Если входное напряжение вновь оказывается больше напряжения с ЦАП, то компаратор вновь вырабатывает сигнал "больше", и устройство управления устанавливает коэффициент $a_1 = 1$, тем самым включается следующий разряд ЦАП. В противном случае, если измеряемое напряжение оказывается меньше, чем напряжение ЦАП, то устройство управления устанавливает $a_0 = 0, a_1 = 1$. Такие операции повторяются до тех пор, пока не будут опрошены все разряды ЦАП. По окончании процедуры во всех линиях, идущих от устройства управления к ЦАП, формируются коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_m в виде наличия или отсутствия напряжения в каждой из них. Полученные коэффициенты, то есть двоичный код переписывается в выходной регистр и далее, в соответствии с протоколом обмена - в компьютер (процессор).

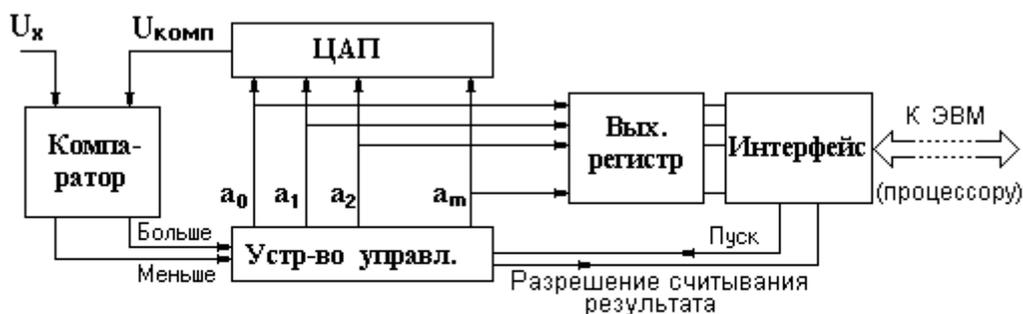


Рис. 46 . К принципу действия аналого-цифрового преобразователя поразрядного уравнивания

Основная погрешность таких АЦП определяется:

- конечной чувствительностью компаратора, погрешностями изготовления сопротивлений в ЦАП и ограниченным количеством разрядов - аддитивная составляющая погрешности,

- погрешностью рабочего тока ЦАП - мультипликативная составляющая погрешности.

Поэтому в общем случае основная погрешность АЦП поразрядного уравнивания нормируется предельно допустимой относительной погрешностью, которая выражается двучленной формулой.

Динамической характеристикой АЦП поразрядного уравнивания является длительность цикла преобразования или обратная величина - частота преобразования. Погрешность датирования отсчетов или апертурное время таких АЦП не превышает длительности цикла преобразования.

В настоящее время АЦП поразрядного уравнивания обладают следующими предельно достижимыми характеристиками: максимальная частота измерений от 50 Гц (при 24 двоичных разрядах) до 400 МГц (при 8 двоичных разрядах).

6.2.2. АЦП развертывающего преобразования

АЦП развертывающего преобразования представляет собой, по сути дела, два последовательно включенных преобразователя: один преобразует напряжение в интервал времени, второй - интервал времени в код.

Принцип действия АЦП поясняется на рис. 47.

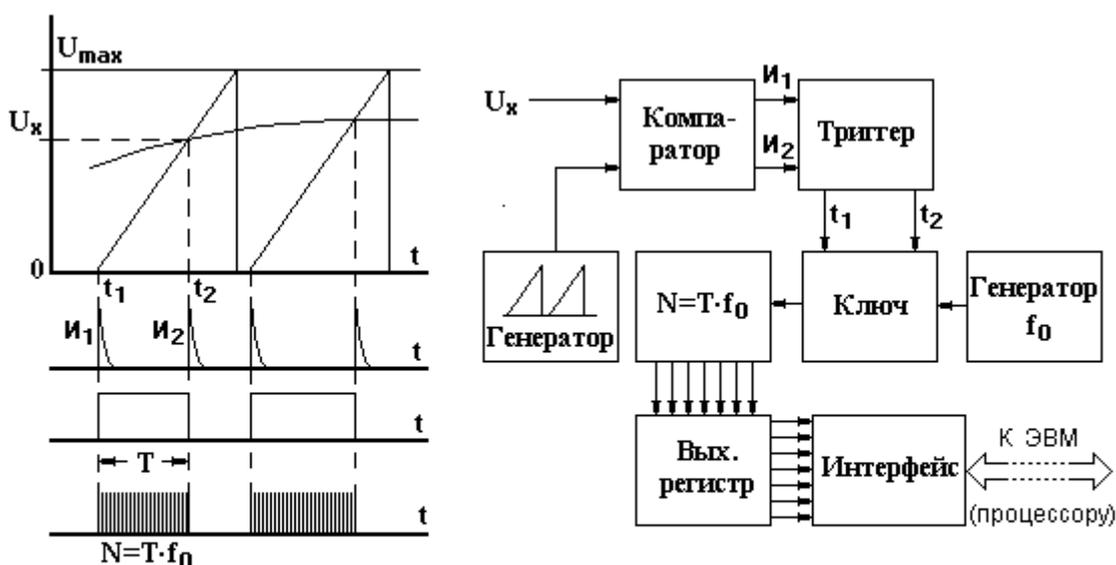


Рис. 47. К принципу действия АЦП развертывающего преобразования

На вход компаратора подаются: входное напряжение U_x , подлежащее преобразованию, и периодическое линейно нарастающее напряжение $u(t) = U_{max}(t - t_1 + kt_{nep})$, $t_1 \leq t \leq t_{max}$, где t_{max} удовлетворяет условию

$u(t_{max}) = U_{max}$, t_{nep} - период. Компаратор вырабатывает импульсы: импульс I_1 - в момент t_1 начала линейного напряжения, и импульс I_2 - в момент t_2 , когда напряжение $u(t)$ сравнивается с напряжением U_x . Таким образом выполняется первая ступень преобразования, а именно, преобразование U_x в интервал времени $T = t_2 - t_1$.

Точно на это время открывается ключ и пропускает сквозь себя импульсы стабилизированной частоты f_0 от генератора этой частоты в счетчик. В счетчике формируется код (двоичный или десятичный - в зависимости от устройства счетчика), который поступает в выходной регистр и далее через устройства интерфейса в компьютер. Поскольку длительность интервала времени прямо пропорциональна входному напряжению, количество этих импульсов равно

$$N = T \cdot f_0 = K \cdot f_0 \cdot U_x.$$

Основная погрешность подобных АЦП определяется качеством линейно нарастающего напряжения, в частности, погрешностью воспроизведения коэффициента его наклона K , а также конечной чувствительностью компаратора, его шумами. В силу высокой точности воспроизведения частоты мультипликативная погрешность, вызванная нестабильностью частоты f_0 , обычно пренебрежимо мала. Погрешность коэффициента наклона K также вызывает мультипликативную погрешность, остальные источники порождают аддитивную составляющую погрешности, и основная относительная погрешность АЦП развертывающего преобразования нормируется двучленной формулой.

Длительность цикла преобразования АЦП развертывающего преобразования равна периоду пилообразного напряжения, а частота преобразования - частоте этого напряжения. Погрешность датирования отсчетов таких АЦП не превышает длительности цикла преобразования.

6.2.3. АЦП “частота - код”

АЦП подобного вида представляют собой основу для построения цифровых частотомеров, а также самостоятельных АЦП, предназначенных для ввода частоты или сигналов, модулированных по частоте, в компьютер. Принцип действия этого АЦП основан на определении частоты, как количества импульсов (или количества периодов периодического сигнала) в единицу времени, и поясняется на рис. 48.

Из входного периодического сигнала (например, синусоиды, как показано на рис. 48) формирователь образует последовательность импульсов, частота которых равна частоте входного сигнала. Ключ открывается на определенное

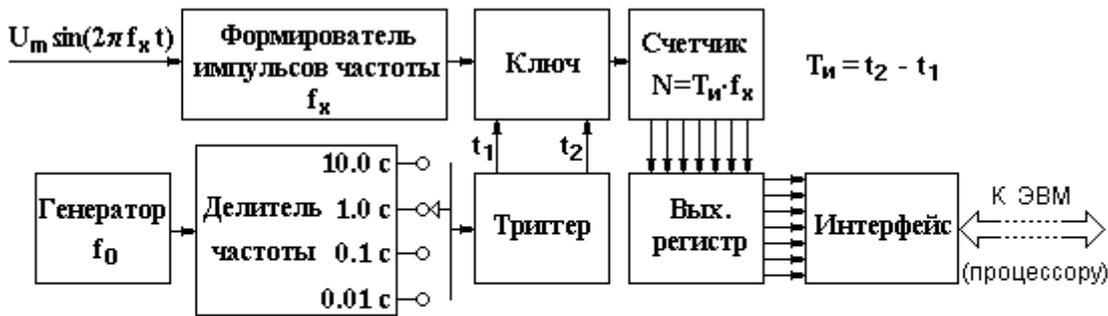


Рис. 48. К принципу действия преобразователя "частота - код"

время, которое задается генератором стабильной частоты f_0 и делителем частоты. Делитель частоты выполнен переключаемым с тем, чтобы иметь возможность изменять время измерений T_u в зависимости от измеряемой частоты и желаемой точности результата.

Счетчик накапливает прошедшие сквозь ключ импульсы в количестве $N = T_u \cdot f_x$ и тем самым формирует код, двоичный или десятичный - в зависимости от его устройства. Двоичный код передается затем в выходной регистр и далее через устройства интерфейса, снабженные гальванической развязкой, - в компьютер.

Поскольку в данном АЦП измерение выполняется посредством счета импульсов, неизбежна абсолютная погрешность измерения, равная одному импульсу. Относительное значение этой погрешности равно отношению периода измеряемой частоты $T_x = 1/f_x$ к времени измерения T_u , то есть $1/(T_u \cdot f_x)$.

Если при этом во время измерения T_u измеряемая частота изменялась, то результатом измерения будет среднее значение частоты за это время.

В конечном итоге погрешность подобного АЦП вызывается следующими причинами:

- нестабильностью частоты генератора f_0 , задающего время измерений,
- соотношением между измеряемой частотой f_x и временем измерения T_u .

Для таких АЦП нормируется основная относительная погрешность пределом допускаемых значений:

$$\gamma \leq \left(\gamma_{f_0} + \frac{1}{f_x T_u} \right) \cdot 100\%,$$

где γ_{f_0} - относительная погрешность (нестабильность) частоты f_0 .

Динамической характеристикой АЦП "частота - код" является время измерения. Погрешность датирования отсчетов подобных АЦП не превышает времени измерения.

6.2.4. АЦП “интервал времени - код”

АЦП данного типа применяются для преобразования в код интервала времени между двумя импульсами или длительности импульсов. В том числе подобные АЦП могут использоваться для преобразования в код периода периодического сигнала с дальнейшим вычислением частоты этого сигнала, как величины, обратной периоду. Такое преобразование занимает гораздо меньше времени, чем преобразование частоты в код, описанное выше в п. 6.2.3. Принцип действия подобного АЦП показан на рис. 49.

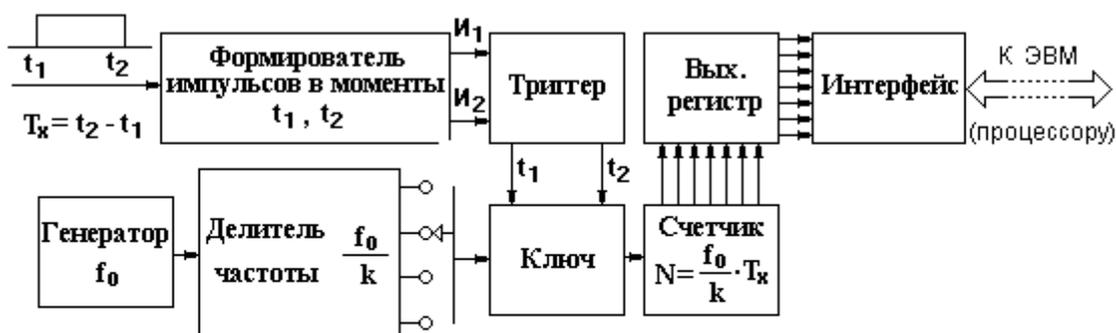


Рис. 49. К принципу действия преобразователя "интервал времени - код"

В моменты t_1, t_2 начала и окончания интервала времени, подлежащего измерению, формирователь вырабатывает импульсы, которые поступают на вход триггера, открывающего ключ на время $T_x = t_2 - t_1$. За это время ключ пропускает на счетчик $N = \frac{f_0}{k} T_x$ импульсов от делителя стабильной частоты, и в этом счетчике формируется код, который затем передается в выходной регистр и далее через интерфейсное сопряжение и гальваническую развязку - в компьютер.

Происхождение погрешностей этого АЦП то же, что и в п. 6.2.3. Абсолютная погрешность счета импульсов частоты, заполняющей измеряемый интервал, равна одному импульсу. Относительная погрешность равна отношению периода

частоты $T_0 = \frac{k}{f_0}$ интервалу времени T_x , то есть $\frac{k}{f_0 T_x}$. Поэтому для таких АЦП

нормируется основная относительная погрешность:

$$\gamma \leq \left(\gamma_{f_0} + \frac{k}{f_0 \cdot T_x} \right) \cdot 100\%.$$

Длительность цикла преобразования такого АЦП равна длительности измеряемого интервала времени, и погрешность датирования отсчетов ее не превышает. В этом отношении применение подобных АЦП для измерения частоты

путем измерения периода предпочтительнее, чем применение АЦП "частота - код".

6.2.5. Интегрирующие АЦП

Интегрирующие АЦП предназначены для преобразования в код медленно меняющегося напряжения с подавлением помех от сети питания. С этой целью первым действием таких АЦП является интегрирование входного напряжения в течение целого количества периодов помехи. В это время на вход интегратора подается измеряемое напряжение (см. рис.50). Если запуск АЦП состоялся в момент времени t_1 , то момент окончания интегрирования есть $t_2 = t_1 + n \cdot T$, где T - период напряжения помехи.

Поскольку частота напряжения сети незначительно колеблется относительно 50 Гц, и АЦП питаются от сети, моменты начала и конца интегрирования синхронизируются от сети, и поэтому время интегрирования в точности равно целому числу периодов напряжения сети: $T_{инт} = t_2 - t_1 = n \cdot T$.



Рис. 50. К принципу действия интегрирующего АЦП

В момент окончания интегрирования t_2 входные цепи интегратора переключаются так, чтобы на его вход вместо измеряемого напряжения U_x поступило стабилизированное напряжение U_0 с противоположным знаком (что условно показано на рис.50). Начиная с этого момента, из напряжения, полученного в результате интегрирования, начинает вычитаться линейное напряжение, которое является продуктом интегрирования постоянного стабилизированного напряжения U_0 . Компаратор фиксирует момент времени конца интегрирования входного напряжения t_2 и момент времени t_3 , когда суммарное напряжение оказывается равным нулю. В результате интервал времени $t_3 - t_2$ оказывается прямо пропорциональным интегралу от входного напряжения, вычисленному за предыдущий интервал времени. Если за это время напряжение U_x , свободное от помехи, не изменялось, то этот интеграл в свою очередь прямо пропорционален измеряемому напряжению и равен $n \cdot T \cdot U_x$. Поэтому интервал времени

$t_3 - t_2$ прямо пропорционален напряжению U_x , и в конечном итоге для завершения преобразования остается лишь перевести этот интервал времени в код, предусмотрев умножение на коэффициент пропорциональности. Это делается за счет подбора частоты f_0 , которой заполняется интервал времени $t_3 - t_2$.

По окончании описанных процедур устройство управления формирует сигнал, разрешающий чтение результата из выходного регистра АЦП.

Из принципа действия интегрирующего АЦП следует, что минимальное время преобразования не может быть меньше 40 мс. Предельно достижимая погрешность подобных АЦП достигает 0.001% и лучше.

Основная погрешность таких АЦП нормируется пределом допускаемой относительной погрешности, выраженным двучленной формулой.

Основная область применения интегрирующих АЦП - создание на их основе цифровых измерительных приборов повышенной точности.

6.2.6. Метрологические характеристики АЦП

В соответствии с ГОСТ 8.009 метрологическими характеристиками АЦП являются (см. также п. 3.5.8.):

1. диапазон изменения входного напряжения,
2. вид выходного кода и количество разрядов,
3. входное сопротивление,
4. цена единицы младшего разряда выходного кода,
5. предел допускаемой основной погрешности (как правило, относительной, нормируемой двучленной формулой),
6. пределы допускаемых дополнительных погрешностей,
7. длительность цикла преобразования (или максимальная частота преобразований).

В некоторых случаях к этим характеристикам добавляются

8. интегральная нелинейность (см. характеристику 8 п. 6.1),
9. дифференциальная нелинейность (см. характеристику 9 п. 6.1).

6.2.7. Связь АЦП с компьютером

Связь АЦП с компьютером осуществляется в соответствии с протоколами обмена информацией, который стандартизован для того или иного интерфейса.

Наиболее популярными интерфейсами, обеспечивающими взаимную связь между компьютером и автономным АЦП, являются **RS 232 (COM - порт), RS 485, USB, IEEE 488, IEEE 1394**.

Для АЦП, встраиваемых в компьютеры, интерфейсом является интерфейс компьютера, а именно, интерфейс **PCI** или интерфейс портативных компьютеров (ноутбуков) **PCMCIA**.

Сравнительные характеристики интерфейсов приведены ниже в таблице 2.

Внутренние интерфейсы компьютера имеют характеристики:

- **PCI** - от 4 до 20 входов в промышленных компьютерах, скорость обмена 132 Мбайта/с,

- **PCMCIA** - до 3 входов в портативных компьютерах, скорость обмена - до 1.0 Мбайта/с.

Таблица 2

Сравнительные характеристики интерфейсов для автономных АЦП

Тип интерфейса	RS 232	RS 485	USB
Скорость обмена	30 бит/с 115Кбит/с	- До 10 Мбайт/с	До 12 Мбит/с
Кол-во устройств	1	31	127
Кол-во проводов	9	9	4
Расстояние	17 м	1200 м	5 м

6.3. Цифровые измерительные приборы

Цифровые измерительные приборы отличаются от измерительных преобразователей тем, что выходные данные приборов должны быть представлены человеку - оператору в удобной для него форме. Поэтому для построения цифровых измерительных приборов используются АЦП, снабженные средствами

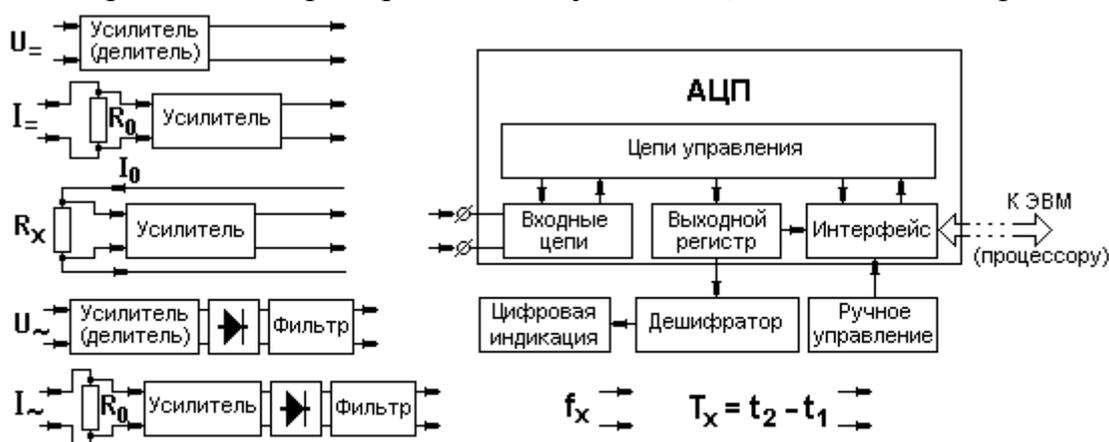


Рис. 51. Варианты цифровых измерительных приборов

ручного управления и визуального представления результатов измерений, как это показано на рис. 51. Цифровые приборы некоторых типов снабжены устройствами интерфейсного сопряжения с компьютером, которые передают в компьютер результаты измерений, а также служебную информацию о позиции, в которой находятся средства ручного управления. Чаще всего для связи приборов с компьютером применяется приборный интерфейс IEEE 488.

На рисунке 51 представлены возможные варианты цифровых измерительных приборов. Самые простые варианты без подключения преобразователей на входе - это частотомеры и периодомеры, которые создаются на базе соответ-

вующих АЦП, описанных выше в пп. 6.2.3, 6.2.4. Частотомеры и периодометры обычно совмещаются в одном корпусе.

На базе АЦП других разновидностей - поразрядного уравнивания, развертывающего преобразования, интегрирующих могут быть созданы вольтметры и амперметры постоянного и переменного тока, а также омметры. Для этого к АЦП присоединяются входные преобразователи, показанные в левой части рис. 51. Обычно в одном корпусе с АЦП помещаются несколько преобразователей, каждый из которых присоединяется к АЦП с помощью переключателя, управляемого вручную или от компьютера. Подобные приборы называются *мультиметрами*. Наиболее точные мультиметры, предназначенные для измерения постоянного напряжения, силы постоянного тока и сопротивления создаются на базе интегрирующих АЦП.

В последнее время вольтметры и амперметры переменного тока создаются без выпрямительных преобразователей. Принцип действия таких приборов заключается в выполнении измерений в два этапа.

На первом этапе выполняются очень быстрые измерения мгновенных значений входного переменного напряжения или силы тока. Частота измерений должна превышать частоту первой гармоники измеряемого сигнала в несколько десятков раз. На втором этапе по результатам этих измерений выполняются вычисления требуемых характеристик, а именно, амплитудных, действующих или средневыпрямленных значений. Результаты таких измерений не будут зависеть от формы кривой напряжения или тока, и при достаточной скорости измерений мгновенных значений время измерений не превысит одного периода измеряемого сигнала.

Цифровые измерительные приборы других физических величин создаются подсоединением на входе АЦП измерительных преобразователей этих величин в напряжение, силу тока, частоту, интервал времени или в изменение сопротивления. Естественно, что цифровой индикатор и средства ручного управления остаются. Наличие интерфейсного сопряжения с компьютером не обязательно.

Метрологические характеристики цифровых измерительных приборов те же, что и метрологические характеристики АЦП, перечисленные в п. 6.2.6. за исключением характеристик интегральной и дифференциальной нелинейности.

7. Средства и методы измерений неэлектрических величин

7.1 Средства и методы измерения температуры

Будут рассмотрены основные первичные преобразователи (датчики, сенсоры) температуры, применяемые в промышленности. Эти датчики делятся на две группы: *генераторные* и *параметрические*. Генераторные датчики основаны на применении термоэлектрического эффекта, открытого в 1823 году Зеебеком. Эти датчики не требуют питания, поскольку являются источниками термоэдс,

которая возникает вследствие разности работы выхода электронов из разных металлов.

Принцип действия параметрических датчиков температуры заключается в использовании зависимости от температуры сопротивления, которое оказывают металлы электрическому току. Поэтому практическое применение параметрических датчиков невозможно без источника тока.

7.1.1. Термоэлектрические датчики температуры

Термоэлектрический промышленный датчик температуры, как правило, представляет собой два провода из различных металлов, одни концы которых соединены между собой (так называемые *горячие концы*), а вторые концы (*холодные концы*) подводят термоЭДС ко входу последующих приборов, измеряющих эту термоЭДС, либо ко входу вторичных электронных измерительных преобразователей. Эти два провода со спаянными концами называются *термопарой*. Для защиты горячих концов термопары от воздействия среды, в которую погружается датчик и которая может оказаться абразивной или агрессивной, эти концы обычно размещаются внутри оболочки, которая заполняется сыпучим электроизоляционным материалом, фиксирующим положение горячего конца термопары относительно защитного корпуса.

Поскольку термоЭДС зависит от разности температур горячих и холодных концов термопары:

$$E(t^{\circ}) = f(t^{\circ}) - f(t_0^{\circ}),$$

в идеальном случае холодные концы термопары должны находиться при температуре тающего льда, то есть при $t_0^{\circ} = 0^{\circ}C$, как это показано на рис. 54 а. Однако, такая температура в промышленных условиях не может воспроизводиться постоянно. Поэтому в реальных ситуациях применяют один из двух приемов компенсации температуры холодных спаев термоэлектрического датчика температуры, показанных на рис. 54 б, в.

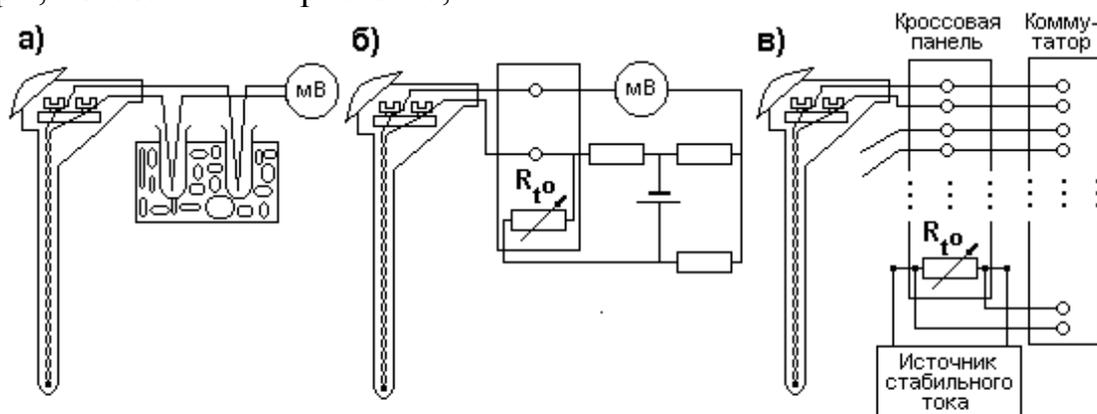


Рис. 54. Схемы включения термопар

Первый из этих приемов заключается в следующем. Холодные концы приходят на зажимы, расположенные при одинаковой температуре. Отсутствие градиента температуры между зажимами обеспечивается благодаря заключению этих зажимов в закрытый ящик или за счет подкладывания массивной медной плиты под плату с зажимами. В ящик или на плиту устанавливается медный термометр сопротивления $R_{t^{\circ}}$, включенный в мост. Этот мост уравнивается при температуре термометра сопротивления, равной нулю. Если температура места подсоединения холодных спаев отличается от нуля, в измерительной диагонали моста возникает напряжение, которое компенсирует это отличие.

Второй прием применяется в случаях, когда с помощью одного прибора или ИИС выполняются измерения температуры в нескольких точках объекта. В этих случаях холодные концы термопар подводятся к одной кроссовой панели, снабженной системой выравнивания температуры во всех точках панели. На этой кроссовой панели устанавливается медный термометр сопротивления $R_{t^{\circ}}$, через который протекает стабильный ток I_0 . Все каналы измерения температуры опрашиваются коммутатором, в том числе в каждом цикле опроса опрашивается также канал измерения температуры кроссовой панели, и стало быть холодных концов всех термопар. Результат этого измерения используется микропроцессором или компьютером для того, чтобы вычислить и ввести поправку на температуру холодных спаев во все результаты измерений.

Материалы, из которых изготавливаются промышленные термопары: платина, сплавы платины с родием, хромель, копель и алюмель. Для высокотемпературных термопар применяется сплав вольфрама с рением. Функции преобразования (градуировочные характеристики) стандартных термопар приведены в ГОСТ 3044. Конструктивное исполнение (диаметр, длина погружаемой части, крепежные размеры и т.д.) приведены в ГОСТ 6616. В таблице 3 приводятся основные характеристики наиболее распространенных промышленных термоэлектронных датчиков температуры.

Таблица 3.

Характеристики термоэлектронных датчиков температуры

Тип датчика	Пределы измерений °С	Выходное напряжение мВ	Пост. врем. с	Абсолютная погрешность мВ	Абсол. погр. °С
ТПП платина-плат.-родий (10% родия)	(-20 ÷ 1300) Кратковременно - до 1600	0 ÷ 13	40.0 60.0 210.0	$0.01 + 2.5 \cdot 10^{-5} t^{\circ} - 300 $	(1÷3)
ТПР плат.-родий (6% родия) плат.-родий	(300 ÷ 1600) Кратковременно до 1800	0 ÷ 11	40.0 60.0 210.0	$0.01 + 3.3 \cdot 10^{-5} t^{\circ} - 300 $	(1÷5)

(30%родия)					
ТХА хромель- алюмель	(-50 ÷ 1000) Кратковремен- но до 1300	-1.86 ÷ 41	40.0 60.0 210.0	$0.16 + 2 \cdot 10^{-4} t^{\circ} - 300 $	(3 ÷ 10)
ТХК хромель- копель	(-50 ÷ 600) Кратковремен- но до 800	-3 ÷ 49	40.0 60.0 210.0	$0.2 + 6 \cdot 10^{-4} t^{\circ} - 300 $	(2 ÷ 6)
Вольфрам- рений 5% - 20%	0 ÷ 2200 Кратковремен- но до 2500	0 ÷ 34	40.0 60.0 210.0	$0.08 + 4 \cdot 10^{-5} t^{\circ} - 1000 $	(5 ÷ 10)

Обычно на промышленных предприятиях датчик бывает удален от прибора или системы на расстояние до километра. Такая ситуация характерна, например, для атомных электростанций. Поэтому использовать в качестве линий связи датчика с прибором те же провода, из которых выполнена термопара, в ряде случаев невыгодно. Особенно это относится к платиновым и платинородиевым термопарам. Поэтому для соединения термопар с прибором или системой используются *удлинительные термоэлектроды*. Эти электроды должны удовлетворять двум условиям.

Первое условие - места присоединения удлинительных электродов к основным термоэлектродам (обычно - в головке термопары, см. рис. 54) должны иметь одинаковую температуру.

Второе условие - удлинительные электроды должны иметь ту же термоэдс в местах присоединения, которую имеют в этих местах основные электроды (обычно в диапазоне температур от 0°C до 200°C).

Для платиновых термопар применяются удлинительные термоэлектроды из меди, для термопары ТХА - из меди и константана, для ТХК - основные термоэлектроды, выполненные в виде гибких проводов.

Из таблицы 3 следует, что промышленные термопары, заключенные в массивные оболочки, предназначены для измерения практически постоянной или очень медленно изменяющейся температуры. Однако в ряде случаев в народном хозяйстве, а также при научных исследованиях возникает задача измерения быстроизменяющихся температур, спектр которых распространяется до частот порядка 50 ÷ 80 Гц. Для измерения таких температур применяются сверхминиатюрные термопары, в том числе, открытые. Эти термопары изготавливаются из проволоки диаметром 10 ÷ 20 мкм, диаметр горячего спая достигает 0,2 мм. Постоянная времени подобных термопар составляет величины порядка 0.003 ÷ 0.01 с. Схемы включения подобных термопар аналогичны схемам, показанным на рис. 54.

Основные источники погрешностей измерения температуры с помощью термопар:

- погрешности применения, вызванные неверным монтажом, ошибками в заглублении термопар, движением среды и др.,

- инструментальные погрешности, вызванные собственным сопротивлением основных термоэлектродов, погрешностями компенсации температуры холодных спаев, погрешностями и разбросом характеристик, окислением термоэлектродов.

7.1.2. Термометры сопротивления проволочные

Термометры сопротивления суть параметрические датчики температуры, поскольку от температуры зависит параметр резистора, а именно, его сопротивление постоянному току. Градуировки промышленных термометров сопротивления приводятся в ГОСТ 3044, а конструктивные параметры (диаметр оболочки, глубина погружения, крепежные размеры и прочее) приводятся в ГОСТ 6651. Наиболее популярными являются два вида термометров сопротивления - платиновый и медный. Их основные характеристики приведены в таблице 4.

Поскольку датчики параметрические, для измерения их параметра - сопротивления через них приходится пропускать ток и измерять падение напряжения на этом сопротивлении U_R . Сила тока, рекомендуемая действующей нормативной документацией для пропускания через термометр сопротивления, выбирается из ряда:

0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0 мА.

Понятно, что при этом нельзя допускать перегрева термосопротивления, ибо этот перегрев будет вызывать погрешность результата измерений. Допустимый перегрев указан в таблице 4, и верхнее значение допустимой силы тока может быть получено из формулы: $I \leq 2 \cdot d \cdot \sqrt{d \cdot \Delta t^{\circ}}$, где Δt° - температура перегрева, d - диаметр провода (мм), из которого изготовлено термосопротивление.

Таблица 4

Характеристики промышленных термометров сопротивления

Тип термометра	Класс точности	Пределы измерения °С	Абсолютная погрешность °К	Сопротивление при $t^{\circ} = 0$ Ом	Температура собств. нагрева	Пост. времени с
ТСП платиновый	I	(-200 ÷ 0)	$0,15 + 3 \cdot 10^{-3} \cdot t^{\circ}$	10 Ом 46 Ом	< 0,2°С	9 80
		(0 ÷ 600)	$0,15 + 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^{\circ}$			
	II	(-200 ÷ 0)	$0,3 + 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^{\circ}$	100 Ом		
		(0 ÷ 600)	$0,3 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{\circ}$			
ТСМ медный	I	(-50 ÷ 180)	$0,3 + 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^{\circ}$	53 Ом 100 Ом	< 0,4°С	9 80 240
	II	(-50 ÷ 180)	$0,3 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{\circ}$			

При нулевой температуре сопротивление терморезистора не равно нулю. Поэтому схема включения термометра сопротивления должна быть такой, чтобы при нулевой температуре выходной сигнал этой схемы был равен нулю. Это достигается двумя способами.

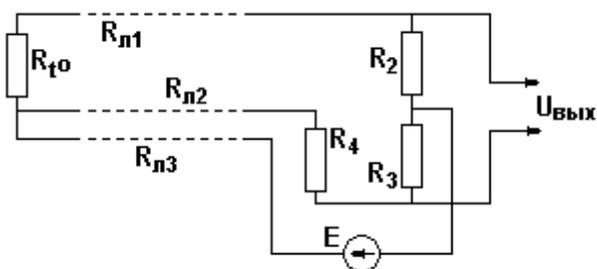


Рис. 55. Схема включения в мост удаленного термосопротивления

Первый из них заключается в том, что термометр сопротивления включается в мост, который уравнивается при температуре термосопротивления, равной нулю, и при других температурах работает в неравновесном режиме. Схема такого моста приведена на рис. 55. Здесь учтено удаление датчика от остальной части схемы на значительное расстояние,

и поэтому применяется трехпроводное включение датчика, такое, чтобы сопротивления линий связи $R_{Л1}$, $R_{Л2}$ влияли на результат измерения в минимальной степени. В самом деле, сопротивление $R_{Л3}$ на результат измерения не влияет вообще. Сопротивления двух других линий $R_{Л2}$, $R_{Л3}$, включены в противоположные плечи моста, и их влияние исключается практически полностью при условии $R_{Л1} = R_{Л2}$.

Другой способ достижения нулевого выходного сигнала при нулевой температуре реализуется численным методом, для чего в составе средства измерений должен быть предусмотрен микропроцессор или компьютер. В этом случае удаленный терморезистор подсоединяется к прибору или системе по четырехпроводной схеме, показанной на рис. 56. В этой схеме при условии применения

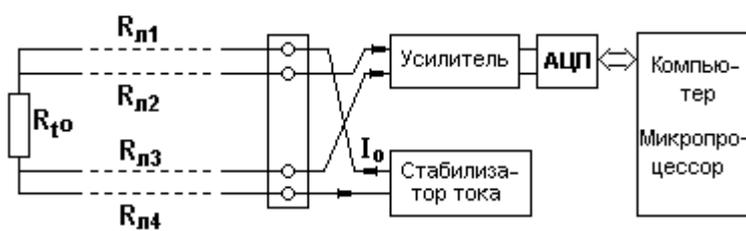


Рис. 56. Четырехпроводная схема включения удаленного термометра сопротивления

усилителя с очень большим входным сопротивлением размером от 1.0 до 10.0 МОм и более влияние соединительных проводов и контактов устраняется практически полностью, поскольку их сопротивление пренебрежимо мало

по сравнению с входным сопротивлением усилителя.

Нулевое выходное напряжение при нуле температуры достигается вычитанием из каждого результата падения напряжения на сопротивлении $R_{т0}$, которое возникает при $t^{\circ} = 0^{\circ} C$.

7.1.3. Полупроводниковые термометры сопротивления

Полупроводниковые терморезисторы (*терморезисторы*) отличаются от металлических меньшими габаритами, обратной зависимостью сопротивления от температуры, сильной нелинейностью этой зависимости и большим по абсолютной величине температурным коэффициентом сопротивления.

Зависимость сопротивления полупроводниковых терморезисторов от температуры удовлетворительно описывается формулой

$$R_{t^{\circ}} = A \cdot e^{B/t^{\circ}},$$

где A - коэффициент, имеющий размерность сопротивления (Ом), B - коэффициент, имеющий размерность температуры.

Номинальное значение сопротивления терморезисторов нормируется для различных температур: $20^{\circ}C$ и $150^{\circ}C$ и колеблется в широких пределах: от единиц Ом до сотен кОм. Вследствие малых габаритов терморезисторов их постоянная времени зависит от конструктивных особенностей и изменяется в пределах $(0.1 \div 30)$ с.

Недостатком полупроводниковых терморезисторов является значительный разброс характеристик и невысокая стабильность параметров во времени. По этим причинам терморезисторы применяются, как правило, в качестве чувствительного элемента магнитного реле.

7.1.4. Другие виды термометрических измерений

7.1.4.1. Пирометры

В ряде отраслей промышленности, например, в металлургии возникает необходимость бесконтактного измерения температуры. Это происходит в случаях недоступности объекта или когда температура объекта слишком высока, и взаимодействующий с ним датчик может выйти из строя, в частности, расплавиться. В этих случаях применяют средства измерений, в которых реализуются пирометрические методы измерения температуры, или методы, основанные на тепловидении.

К пирометрическим методам измерения температуры относятся *пирометры полного излучения (радиационные пирометры)*, *пирометры частичного излучения (яркостные пирометры)* и *пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры)*.

Принцип действия радиационных пирометров основан на том, что по закону Стефана-Больцмана интегральная мощность излучения абсолютно черного тела (АЧТ) зависит от температуры: $M_T^0 = \sigma \cdot T^4$, где $\sigma \cong 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{ К}^4)$. Однако для реального тела эта зависимость может сильно изменяться в зависимости от состояния его поверхности и от материала. Пирометр, отградуирован-

ный по излучению АЧТ, покажет в реальности радиационную температуру $T_p = \sqrt[4]{\varepsilon} \cdot T$, где $0.04 \leq \varepsilon \leq 1$ - коэффициент теплового излучения.

Схема радиационного пирометра представлена на рис. 57 а. Пределы измерения такого пирометра ($400 \div 3000$)°С. Излучение объекта воспринимается

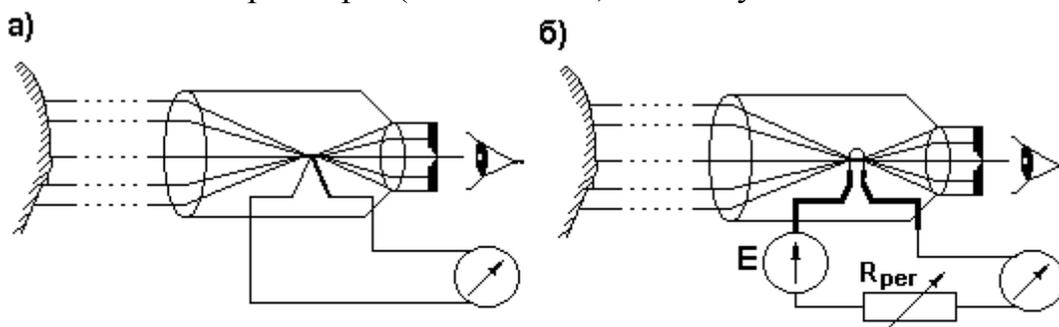


Рис. 57. Принципиальная схема пирометров: радиационного а) и яркостного б)

пирометром, фокусируется и попадает на термопару, находящуюся в фокусе линзы. Возникающая термоЭДС пропорциональна температуре, при которой находится термопара. Эта термоЭДС измеряется любым милливольтметром. Задачей оператора является наведение объектива пирометра на объект.

В яркостных пирометрах используется зависимость мощности излучения от температуры в ограниченном диапазоне длин волн излучения. В таких пирометрах обычно используется красный светофильтр, пропускающий излучения с длинами волн ($0.648 \div 0.664$) мкм. И здесь мощность излучения зависит от материала излучающего объекта и от состояния его поверхности. Так, для полированной меди коэффициент теплового излучения равен 0.03, для вольфрама 0.6, для окисленного железа $0.6 \div 0.9$, для силикатных огнеупоров 0.9.

Принцип действия яркостного пирометра показан на рис. 57 б. В фокусе линзы находится образцовая нить, которая нагревается от источника тока, проходящего через регулировочное сопротивление R_{per} . Оператор регулирует этим сопротивлением ток до тех пор, пока нить не окажется неразличимой на фоне изображения излучающего тела. Этот ток измеряется и по его величине судят о температуре объекта с учетом его материала и качества поверхности. Пределы измерения таких пирометров от 300°С до 6000°С.

В настоящее время для бесконтактного измерения температуры применяются методы тепловидения. В тепловизионных пирометрах в фокусе приемной линзы находится матрица, составленная из теплочувствительных элементов, выходные сигналы которых сканируются и передаются для дальнейшей обработки в микропроцессор или компьютер. Разрешающая способность таких пирометров достигает 0.1°C .

Недостатком всех бесконтактных пирометров является сильная зависимость результатов измерений от коэффициента теплового излучения объекта, значение которого известно с ограниченной точностью. Достоинство бескон-

тактных пирометров - отсутствие непосредственного взаимодействия с объектом, вследствие чего тепловое поле объекта при измерении температуры не искажается. Кроме того с помощью подобных пирометров удастся измерить, правда, с невысокой точностью температуру таких труднодоступных объектов, как планеты солнечной системы или даже звезды.

7.1.4.2. Термоанемометры

Термоанемометры служат для измерения скорости и объемного расхода негорючих газов и жидкостей. Метод основан на сносе тепла от нагретого предмета (терморезистора) движущимся потоком. Уравнение теплового баланса терморезистора, находящегося в движущейся среде, имеет вид:

$$I^2 R = \xi \cdot S \cdot (T_p - T_c),$$

где I - сила тока через терморезистор, R - его сопротивление, S - площадь поверхности терморезистора, T_p и T_c - температура терморезистора и температура среды соответственно, ξ - коэффициент теплоотдачи, зависящий от формы терморезистора, от вязкости, скорости и теплопроводности среды. В качестве терморезисторов для термоанемометров применяют проволочные терморезисторы из платины и вольфрама диаметром $5 \div 20$ мкм, а также пленочные терморезисторы из никеля и других материалов. Длина терморезистора $5 \div 10$ мм. Терморезистор устанавливается в держатель, как показано на рис. 58 и включается в мост. Терморезистор нагревается проходящим через него током, а мост при этом уравнивается при неподвижной среде. При движении среды терморезистор охлаждается, в измерительной диагонали моста появляется напряжение, измеряемое любым методом. Для коррекции зависимости сопротивления терморезистора от температуры движущейся среды методами, известными

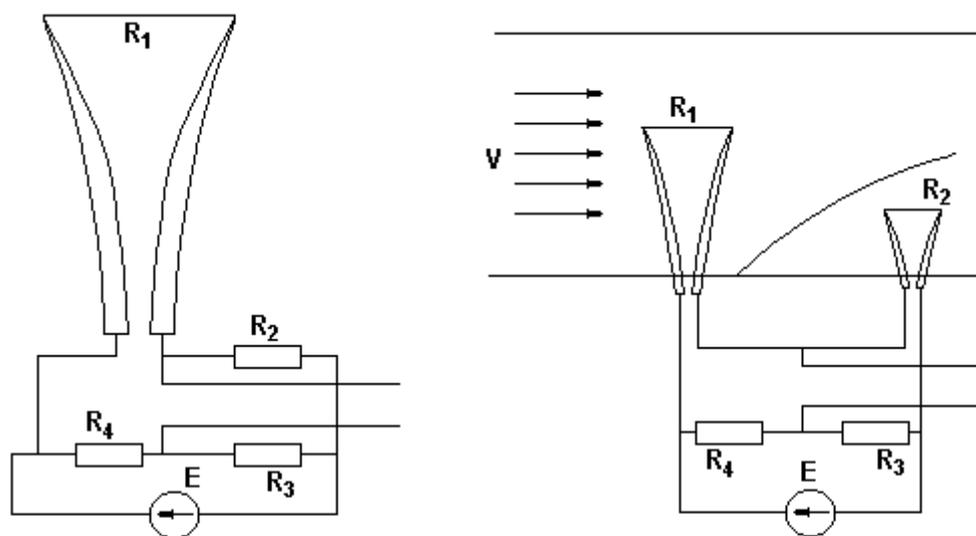


Рис. 58. Термоанемометр и его применение

из гидродинамики, из потока отделяют некоторую неподвижную его часть и помещают туда аналогичный терморезистор, включая его в противоположное плечо моста.

Диапазон измеряемых скоростей от 0.01 м/с до 500 м/с. Частотный диапазон термоанемометров от 0 Гц до 500 Гц, поэтому подобные анемометры позволяют измерять высокочастотные флуктуации потоков. Основной причиной погрешности термоанемометров является зависимость сопротивления от теплофизических параметров среды. Кроме того с помощью термоанемометра измеряется скорость движения в локальной области потока, и эта скорость отличается от средней скорости, особенно если поток не ламинарный.

7.2. Измерение деформаций

Для измерения деформации используются тензорезисторы, то есть такие резисторы, сопротивление которых изменяется при их линейной деформации. Существует три вида тензорезисторов: проволочные, фольговые и полупроводниковые. Механизм возникновения тензочувствительности у проволочных и фольговых тензорезисторов имеет одну природу.

Сопротивление электрического проводника длиной l , с площадью поперечного сечения S выражается формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

При увеличении длины проволоки вследствие ее упругой деформации на Δl ее диаметр уменьшается на Δd , причем относительные величины $\Delta l/l$ и $\Delta d/d$ связаны прямо пропорционально: $\Delta d/d = -0.4 \Delta l/l$. Кроме того при деформации проводника незначительно изменяется его удельное сопротивление ρ .

Прологарифмируем теперь исходное выражение и вычислим его дифференциал, заменив бесконечно малые на конечные приращения. В результате получим выражение, связывающее относительные приращения:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \cdot \frac{\Delta d}{d}.$$

Поскольку все слагаемые в правой части линейно зависят от относительной деформации $\varepsilon = \Delta l/l$, получим, что относительное изменение сопротивления тензорезистора пропорционально его деформации:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \frac{\Delta l}{l} = K_T \cdot \varepsilon,$$

где K_T - коэффициент тензочувствительности, его значение для разных материалов лежит в пределах $1.8 \leq K_T \leq 3$, поскольку у различных материалов зависимости от деформации удельного сопротивления различаются.

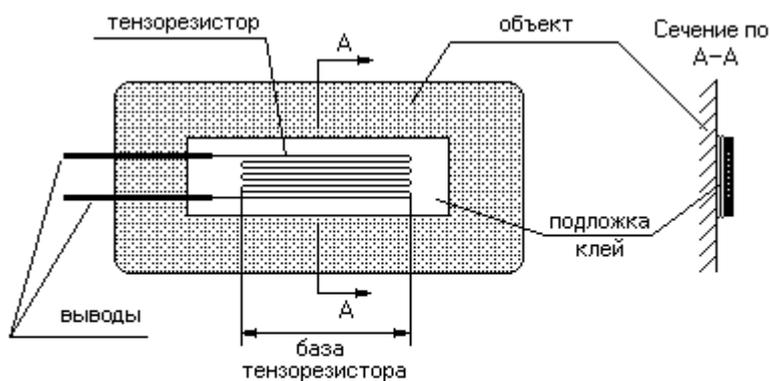


Рис. 59. Конструкция тензорезистора и его крепление на объекте

Проволочные тензорезисторы изготавливаются из тонкой проволоки толщиной $10 \div 20$ мкм и наклеиваются на тонкую бумажную подложку (рис. 59). К объекту тензорезистор на подложке приклеивается высококачественным неэластичным клеем с тем, чтобы деформация объекта переда-

валась на тензорезистор полностью. Ориентируется тензорезистор строго по тому направлению, в котором необходимо измерить деформацию. База тензорезистора может иметь размеры от 5 мм до 20 мм. Сопротивление недеформированного тензорезистора от 40 Ом до 800 Ом.. Свойства материалов, из которых делаются проволочные тензорезисторы, представлены в таблице 5.

Таблица 5

Характеристики некоторых материалов тензорезисторов

Материал	Коэффициент тензочувствительности	Температурный диапазон °С	Критическая температура
Константан (45%Ni+55%Cu)	2.0	-270 ÷ 260	315 °С
Манганин	2.0	-270 ÷ 180	180 °С
Нихром (80%Ni+20%Cr)	2.0	до 400	450 °С
Платина-вольфрам	2.7 ÷ 3.3	до 550	-

Фольговые тензорезисторы изготавливаются из фольги, прокатанной из тех же материалов и обладают такими же характеристиками. Они изготавливаются фотоспособом. На фольгу наносится фоточувствительный слой, на этот слой проектируется изображение тензорезистора, затем незасвеченные участки вытравляются. В результате конфигурация фольговых тензорезисторов может быть достаточно сложной, а их база - довольно мелкой: до 0.8 мм.

Так же, как и проволочные тензорезисторы, фольговые устанавливаются на объект с помощью клея. В тех случаях, когда необходимо измерять деформацию объектов при высоких температурах, тензорезисторы к ним привариваются.

Пределы измерения относительных деформаций с помощью проволочных и фольговых тензорезисторов сверху ограничиваются пределами упругих деформаций металлов, то есть 1%. При коэффициенте тензочувствительности

$K_T = 2.0$ и начальном сопротивлении недеформированного тензорезистора, равном 100 Ом пределы изменения сопротивления при полной деформации составит всего 1 Ом, и каждое значение этого изменения необходимо измерять с относительной погрешностью $(1 \div 2)\%$, что в абсолютном выражении составит величины $(0.02 \div 0.04)$ Ом. По отношению к полному сопротивлению тензорезистора в относительных единицах точность измерения сопротивления окажется уже $(0.02 \div 0.04)\%$.

В связи с этим остро встает вопрос о точном определении коэффициента тензочувствительности и собственного сопротивления тензорезистора при его выпуске из производства. И если точное измерение сопротивления труда не составляет, то для точного измерения коэффициента тензочувствительности необходимо приклеить тензорезистор к образцовому объекту (например, к образцовой балке) так же хорошо, как и затем к объекту. Поэтому испытанный объект к дальнейшему применению пригоден не будет. Указанная причина заставляет выполнять метрологические испытания тензорезисторов выборочно на отдельных представителях партии тензорезисторов, изготовленных при одинаковых технологических условиях. Это единственное средство измерений, которое подвергается выборочным метрологическим испытаниям с разрушением.

Понятно, что по результатам таких выборочных испытаний необходимо приписать всем тензорезисторам партии полученное значение коэффициента K_T и характеристики разброса значений индивидуальных коэффициентов внутри партии. Эта операция выполняется статистическими методами, описанными в Лабораторном практикуме [11].

Указанный разброс коэффициента тензочувствительности проволочных и фольговых тензорезисторов является одной из основных причин погрешности измерения деформации.

Как мы видим, одного тензорезистора явно недостаточно для измерения деформации объекта. Необходимо преобразовать незначительное изменение его сопротивления, вызванное деформацией, в значимый сигнал напряжения или тока, который был бы пропорционален измеряемой величине, и при отсутствии деформации так же был бы равен 0. Для этого применяются мостовые схемы, которые уравниваются при отсутствии деформации.

В зависимости от доступности поверхностей объекта схемы включения тензорезисторов именуется "четверть моста", "половина моста" и "целый мост". Эти схемы представлены на рис. 60 а, 60 б, 60 в соответственно. На этих схемах принято, что сопротивления всех плеч моста, в том числе, сопротивления недеформированных тензорезисторов равны R . Напряжение питания моста E_0 . Выходное напряжение, вызванное деформацией тензорезисторов, возникает в измерительной диагонали и обозначено через U_D .

Схема "четверть моста" применяется в тех случаях, когда доступной является только одна сторона объекта, например, внешняя поверхность крыла само-

лета при его испытаниях на прочность, внутренняя поверхность корпуса судна, наружная поверхность котла.

Тогда в заданное место на поверхность объекта наклеивается только один тензорезистор TP_1 (рис. 60 г), сопротивление которого при показанной относительной деформации ε увеличивается, то есть $R_T = R + \Delta R = R \cdot (1 + K_T \cdot \varepsilon)$. Считая входное сопротивление усилителя $R_{ex} \gg R$, получим выражение для напряжения в диагонали данного неравновесного моста, вызванное деформацией:

$$U_D = \frac{E_0}{2} - E_0 \frac{R}{R + R_T} = E_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2 + K_T \cdot \varepsilon} \right) = E_0 \frac{K_T}{4} \frac{\varepsilon}{\left(1 + K_T \frac{\varepsilon}{4} \right)}.$$

Мы видим, что выходное напряжение неравновесного моста зависит от напряжения питания, и что зависимость выходного сигнала от относительной деформации нелинейна. При $K_T = 2.0$ и при максимальной относительной деформации $\varepsilon_{max} = 1\%$ погрешность от нелинейности составит 0.5%.

В тех случаях, когда объект деформируется строго в одном направлении, для компенсации погрешности от температуры перпендикулярно к тензорезистору TP_1 наклеивают компенсирующий тензорезистор TP_2 , как это показано на рис. 60 г. Этот тензорезистор включают в мост по схеме "половина моста", показанной на рис. 60 б, но поскольку он практически не воспринимает деформацию объекта, выражение для выходного напряжения остается прежним, действительным для схемы "четверть моста".

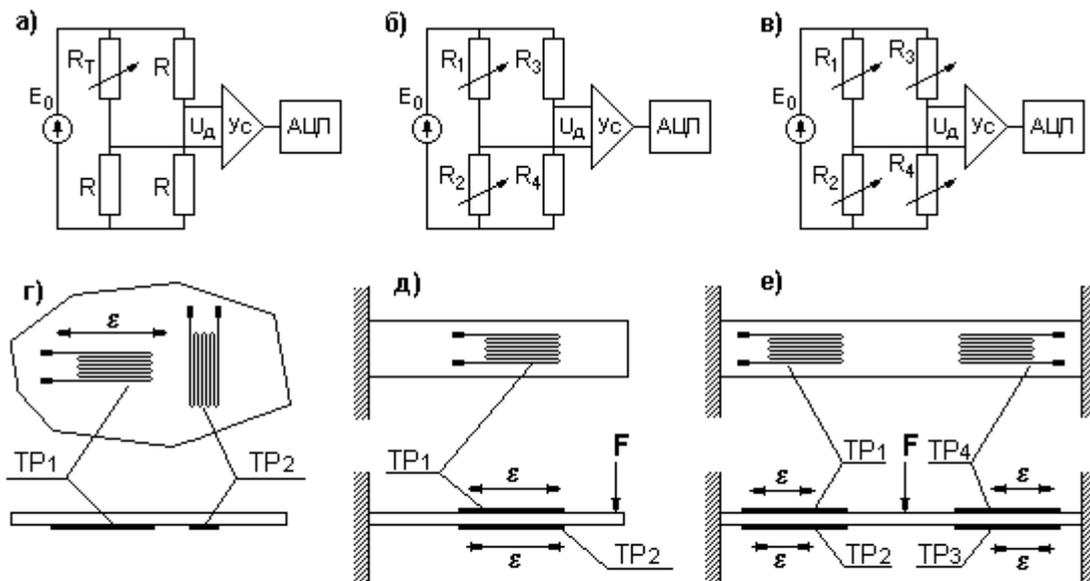


Рис. 60. Схемы включения тензорезисторов

Если объект подвергается изгибу, и обе его поверхности доступны, то тензорезисторы приклеивают на обе противоположные поверхности так, чтобы

тензорезисторы испытывали деформации, равные по величине, но противоположные по направлению (рис. 60 д). Тогда при относительной деформации ε , вызванной силой F , сопротивление тензорезистора TP_1 будет увеличиваться $R_1 = R \cdot (1 + K_T \cdot \varepsilon)$, а сопротивление тензорезистора TP_2 будет уменьшаться $R_2 = R \cdot (1 - K_T \cdot \varepsilon)$. Тогда зависимость выходного напряжения моста от деформации будет линейной, а чувствительность схемы к деформации повысится в два раза:

$$U_D = \frac{E_0}{2} - E_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = E_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{R \cdot (1 - K_T \cdot \varepsilon)}{2 \cdot R} \right) = \frac{E_0 \cdot K_T}{2} \cdot \varepsilon.$$

Еще большего повышения чувствительности можно добиться, если объект предоставляет возможность использовать тензорезисторы во всех четырех плечах моста (рис. 60 в и 60 е):

$$U_D = E_0 \frac{R_4}{R_3 + R_4} - E_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = E_0 \cdot \left(\frac{R \cdot (1 + K_T \cdot \varepsilon)}{2 \cdot R} - \frac{R \cdot (1 - K_T \cdot \varepsilon)}{2 \cdot R} \right) = E_0 \cdot K_T \cdot \varepsilon.$$

При использовании проволочных или фольговых тензорезисторов для измерения деформаций объектов возникают погрешности, обусловленные следующими причинами:

- разбросом коэффициентов тензочувствительности тензорезисторов,
- нагреванием тензорезисторов протекающим через них током,

- различием коэффициентов теплового расширения материалов тензорезистора и объекта, из-за чего тензорезистор испытывает деформацию даже при недеформированном объекте,

- термоЭДС, возникающая в месте соединения проволоки тензорезистора с подводными медными проводами, эластичностью клея, неверной ориентацией тензорезистора по направлению деформации, нестабильностью напряжения питания моста, дрейфом нуля усилителя постоянного тока и его тепловыми шумами.

Некоторые из перечисленных погрешностей удастся скорректировать. О коррекции некоторых температурных погрешностей речь шла выше. Эта коррекция достигается приклеиванием на объект дополнительного тензорезистора перпендикулярно основному. Погрешности от нагревания собственным током можно уменьшить, уменьшая этот ток, но при этом снижается чувствительность моста. Компромисс здесь достигается при импульсном питании моста. Моменты измерения выходного напряжения моста синхронизируются с моментами подачи импульсов питания. За счет этого увеличивают амплитудное значение напряжения питания и тем самым увеличивается чувствительность, но при этом уменьшается действующее значение этого напряжения, и тензорезисторы нагреваются гораздо меньше. В то же время при таком питании для усиления напряжения в измерительной диагонали моста применяется усилитель переменного напряжения, у которого дрейф отсутствует. Если к тому же на вход усилителя поставить фильтр, не пропускающий напряжение на частотах ниже частоты

питания моста, то таким образом могут быть отфильтрованы помехи. Частота питающих импульсов выбирается в пределах $(10 \div 30)$ кГц.

Тензоэффект в полупроводниковых тензорезисторах возникает за счет того, что при их деформации изменяется удельное сопротивление ρ , коэффициент тензочувствительности при этом достигает 80. Но с другой стороны, предел допускаемых упругих деформаций полупроводникового тензорезистора ограничен значением 0.1%, что в десять раз меньше, чем у проволочных или фольговых тензорезисторов. В связи с этим, а также из-за трудностей установки полупроводниковых тензорезисторов на объект они не используются для собственно измерения деформаций. Полупроводниковые тензорезисторы применяются только в составе датчиков других физических величин, таких как сила, давление, ускорение. Они изготавливаются по полупроводниковой технологии, имеют очень малые размеры, большое сопротивление, сложную конфигурацию и изготавливаются либо на эластичной подложке, либо их подложка является упругим элементом датчика.

Технология изготовления полупроводниковых тензорезисторов, которые являются единым целым с подложкой, обеспечивает либо коррекцию, либо полное отсутствие некоторых погрешностей, таких как погрешность от неверной ориентации, погрешность от различия коэффициентов теплового расширения материала подложки и тензорезистора, погрешность от некачественного приклеивания. Кроме того, поскольку эти тензорезисторы входят в состав датчиков, они подвергаются не выборочным, а сплошным метрологическим испытаниям в составе датчиков, оснащенных средствами индивидуальной регулировки. В результате резко уменьшается погрешность от разброса значений коэффициентов тензочувствительности. Единственным недостатком полупроводниковых тензорезисторов является их невысокая термостойкость, что не позволяет их использовать при температурах выше $(100 \div 200)^\circ\text{C}$.

7.3. Тензорезистивные датчики

Датчики физических величин, чувствительный элемент которых основан на применении тензорезисторов, называются *тензорезистивными датчиками*.

Датчик силы. При измерении силы с помощью тензорезистивных датчиков выполняется цепочка взаимнооднозначных преобразований, показанная на рис. 61. Применение полупроводниковой микротехнологии позволяет в корпусе датчика разместить измерительный мост, а в некоторых случаях и усилитель и даже АЦП.

На основе тензорезисторов создаются датчики силы с пределами измерений от долей грамма до десятков тонн. Пределы измерений определяются жесткостью W упругого элемента, который преобразует измеряемую силу в деформацию этого элемента. Последующие преобразования очевидны.



Рис. 61. Измерительные преобразования при измерении силы с помощью тензорезистивного датчика

На рис. 62 приведены два примера датчиков силы, в которых используются не рассмотренные ранее комбинации упругих элементов с тензорезисторами. В любом датчике силы на конструктивном элементе, воспринимающем силу, должна быть предусмотрена выпуклость, которая фиксирует точку приложения силы. В датчиках, предназначенных для применения в весоизмерительных системах, важно обеспечить независимость результата измерения от расположения взвешиваемого изделия (продукта) на платформе, где это изделие размещается. Указанная независимость может достигаться иными методами: установкой нескольких датчиков и последующей математической обработкой результатов.

На первом примере (рис. 62 а) показан в разрезе круглый датчик, упругим элементом которого является верхняя мембрана, на которой с внутренней стороны наклеен фольговый или полупроводниковый тензорезистивный элемент, показанный на рис. 62 б. Этот элемент представляет собой полный мост с возможностью подключения к нему внешнего сопротивления R , предназначенного для уравнивания моста при отсутствии деформации. При воздействии на датчик силы F тензорезисторы R_1 и R_4 сжимаются, а тензорезисторы R_2 и R_3 растягиваются. Эти тензорезисторы включаются в мост так, как показано на рис. 60 в и 62 г. Относительная деформация ε преобразуется в напряжение измерительной диагонали моста по формуле

$$U_d = E_0 \cdot K_T \cdot \varepsilon.$$

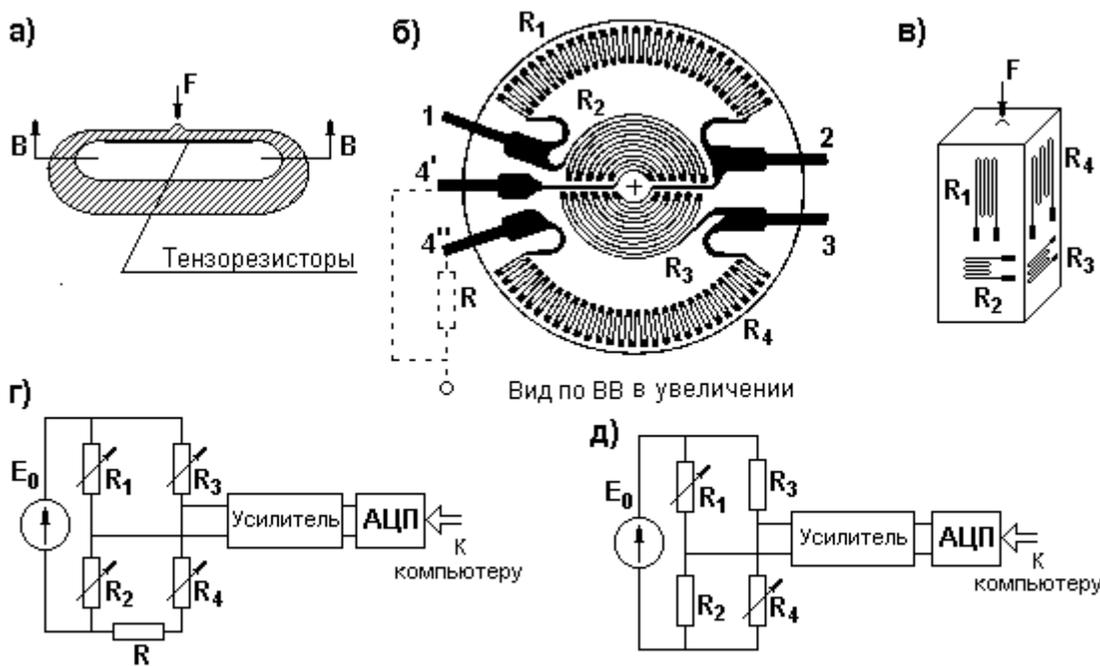


Рис. 62. Примеры тензорезистивных датчиков силы

Полупроводниковые мембраны подобной конструкции изготавливаются в одном кристалле на подложке толщиной несколько микрометров и диаметром до 1 см.

Вторая конструкция упругого элемента, представленная на рис. 62 в, требует иной схемы включения тензорезисторов в мост. Этот упругий элемент под действием измеряемой силы претерпевает только сжатие. В направлении деформации сжатия на упругом элементе установлены тензорезисторы R_1 и R_4 , которые включены в мост, как показано на рис. 62 д. Вторая пара тензорезисторов R_2 и R_3 установлены перпендикулярно основным тензорезисторам и применяются для коррекции температурных погрешностей, как это было указано выше, в п. 7.2. Положим, что в отсутствии воздействия измеряемой силы сопротивления всех тензорезисторов равны, а входное сопротивление усилителя значительно больше этих сопротивлений. Тогда напряжение в измерительной диагонали такого моста равно

$$U_D = E_0 \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = E_0 \left(\frac{R}{R + R(1 - K_T \varepsilon)} - \frac{R(1 - K_T \varepsilon)}{R + R(1 - K_T \varepsilon)} \right) = \frac{E_0 K_T}{2} \frac{\varepsilon}{1 - K_T \frac{\varepsilon}{2}}$$

В случае, когда применяемые тензорезисторы фольговые и $K_T = 2.0$, нелинейность преобразования составит не более 1%. При использовании в таких датчиках полупроводниковых тензорезисторов, для которых $\varepsilon_{max} = 0.1\%$ нелинейность преобразования составит всего 0.1%.

Наиболее точным средством измерения силы, построенным на основе тензорезистивных датчиков, являются электронные весы фирмы "Сарториус" со встроенным микропроцессором. В этих весах тензорезисторы используются в

качестве первого звена цепи отрицательной обратной связи, с помощью которой взвешиваемый груз компенсируется силой, создаваемой магнитоэлектрическим устройством. Погрешность весов не превышает 0.001%. При метрологических испытаниях и применении в микропроцессор вводится значение плотности окружающего воздуха с целью исключения погрешности, вызываемой силой выталкивания взвешиваемого предмета воздухом в соответствии с известным законом Архимеда. Среди весов, выпускаемых фирмой "Сарториус", отметим весы SC2 (предел измерения 2.1 г, разрешающая способность 0.1 мкг) и весы MC5 (предел измерения 5.1 г, разрешающая способность 1 мкг).

Среди изготовителей датчиков силы отметим германскую фирму "Mess-technik", которая выпускает датчики силы с пределами измерения от от 5 Н до 50 Н, от 50 Н до 1000 Н, от 100 Н до 10000 Н и от 5000 Н до 500000 Н. Погрешность датчиков - от 0.02% до 0.03%. Та же фирма выпускает датчики силы для взвешивания цистерн, бункеров и тому подобного с верхним пределом измерения до 5000000 Н.

Датчики ускорения. В этих датчиках измеряемое ускорение преобразуется в силу за счет использования силы инерции, действующей на тело с точно известной массой m : $F = m \cdot \ddot{x}$, где \ddot{x} - ускорение датчика. Цепочка измерительных преобразований, выполняемых с участием тензорезистивных датчиков, представлена на рис. 63.

Некоторые из возможных вариантов установки на упругий элемент тела с массой m и размещения на нем тензорезисторов показаны на рис. 64. Наибольшей чувствительностью из приведенных вариантов будет обладать датчик, у которого тело с массой m прикреплено на конце упругого элемента в виде консольной балки. Рабочие тензорезисторы обозначены здесь, как R_1, R_2 , а тензо-



Рис. 63. Измерительные преобразования при измерении ускорения с помощью тензорезистивного датчика

резисторы R_3, R_4 установлены для компенсации температурных погрешностей,

и их сопротивление не зависит от ускорения. Схема включения тензорезисторов в мост - по схеме рис. 60 б, формула для напряжения в диагонали - для схемы "половина моста".

Менее чувствительным будет датчик ускорения, у которого тело массы m и тензорезисторы установлены на гибкий элемент в соответствии с рис. 64 б. Тензорезисторы включаются в схему "целого моста" в соответствии с рис. 64 в.

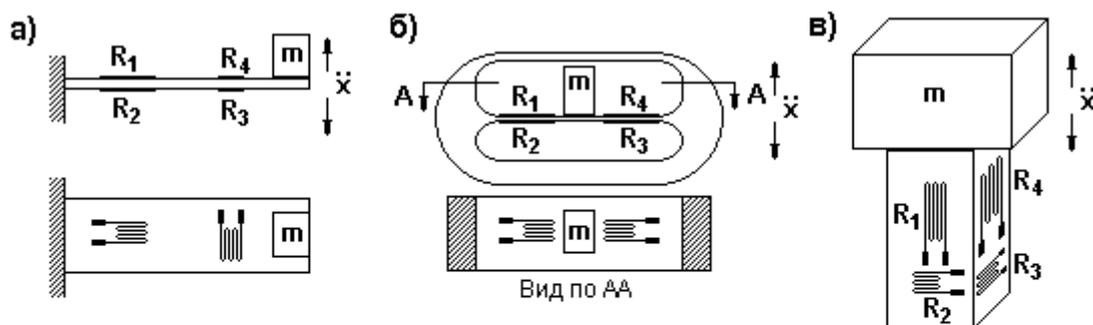


Рис. 64. Примеры взаимного расположения основных элементов тензорезистивных датчиков ускорения

И наконец, наименьшей чувствительностью будет обладать датчик ускорения, гибкий элемент которого работает на сжатие и растяжение (рис. 64 г). Тензорезисторы такого датчика включаются по схеме рис. 62 г.

Повышения чувствительности тензорезистивных датчиков ускорения можно добиться, используя импульсное питание моста, синхронизированное с моментами измерения (см. также п. 7.2).

В датчиках ускорения значения массы и жесткости упругого элемента подбирают в соответствии с требуемой чувствительностью. Если же необходимо построить датчик виброускорений или если датчик ускорений должен работать в заданной области частот, то масса и жесткость упругого элемента должны обеспечивать такую частоту собственных свободных колебаний, чтобы она была существенно выше верхней границы частотного спектра измеряемых ускорений. Выполнение этого условия позволит обеспечить равномерную амплитудно-частотную характеристику датчика во всей заданной области частот.

Широкую номенклатуру датчики ускорения выпускает фирма Burster (Германия). Для их создания использованы полупроводниковые тензорезисторы, которые иногда называются *пьезорезисторами*. Датчики отличаются диапазонами измерения, характеристиками погрешности, габаритами и присоединительными размерами. Предел допускаемой погрешности не превышает 1%. Масса датчиков менее 3 г., габаритные размеры менее 10×10×10 мм.

Для метрологических испытаний датчиков вибрационного ускорения применяются вибростенды, которые воспроизводят гармонические вибрации с регулируемой частотой и амплитудой.

Постоянное ускорение в течение всего времени эксперимента воспроизводят на центрифуге, скорость вращения которой и расстояние от центра вращения до датчика известны с высокой точностью. На чувствительный элемент датчика в этом случае действует центробежное ускорение. В качестве государственного эталона переменных ускорений используется двойная центрифуга.

Датчики давления. В тензорезистивных датчиках давления жидкости или газа измеряемое давление преобразуется в силу с помощью поршня или мембраны, площадь которых известна с высокой точностью. Цепочка измерительных преобразований, выполняемых при измерениях давления с участием тензорезистивных датчиков, показана на рис. 65.

Датчики давления подразделяются на датчики абсолютного давления, датчики избыточного давления (по сравнению с атмосферным) и датчики разности давлений. Внутренняя камера всех этих датчиков герметично делится упругой или мягкой мембраной на две полости, как показано на рис. 66.



Рис. 65. Измерительные преобразования при измерении давления с помощью тензорезистивного датчика

В полости 2 датчика абсолютного давления (рис. 66 а) создается вакуум. На этом рисунке представлен вариант, когда упругим элементом является мембрана, на которой с помощью полупроводниковой технологии сформированы тензорезисторы ТР в соответствии с рис. 62 б. Эти тензорезисторы расположены на той стороне мембраны, которая находится в полости 2 и не подвергается воздействию среды, которая может быть агрессивной. Площадь и жесткость этой мембраны должны быть известны с высокой точностью ибо в этом случае мембрана выполняет два преобразования: преобразование давления в силу через площадь мембраны и преобразование силы в деформацию тензорезисторов.

В датчике избыточного давления упругим элементом может служить такая же мембрана, тензорезисторы которой защищены от атмосферы лаковыми покрытиями. Но на рис. 66 б представлен вариант, когда от воздействия агрессивных компонентов той и другой среды мембрана с тензорезисторами, обла-

дающая известной жесткостью, защищена герметичными плоскими мембранами, жесткость которых равна нулю. Эти мембраны выполняют преобразование давления в силу, которая затем преобразуется упругой мембраной с тензорезисторами.

Еще один вариант защиты от агрессивных сред представлен на рис. 61 в. С помощью такого датчика измеряется разность давлений в потоке жидкости или газа на участке трубопровода, где находится диафрагма, сужающая поток. Разность давлений до и после диафрагмы возникает из-за сопротивления, которое оказывает диафрагма потоку, и эта разность пропорциональна квадрату скорости потока или расходу движущейся среды. Среда может быть агрессивной, и здесь защита от нее является обязательной. В качестве средства защиты на этом рисунке представлены поршни, которые одновременно являются преобразователями давления в силу. Сила, которую они воспринимают, передается

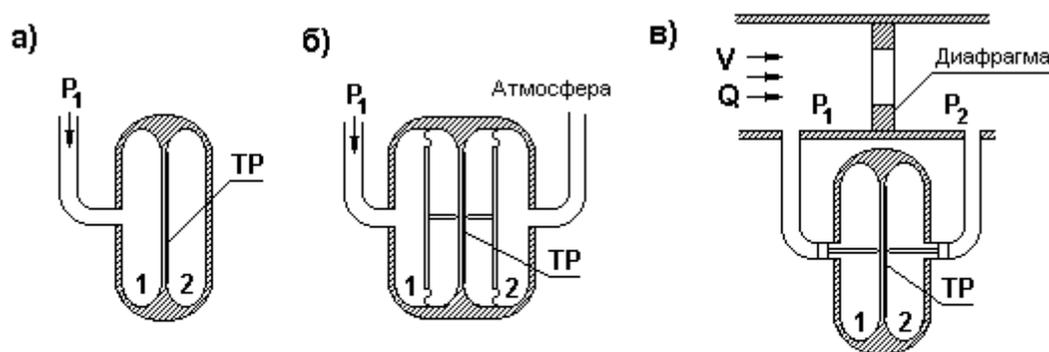


Рис. 66. Примеры схем тензорезистивных датчиков абсолютного давления а), избыточного давления б) и разности давлений в)

на мембрану посредством штоков.

Во всех трех случаях через ТР обозначены фольговые или полупроводниковые тензорезисторы, сформированные на мембранах в соответствии с рис. 62 в.

Тензорезистивные датчики давления всех трех видов находят широкое применение на таких объектах, как электростанции, котельные, испытательные стенды энергоагрегатов. Отечественной промышленностью выпускается широкая номенклатура тензорезистивных датчиков давления типов САПФИР-22 и МЕТРАН-22. Диапазоны измеряемых давлений и разности давлений этих датчиков от десятков кПа до 10 МПа и выше. Погрешность датчиков 0.5% и 0.25%. В корпусе датчиков смонтированы тензомосты и вторичные преобразователи. Выходным сигналом этих датчиков является постоянный ток силой (0 ÷ 5) мА, (0 ÷ 20) мА и (4 ÷ 20) мА. Выходные сигналы зарубежных тензорезистивных датчиков давления промышленного применения изменяются в тех же пределах.

Погрешность лучших тензорезистивных датчиков давления фирмы Fluke и Motorola (США), Rosemount и Druck (Германия), Метран (Россия, г. Челя-

бинск), завод "Манометр" (г. Москва) и других достигает 0.05%. На основе подобных датчиков фирмы выпускают семейство калибраторов давления с той же погрешностью. В этих датчиках преобразование давления в силу и силы в деформацию осуществляется с помощью упругих элементов типа мембран (рис. 62 б), или типа балок. В датчиках применяются фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

Для метрологических испытаний промышленных датчиков давления используются высокоточные датчики или специальные прессы, образцовое давление в которых создается грузами точного веса.

7.4. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики относятся к генераторным датчикам. В этих датчиках используется *пьезоэлектрический эффект* (или, короче, *пьезоэффект*), который заключается в том, что некоторые материалы под действием на них силы электризуются: на их поверхности появляется электрический заряд, величина которого зависит от приложенной силы. Это означает, что материал, обладающий пьезоэффектом, выполняет преобразование силы в электрический заряд. Природным материалом, который обладает пьезоэффектом, является кварц или горный хрусталь..

Заряд, возникающий вследствие пьезоэффекта, линейно зависит от приложенной силы:

$$q = K_{II} \cdot F,$$

где K_{II} - коэффициент пьезочувствительности материала.

Точность преобразования силы в заряд довольно высока. Так, кристалл кварца выполняет это преобразование с относительной погрешностью $10^{-4} \div 10^{-6}$. Дальнейшее преобразование электрического заряда в напряжение выполняет усилитель заряда, и полученное напряжение может быть измерено любым средством измерения напряжения: аналоговым или цифровым вольтметром или АЦП, сопряженным с компьютером.

Пьезоэффект может быть *продольным*, когда заряд возникает на поверхностях, к которым приложена сила, или *поперечным*, когда заряд возникает на боковых поверхностях. Материал при этом практически не деформируется.

На рис. 67 представлены схемы, иллюстрирующие продольный (рис. 67 а) и поперечный (рис. 67 б, в) пьезоэффекты, и обозначены знаки возникающих зарядов. Для эффективного использования поперечного пьезоэффекта две пластины пьезоматериалов соединяют параллельно (рис. 67 б), прокладывают между ними проводящую прокладку и закрепляют их, как консольную балку. Образующийся заряд возникает на зажимах, как показано на рисунке. При действии силы F верхняя пластина растягивается, а нижняя сжимается, и заряд возникает

на боковых относительно действующих напряжений сторонах пластин. В такой конструкции чувствительность преобразования $F \rightarrow q$ существенно выше.

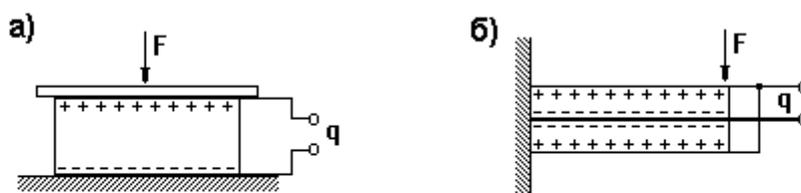


Рис. 67. Продольный а) и поперечный б) пьезоэффекты

К достоинствам кристалла кварца применительно к созданию датчиков силы и других величин относится его стойкость к высокой температуре (пьезоэффект утрачивается после точки Кюри при $t^\circ = 530^\circ\text{C}$) и высокая точность и стабильность преобразования.

Затрудняет применение кварца трудоемкость обработки и очень высокое удельное сопротивление, достигающее $(10^{15} - 10^{16})$ Ом. Поверхностное сопротивление кварца гораздо меньше, поэтому для предотвращения утечки заряда приходится применять хорошую изоляцию, а также тщательно обрабатывать поверхности и герметизировать датчики, защищая кристалл кварца от пыли и грязи. Высокие требования предъявляются к кабелю, соединяющему пластины кварца со входом усилителя заряда. Во избежание утечек заряда изоляция между проводами должна быть очень высокой, а емкость между ними минимальной.

Кроме кристалла кварца в пьезоэлектрических датчиках используются пьезокерамики. К пьезокерамикам относится титанат бария, различные разновидности цирконато-титаната свинца и другие. Точность преобразования силы в заряд у этих материалов хуже, чем у кварца.

Пьезокерамики изготавливаются из сегнетоэлектриков, которые не являются кристаллическими веществами и их домены расположены хаотично. Сегнетоэлектрики сильно измельчают, а затем спекают с вяжущим веществом в сильном электростатическом поле. Сравнительные характеристики некоторых пьезоэлектрических материалов приведены в таблице 6.

Допустимое механическое напряжение для всех материалов

$$\sim (80 \div 90)10^6 \text{ Н / м}^2.$$

Таблица 6

Сравнительные характеристики пьезоэлектрических материалов

Материал	Коэффициент пьезочувствительности K_{II} [Кл / Н]		ε	Точка Кюри °С
	продольной	попереч-		

	ной			
Кристалл кварца	$2,31 \cdot 10^{-12}$	$2,31 \cdot 10^{-12}$	4,5	530
Титанат бария	$78 \cdot 10^{-12}$	$78 \cdot 10^{-12}$	1700	150
Цирконато-титанат свинца (ЦТС)	$(100 - 300)10^{-12}$ $(30 - 160)10^{-12}$		1300	до 400

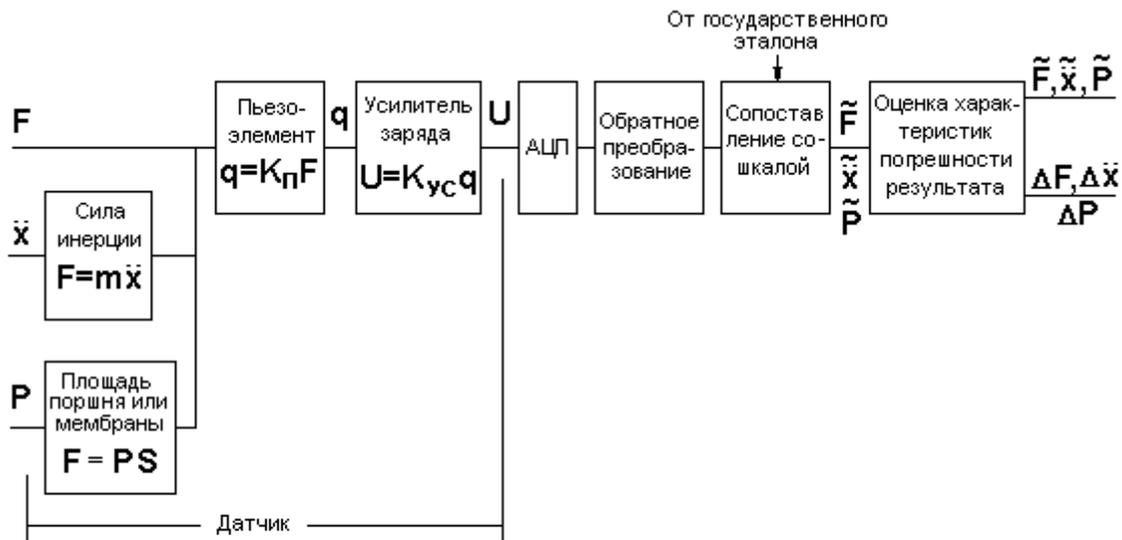


Рис. 68. Измерительные преобразования при измерении силы, ускорения и давления с помощью пьезоэлектрических датчиков

Из сказанного ясно, что на основе подобных материалов, обладающих пьезоэффектом, могут быть созданы пьезоэлектрические датчики силы, ускорения и давления. От подобных тензорезистивных датчиков пьезоэлектрические отличаются повышенной температурной стойкостью и повышенной надежностью. Однако при невысоких температурах применения в связи с успехами в микро-технологии тензорезистивные датчики успешно конкурируют с пьезоэлектрическими.

На рис. 68 показаны цепочки преобразований, которые выполняются с участием перечисленных датчиков. На этом рисунке усилитель заряда включен в состав пьезоэлектрического датчика с учетом современной тенденции встраивания вторичных преобразователей в корпуса датчиков вторичных преобразователей. В результате входные цепи усилителя приближаются непосредственно к источнику заряда и тем самым уменьшаются погрешности, вызванные несовершенством изоляции кабеля и его емкостью, которая частично шунтирует пьезоэлемент датчика. Однако, при этом к датчику приходится подводить питание, необходимое для работы усилителя.

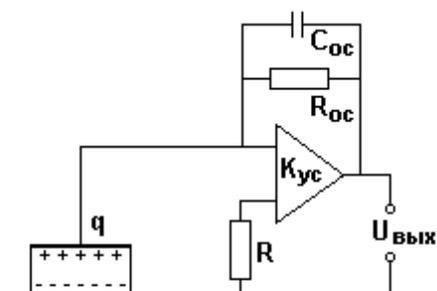


Рис. 69. Усилитель заряда

Усилитель заряда - общий для всех типов пьезоэлектрических датчиков. Он представляет собой усилитель напряжения с большим коэффициентом усиления порядка $10^5 \div 10^6$, охваченный глубокой отрицательной емкостной обратной связью. В связи с этим усилитель является, по сути, конденсатором, на выходе которого развивается напряжение

$U_{\text{вых}} \approx q / C_{\text{ос}}$, где $C_{\text{ос}} = (50 \div 100)$ пФ - емкость конденсатора, стоящего в цепи обратной связи. Упрощенная схема такого усилителя представлена на рис. 69. Параллельно с конденсатором обратной связи включается активное сопротивление $R_{\text{ос}} \approx 10^{10}$ Ом. Современная элементная база позволяет достичь чувствительности усилителя заряда до 1 В/пКл.

Рассмотрим характерные конструктивные особенности пьезоэлектрических датчиков.

Схемы воздействия силы на пьезоэлемент датчика представлены на рис. 67. Для того, чтобы обеспечить наилучшую изоляцию, в датчике силы, работающем по принципу, показанному на рис. 67 а, используется изоляция, которая обеспечивается самим пьезоэлементом. Для этого применяется составной пьезоэлемент, состоящий из двух пластин, между которыми проложена проводящая прокладка (см. рис. 70 а). Используется продольный пьезоэффект, пластины пьезоэлементов 4 соединяются располагаются так, чтобы заряды, возникающие под действием измеряемой силы, были направлены навстречу друг другу. Электрическое соединение пластин - параллельное. Поскольку верхняя и нижняя пластины вынуждены контактировать с корпусом датчика 1, отвод заряда с них осуществляется с помощью коаксиального кабеля, центральный провод которого 2 присоединен к внутренним сторонам пластин пьезоэлементов, а внешняя оболочка 3 соединяется с корпусом,. Далее следует усилитель заряда и все последующие преобразователи. Точно так же обеспечивается наилучшая изоляция и в случае использования поперечного пьезоэффекта в соответствии с рис. 67 б. Подобная схема размещения пьезоэлементов показана на

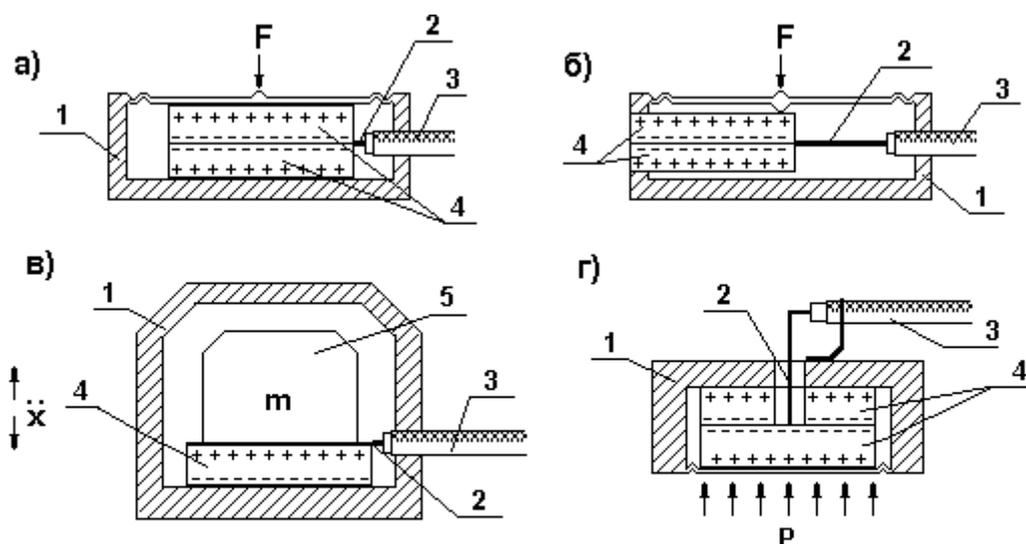


Рис. 70. Взаимное расположение элементов пьезоэлектрических датчиков силы а) и б), ускорения в) и давления г)

рис. 70 г) и является типичной также для датчиков давления. Для датчика ускорения, в котором тело 5 с массой m не контактирует с корпусом, эта схема не используется.

С развитием полупроводниковой микротехнологии тензорезистивные датчики давления и ускорения становятся все более серьезными конкурентами пьезоэлектрических датчиков тех же измеряемых величин. Единственной позицией, которую прочно занимают пьезоэлектрические датчики, является измерение очень высоких импульсных давлений при высоких температурах. Примером таких измерений могут служить измерения давления взрыва в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания: дизельных и бензиновых. В этой области наилучшими характеристиками обладают пьезоэлектрические датчики фирмы "Kistler" (Германия). В некоторых из этих датчиков, предназначенных для работы при очень высокой температуре, применяется водяное охлаждение. Точность датчиков фирмы "Kistler" составляет 0.2% на пределах измерения до 20.0 МПа и выше. Частотная полоса - до 80.0 кГц. Фирмой выпускаются одноосные, двухосные и трехосные пьезоэлектрические датчики ускорения. Высокочувствительные миниатюрные пьезоэлектрические датчики ускорения с выходным сигналом в виде заряда или напряжения выпускает также фирма Bruel & Kjaer (Дания) с частотным диапазоном до 50 кГц. Масса датчиков - от 3 г до 12 г. Пьезоэлектрические датчики для сейсмических измерений, в частности, с целью раннего прогнозирования землетрясений выпускает фирма PCB Piezotronics.

Погрешность лучших современных пьезоэлектрических датчиков ускорения достигает (0,2 ÷ 0,5) %.

7. Процессы проектирования, задачи анализа и синтеза

7.1 Уровни, аспекты и этапы проектирования

Проектирование технического объекта связано с созданием, преобразованиями и представлением в принятой форме образа этого объекта. Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться по некоторым алгоритмам в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. В любом случае проектирование начинается при наличии задания на проектирование. Задание на проектирование — это первичное описание объекта проектирования, представленное в заданной форме. Это задание представляется в виде тех или иных документов и является исходным (первичным) описанием объекта. Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащий достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация представляет собой окончательное описание объекта. Проектирование — процесс, заключающийся в преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера. ГОСТ 22487-77 так дает определение: проектирование — это процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта, на основе первичного описания этого объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса преобразованием (в ряде случаев неоднократно) первичного описания, оптимизацией заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, устранением некорректности первичного описания и последовательным представлением (при необходимости) описаний на различных языках.

Промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования, называется проектным решением.

Различают : неавтоматизированное проектирование — проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса , а также представление описаний на различных языках осуществляет человек;

- автоматизированное проектирование — проектирование при котором отдельные преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представление описаний на различных языках осуществляется взаимодействием человека и ЭВМ;

- автоматическое проектирование — проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представление описаний на различных языках осуществляется без участия человека.

Возможности проектирования сложных объектов обусловлены использованием ряда принципов, основными из которых являются декомпозиция, иерархичность описаний объектов, многоэтапность итерационность проектирования, типизация и унификация проектных решений и средств проектирования.

7.1.1 Иерархические уровни описаний объектов

Описание технических объектов должны быть по сложности согласованы с возможностями восприятия человеком и возможностями оперирования описаниями в процессе их преобразования с помощью имеющихся средств проектирования. Однако выполнить это требование в рамках некоторого единого описания, не расчленяя его на некоторые составные части, удастся лишь для простых изделий. Как правило, требуется структурирование описаний и соответствующее расчленение представлений о проектируемых объектах на иерархические уровни и аспекты.

Разделение описаний по степени детализации отображаемых свойств и характеристик объекта лежит в основе блочно-иерархического подхода к проектированию и приводит к появлению иерархических уровней (уровней абстрагирования) представлений о проектируемом объекте.

На каждом иерархическом уровне используются свои понятия системы и элементов. На уровне 1 (верхнем уровне) подлежащий проектированию сложный объект S рассматривается как система S из n взаимосвязанных и взаимодействующих элементов S_i (рисунок 3.1). Каждый из элементов в описании уровня 1 представляет собой также довольно сложный объект, который, в свою очередь, рассматривается как система S_i на уровне 2. Элементами систем S_i являются объекты S_{ij} , $j=1,2,\dots, m_i$ (m_i -количество элементов в описании системы S_i). Как правило, выделение S_{ij} происходит по функциональному признаку. Подобное разделение продолжается вплоть до получения на некотором уровне элементов, описания которых дальнейшему делению не подлежат. Такие элементы по отношению к объекту S называют базовыми элементами.

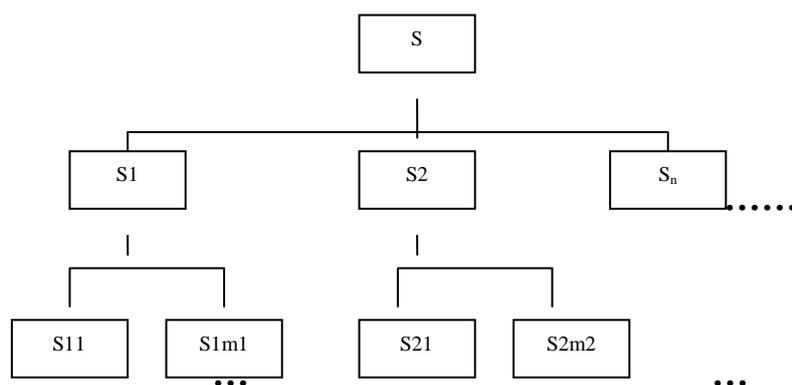


Рисунок 7.1 - Блочно-иерархическое представление объектов проектирования.

Таким образом, принцип иерархичности означает структурирование представлений об объектах проектирования по степени детальности описаний, а прин-

цип декомпозиции (блочности) - разбиение представлений каждого уровня на ряд составных частей (блоков) с возможностями отдельного (поблочного) проектирования объектов S_i на уровне 1, объектов S_{ij} на уровне 2 и т.д.

7.1.2 Аспекты описания проектируемых объектов

Кроме расчленения описаний по степени подробности отражения свойств объекта, порождающего иерархические уровни, используют декомпозицию описаний по характеру отображаемых свойств объекта. Такая декомпозиция приводит к появлению ряда аспектов описаний. Функциональный аспект связан с отображением основных принципов функционирования, характера физических и информационных процессов, протекающих в объекте, и находит выражение в принципиальных, функциональных, структурных, кинематических схемах и сопровождающих их документах.

Конструкторский аспект связан с реализацией результатов функционального проектирования, т.е. с определением геометрических форм объектов и их взаимным расположением в пространстве.

Технологический аспект относится к реализации результатов конструкторского проектирования, т.е. связан с описанием методов и средств изготовления объектов.

7.1.3 Составные части процесса проектирования

Проектирование как процесс, развивающийся во времени, расчленяется на стадии, этапы, проектные процедуры и операции.

При проектировании сложных систем выделяют стадии проектных исследований, технического задания и технического предложения, эскизного, технического, рабочего проектов, испытаний и внедрения.

Этапы проектирования - часть процесса проектирования, включающая в себя формирование всех требующихся описаний объекта, относящихся к одному или нескольким иерархическим уровням и аспектам. Часто названия этапов совпадают с названиями соответствующих иерархических уровней и аспектов. Так, проектирование ТП расчленяют на этапы разработки принципиальных схем ТП, маршрутной технологии, операционной технологии и получения управляющей информации на машинных носителях для программно - управляемого технологического оборудования.

Составные части этапа проектирования называют проектными процедурами. Проектная процедура - это формализованная совокупность действий, выполнение которых оканчивается проектным решением. Более мелкие составные части процесса проектирования, входящие в состав проектных процедур, называют проектными операциями. Проектная операция - это действие или формализованная совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур.

Таким образом, понятия уровня и аспекта относятся к структурированию представлений о проектируемом объекте, а понятие этапа - к структурированию процесса проектирования.

7.1.4 Нисходящее и восходящее проектирование

Если решение задач высоких иерархических уровней предшествует решению задач более низких иерархических уровней, то проектирование называют нисходящим. Если раньше выполняются этапы, связанные с низшими иерархическими уровнями, проектирование называется восходящим.

При нисходящем проектировании система разрабатывается в условиях, когда ее элементы еще не определены и, следовательно, сведения об их возможностях и свойствах носят предположительный характер. При восходящем проектировании, наоборот, элементы проектируются раньше системы, и, следовательно, предположительный характер имеют требования к элементам. В обоих случаях из-за отсутствия исчерпывающей исходной информации имеют место отклонения от потенциально возможных оптимальных технических результатов. И поскольку принимаемые предложения могут не оправдаться, часто требуются повторное выполнение проектных процедур предыдущих этапов после выполнения проектных процедур последующих этапов. Такие повторения обеспечивают последовательное приближение к оптимальным результатам и обуславливают итерационный характер проектирования. Следовательно, итерационность нужно относить к важным принципам проектирования сложных объектов и систем.

На практике обычно сочетают восходящее и нисходящее проектирование. Например, восходящее проектирование имеет место на всех тех иерархических уровнях, на которых используется унифицированные элементы. Очевидно, что унифицированные элементы, ориентированные на применение в ряде различных систем определенного класса, разрабатываются раньше, чем та или иная конкретная система этого класса.

7.1.5 Внешнее и внутреннее проектирование

Разработка технического задания на систему высшего иерархического уровня или на унифицированную систему элементов, предназначенную для многих применений, является самостоятельным этапом проектирования и часто называется внешним проектированием. В отличие от него этапы проектирования объекта по сформулированным техническим заданиям называют внутренним проектированием, т.е. на начальных стадиях проектирования сложных систем имеет место итерационный процесс, в котором поочередно выполняются процедуры внешнего и внутреннего проектирования - формулировка технического задания, его корректировка, оценка выполнимости, прогноз материальных и временных затрат на проектирование и изготовление.

7.2 Типовые проектные процедуры

7.2.1 Классификация типовых проектных процедур

Проектная процедура называется типовой, если она предназначена для многократного применения при проектировании многих типов объектов. Классификация типовых проектных процедур представлена на рисунке 3.2.

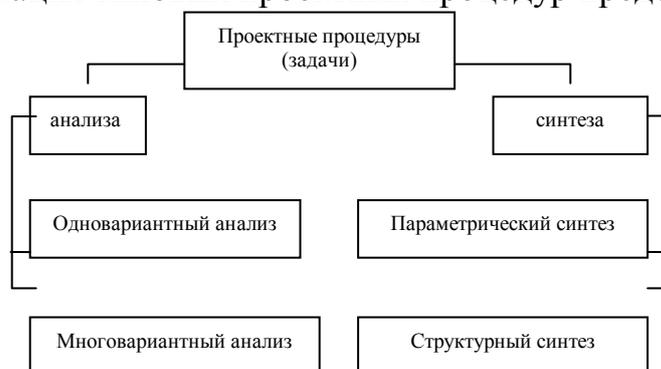


Рисунок 3.2 - Классификация типовых проектных процедур

Различают проектные процедуры анализа и синтеза. Синтез заключается в создании описания объекта, а анализ - в определении свойств и исследовании работоспособности объекта по его описанию, т.е. при синтезе создаются, а при анализе оцениваются проекты объектов.

Процедуры анализа делятся на процедуры одно- и многовариантного анализа. При одновариантном анализе заданы значения внутренних и внешних параметров, требуется определить значения выходных параметров объекта. (Величины, характеризующие свойства системы, элементов системы и внешней среды называют соответственно выходными Y , внутренними X и внешними параметрами Q).

Многовариантный анализ заключается в исследовании свойств объекта в некоторой области пространства внутренних параметров. Такой анализ требует многократного решения систем уравнений (многократного выполнения одновариантного анализа).

Процедуры синтеза делятся на процедуры структурного и параметрического синтеза. Целью структурного синтеза является определение структуры объекта - перечня типа элементов, составляющих объект, и способа связи элементов между собой в составе объекта.

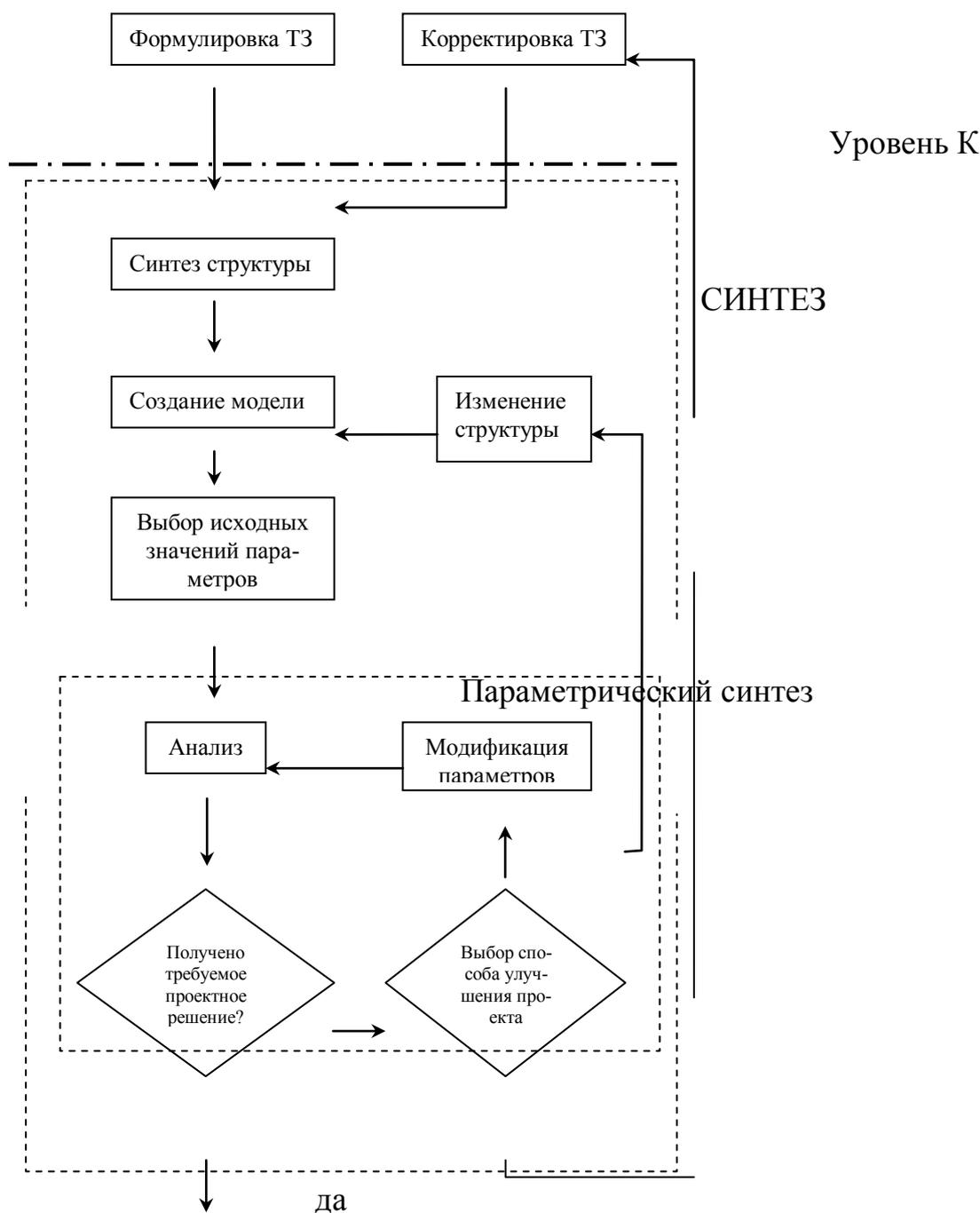
Параметрический синтез заключается в определении числовых значений параметров элементов при заданных структуре и условиях работоспособности на выходные параметры объекта, т.е. при параметрическом синтезе нужно найти точку или область в пространстве внутренних параметров, в которых выполняются те или иные условия (обычно условия работоспособности).

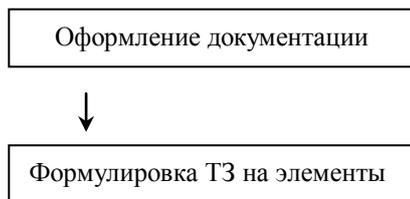
7.2.2 Типичная последовательность проектных процедур

На рисунке 3.3 представлена типичная последовательность проектных процедур на одном из этапов нисходящего проектирования.

На предыдущем этапе решались задачи k -го иерархического уровня, одним из результатов решения этих задач при нисходящем проектировании является формулировка технического задания на проектирование систем $(k+1)$ -го рассматриваемого уровня.

Проектирование системы начинается с синтеза исходного варианта ее структуры. Для оценки этого варианта создается модель: математическая - при автоматизированном проектировании, экспериментальная или стенд - при не автоматизированном проектировании.





Уровень К+1

Рисунок 3.3 - Схема процесса проектирования.

После выбора исходных значений параметров элементов выполняется анализ варианта, по результатам которого становится возможной его оценка. Обычно оценка заключается в проверке выполнения условий работоспособности, сформулированных в техническом задании. Если условия работоспособности выполняются в должной мере, то полученное проектное решение принимается, система (k+1)-го уровня описывается в принятой форме и формулируются технические задания на проектирование элементов данного уровня (т.е. систем следующего уровня). Если же полученное проектное решение не удовлетворительно, выбирается один из возможных путей улучшения проекта.

Обычно проще всего осуществить изменения числовых значений параметров элементов, составляющих вектор X .

Совокупность процедур модификации X , анализа и оценки результатов анализа представляет собой процедуру параметрического синтеза. Если модификации X целенаправленны и подчинены стратегии поиска наилучшего значения некоторого показателя качества, то процедура параметрического синтеза является процедурой оптимизации. Возможно, что путем параметрического синтеза не удастся добиться приемлемой степени выполнения условий работоспособности. Тогда используют другой путь, связанный с модификацией структуры.

Новый вариант структуры синтезируется, и для него повторяются процедуры формирования модели и параметрического синтеза. Если не удастся получить приемлемое проектное решение и на этом пути, то становится вопрос о корректировке технического задания, сформулированного на предыдущем этапе проектирования. Такая корректировка может потребовать повторного выполнения ряда процедур k-го иерархического уровня, что и обуславливает итерационный характер проектирования.

Одной из характерных особенностей взаимосвязи проектных процедур анализа и синтеза является вложенность: процедура анализа в процедуру оптимизации (параметрического синтеза) и процедуры оптимизации в процедуру синтеза, объединяющую синтез структурный и параметрический.

Вложенность означает, во-первых, что анализ входит как составная часть в оптимизацию, а оптимизация - в синтез; во-вторых, что однократное выполнение процедуры оптимизации требует многократного выполнения процедуры анализа, а однократное решение задачи синтеза - многократного решения задачи оптимизации. Очевидно, что такой же характер взаимодействия имеют про-

цедуры анализа - однократный многовариантный анализ основан на многократном одновариантном анализе.

7.3 Выводы

Проектирование - процесс, заключающийся в преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание. Оно различается на неавтоматизированное, автоматизированное и автоматическое.

Основные принципы проектирования – декомпозиция и иерархичность описания объектов, многоэтапность и итерационность, типизация и унификация проектных решений и средств проектирования.

Стадии, этапы, проектные процедуры и операции являются составными частями процесса проектирования.

Цепочка: синтез - анализ - оценка и модификация параметров или изменение структуры или корректировка технического задания является типичной последовательностью проектных процедур при автоматизации технологического проектирования.

При синтезе технологических маршрутов и операций обработки деталей используют метод структурного синтеза, основанный на использовании типовых решений и относящийся к методам выделения варианта из обобщенной структуры.