

**А. В. Бахтин
И. В. Ремизова**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ
ОСНОВЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**А. В. Бахтин
И. В. Ремизова**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ
**ОСНОВЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ**

Учебное пособие

2-е издание, дополненное и переработанное

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2024

УДК 681.5 (075)
ББК 34.9я7
Б 307

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент кафедры АПХП Санкт-Петербургского государственного
технологического института (Технического университета)

И. В. Рудакова;

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой АТПиП Высшей школы
технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна

Д. А. Ковалев

Бахтин, А. В.

Б 307 Технологические измерения и приборы. Основы измерительной техники
и информационно-измерительные системы: учебное пособие. — 2-е изд.,
доп. и перераб. / А. В. Бахтин, И. В. Ремизова. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД,
2024. — 66 с.
ISBN 978-5-91646-395-8

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам следующих дисциплин:
«Информационно-измерительная техника», «Контрольно-измерительная техника в
электротехнических комплексах», «Технологические измерения и приборы», «Измерительно-
информационные средства для систем управления», «Информационно-измерительная
техника и технологии в АСУ» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки:
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.04
«Управление в технических системах».

В учебном пособии раскрываются понятия и определения методов и средств измерения,
информационно-измерительных систем. Приведена структура государственной системы
приборов и классификация технических средств для измерения технологических параметров,
а также вопросы передачи измерительных сигналов приборов.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения, а
также может быть использовано при самостоятельном изучении курса и подготовке к
занятиям студентами всех форм обучения и направлений.

УДК 681.5 (075)
ББК 34.9я7

ISBN 978-5-91646-395-8

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024
© Бахтин А. В., Ремизова И. В., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ	7
1.1. Назначение и принципы построения	7
1.2. Структура.....	9
1.3. Информационные связи	11
1.4. Измерительные преобразователи	12
1.5. Управляющие и корректирующие элементы	14
1.6. Исполнительные механизмы и регулирующие органы	15
1.7. Агрегатирование – основа систематического подхода к созданию современной электроизмерительной аппаратуры	16
1.8. Структура и состав агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники.....	18
1.9. Основные сведения об измерениях. Методы измерений.....	19
2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	25
2.1. Классификация средств измерений	25
2.2. Меры и наборы мер	26
2.3. Измерительные преобразователи	27
2.4. Измерительные приборы.....	30
2.5. Измерительные установки и системы.....	38
2.6. Метрологические характеристики средств измерений.....	39
2.7. Общие свойства и классификация измерительных преобразователей	46
3. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. НАЗНАЧЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ОПИСАНИЕ СТРУКТУР. КЛАССИФИКАЦИЯ	49
3.1. Средства измерений как система	49
3.2. Измерительная информация	51
3.3. Единицы измерения информации	53
3.4. Кодирование чисел	55
3.5. Количество информации при измерениях.....	57
3.6. Формы представления информации при измерениях	58
3.7. Классификация сигналов	59
3.8. Графическое изображение передачи сигналов	63
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	66

ВВЕДЕНИЕ

С различными измерениями человек сталкивается с момента своего рождения всю жизнь, осуществляя их самостоятельно или наблюдая за выполнением измерений. Достаточно вспомнить, как часто приходится использовать стеклянные термометры, линейки, весы и др. Всем известно понятие «мерить» («измерять»). Под ним в быту понимают определенную операцию, которая без труда выполняется с помощью названных приборов. В настоящее время простейшие измерения осуществляются уже учениками младших классов школы. Наряду с этим современные фундаментальные научные исследования требуют проведения сложных измерений, постановку и выполнение которых осуществляют целые научные организации, располагающие специалистами высшей квалификации. В то же время общей для указанных и всех других измерений является осуществляемая при каждом измерении экспериментальная операция, состоящая в сравнении измеряемой физической величины с одноименной ей величиной, принятой за единицу. Целью такого сравнения является определение количественной оценки (значения) измеряемой величины в виде определенного числа принятых для нее единиц. За внешней простотой указанной экспериментальной операции скрываются глубокие философские концепции, связанные с материалистическими представлениями о познаваемости явлений природы.

Измерения осуществляются с помощью специальных технических средств, различных по сложности и принципам действия. Указанные технические средства называют *измерительными устройствами, установками или системами*.

Совокупность технических средств, служащих для выполнения измерений, методов и приемов проведения измерений и интерпретации их результатов, принято определять понятием *измерительная техника*.

Исторически развитие измерительной техники неразрывно связано с развитием потребностей общества. XXI век характеризуется ускоренным развитием науки и промышленного производства. Последнее немыслимо без широчайшего применения самых разнообразных измерений и измерительных устройств.

Место измерительной техники в современном мире могут характеризовать следующие данные. Затраты на измерительную технику в настоящее время составляют 10-15 % всех материальных затрат на общественное производство, а в таких отраслях промышленности, как нефтеперерабатывающая, нефтехимическая, химическая, радиоэлектронная, самолетостроительная и другие, эти затраты достигают 25 %.

В нашей стране ежедневно проводится более 20 млрд измерений. Выполнением измерений и связанных с ними операций контроля занимается более 3 млн трудящихся. В настоящее время без измерений не может обойтись практически ни одна область деятельности человека.

Основной потребитель измерительной техники – промышленность. Здесь измерительная техника является неотъемлемой частью технологических

процессов, так как используется для получения информации о многочисленных режимных параметрах, определяющих ход процессов. На использовании разнообразных и часто сложных измерительных устройств и установок базируется в промышленности контроль качества продукции и сырья.

Область измерительной техники, объединяющую измерительные устройства и методы измерений, используемые в технологических процессах, принято определять понятием *технологические измерения*.

Набор измеряемых параметров, включаемых в технологические измерения, весьма различен для различных отраслей промышленности и во многом зависит от специфики технологических процессов.

Все производства различных отраслей промышленности в зависимости от характера технологического процесса можно подразделить на две группы: производства с непрерывным и производства с дискретным (штучным) характером технологических процессов. К первой группе относятся производства таких отраслей промышленности, как нефтеперерабатывающая, газоперерабатывающая, нефтехимическая, химическая, металлургическая, теплоэнергетическая и др., ко второй группе – машиностроение, приборостроение, радиоэлектронная, пищевая и др. Приближенное представление о том, какие параметры и в каком относительном количестве измеряются на производствах с непрерывным и дискретным характером технологических процессов, поможет составить следующую таблицу.

Таблица 1.1 – Измерения параметров производств с непрерывным и дискретным характером технологических процессов

Параметр	Доля общего числа измерений, %	
	производства с непрерывными процессами	производства с дискретными процессами
Температура	50	8
Расход (массовый, объемный) вещества	15	4
Количество (масса, объем) вещества	5	5
Давление	10	4
Уровень	6	4
Длина (размеры, положение, расстояние)	-	25
Число изделий	-	25
Время	4	15
Состав вещества	4	-
Прочие (физико-химические свойства, напряжение, ток, скорость)	6	10

Из табл. 1.1 следует, что на производствах с непрерывным характером технологических процессов (к таким производствам относятся практически все, в которых используются химико-технологические процессы) измерения давления, температуры, расхода, уровня и количества вещества составляют более 86 % от общего числа всех измерений. Остающиеся 14 % измерений составляют измерения состава и физико-химических свойств вещества, а также

электрических величин.

Измерения давления, температуры, расхода и уровня принято называть *теплотехническими измерениями*; измерения состава и физико-химических свойств вещества – *физико-химическими измерениями*, а измерения электрических величин – *электрическими измерениями*. Таким образом, технологические измерения для химико-технологических процессов включают в себя теплотехнические, физико-химические и электрические измерения.

В производствах с непрерывными технологическими процессами, в том числе с химико-технологическими, над исходными веществами (сырьем и реагентами) осуществляют непрерывно во времени различные операции в аппаратах, соединенных технологическими линиями. Указанные операции направлены на изменение физико-химических свойств состава или состояния исходных веществ. В результате проведения процесса получают готовые продукты заданной номенклатуры и качества.

Потребность промышленности в измерительных, аналитических, испытательных приборах, средствах автоматизации и вычислительной техники обеспечивается в настоящее время менее чем на 60 %.

По данным Государственного реестра средств измерений Росстандарта России зарегистрировано более 3 000 видов средств измерений, ввозимых в Российскую Федерацию по импорту, часть которых (около 30 %) не изготавливается отечественной промышленностью.

К средствам измерений относятся:

- 1) приборы и комплексы для измерения геометрических величин;
- 2) приборы и комплексы для измерения механических величин;
- 3) приборы и комплексы для измерения физико-химического состава и свойств веществ;
- 4) приборы и комплексы для измерения оптико-физических свойств веществ;
- 5) приборы для теплотехнических измерений;
- 6) приборы для измерения электрических величин;
- 7) приборы для измерения времени и частоты;
- 8) приборы для биологических и биомедицинских измерений.

Конкурентоспособность отечественной приборной продукции по различным номенклатурным группам на внутреннем рынке оценивается по соответствию мировым достижениям следующим образом:

- средства измерения теплоэнергетических величин – 80 %;
- средства измерения электрических и магнитных величин, измерительные системы – 80...90 %;
- средства измерения механических величин и испытательные машины – 80...85 %;
- геофизические и гидрометеорологические приборы – 70 %;
- средства медицинской техники (широкого применения в лечебных учреждениях) – 70... 80 %;
- средства вычислительной техники (программно-технические управляющие комплексы, телемеханика, контроллеры, устройства числового программного управления (УЧПУ) для станков) – 70 %.

1. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1. Назначение и принципы построения

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) создана в целях обеспечения техническими средствами системы контроля, регулирования и управления технологическими процессами различных отраслей промышленности.

В настоящее время ГСП представляет собой эксплуатационно, информационно, энергетически, метрологически и конструктивно организованную совокупность изделий, предназначенных для использования в качестве средств автоматических и автоматизированных систем контроля, измерения, регулирования технологических процессов, а также информационно-измерительных систем. ГПС стала технической базой создания АСУ ТП и АСУ в промышленности. Ее развитие и применение способствовало формализации процесса проектирования АСУ ТП, переходу к машинному проектированию.

В основу создания и совершенствования ГСП положены следующие системотехнические принципы: типизация и минимизация многообразия функций автоматического контроля, регулирования и управления; минимизация номенклатуры технических средств; блочно-модульное построение приборов и устройств; агрегатное построение систем управления на базе унифицированных приборов и устройств; совместимость приборов и устройств.

По функциональному признаку все изделия ГСП подразделены на устройства:

- 1) получения информации о состоянии процесса или объекта;
- 2) приема, преобразования и передачи информации по каналам связи;
- 3) преобразования, хранения и обработки информации, формирования команд управления;
- 4) использования командной информации.

В *первую группу* устройств в зависимости от способа представления информации входят датчики, нормирующие преобразователи, формирующие унифицированный сигнал связи, приборы, обеспечивающие представление измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, и устройства алфавитно-цифровой информации, вводимой оператором вручную. Средства получения информации являются самой многочисленной группой изделий государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации – более половины номенклатуры всех технических средств.

Вторая группа устройств содержит коммутаторы измерительных цепей, преобразователи сигналов и кодов, шифраторы и дешифраторы, согласующие устройства, средства телесигнализации, телеизмерения и телеуправления. Эти устройства используют для преобразования как измерительных, так и управляющих сигналов.

Третью группу составляют анализаторы сигналов, функциональные и

операционные преобразователи, логические устройства и устройства памяти, задатчики, регуляторы, управляющие вычислительные устройства и комплексы.

В *четвертую группу* входят исполнительные устройства: электрические, пневматические, гидравлические или комбинированные исполнительные механизмы, усилители мощности, вспомогательные устройства представления информации.

Минимизация номенклатуры средств контроля и управления реализуется на основе двух идей: унификации устройств одного функционального назначения на основе параметрического ряда этих изделий и агрегатирования комплекса технических средств для решения крупных функциональных задач.

Процесс минимизации начинается с отбора некоторых основных параметров приборов и устройств, выделения из их числа главного параметра и установления минимального необходимого числа устройств для перекрытия всего диапазона изменения главного параметра. При этом переход от диапазона использования одного устройства к диапазону использования другого подчиняется определенным закономерностям. Преимущественно используется геометрическая прогрессия, основанная на ряде предпочтительных чисел. Вся совокупность изделий одинакового функционального назначения называется *параметрическим рядом*.

В настоящее время разработаны параметрические ряды датчиков давления, расхода, уровня и электроизмерительных приборов. Тем не менее продолжается их оптимизация по технико-экономическим показателям, например, по критерию минимума суммарных затрат на удовлетворение заданных потребностей. Этот критерий основан на противоречии между интересами потребителя и изготовителя: чем меньше в ряду приборов, тем меньше затраты на разработку, освоение, тем большими партиями они выпускаются, что также снижает затраты изготовителя. Увеличение числа приборов в ряду дает экономию потребителю за счет более эффективного использования возможностей приборов или за счет более точного соблюдения режима технологического процесса.

Агрегатные комплексы (АК) представляют собой совокупность технических средств, организованных в виде функционально-параметрических рядов, охватывающих требуемые диапазоны измерения в различных условиях эксплуатации и обеспечивающих выполнение всех функций в пределах заданного класса задач.

Реализация принципа агрегатирования на этапах построения сложных управляющих систем на базе унифицированных блоков и устройств позволяет существенно упростить и ускорить процесс создания АСУ, создает предпосылки для автоматизации их проектирования. К очень важным достоинствам агрегатного построения технических средств можно отнести возможность совершенствования изделий без полного их обновления.

Принцип агрегатирования в ГСП применяется очень широко. Унифицированная базовая конструкция датчиков теплоэнергетических величин с унифицированными пневматическим и электрическим сигналами была создана всего из 600 наименований деталей, при этом получили 136 типов и 863

модификации датчиков.

На более высоких уровнях проектирования изделий ГСП в качестве конструктивной основы используют комплекс унифицированных типов (модульных) конструкций (УТК). Все детали и узлы комплекса подразделены на четыре категории изделий таким образом, что элементы изделий низшего порядка предназначены для преобразования в элементы изделий высшего порядка.

Заложенные в ГСП общие для всех изделий понятия совместимости можно сформулировать следующим образом.

Информационная совместимость – совокупность стандартизированных характеристик, обеспечивающих согласованность сигналов связи по видам и номенклатуре, их информативным параметрам, уровням, пространственно-временным соотношениям, логическим соотношениям и типу логики. Для всех изделий ГСП приняты унифицированные сигналы связи и единые интерфейсы – совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих взаимодействие устройств в системе.

Конструктивная совместимость – совокупность свойств, обеспечивающих согласованность конструктивных параметров и механическое сопряжение технических средств, а также выполнение эргономических норм и эстетических требований при совместном использовании.

Эксплуатационная совместимость – совокупность свойств, обеспечивающих работоспособность и надежность функционирования технических средств при совместном использовании в производственных условиях, а также удобство обслуживания, настройки и ремонта.

Метрологическая совместимость – совокупность выбранных метрологических характеристик и свойств средств измерений, обеспечивающих сопоставимость результатов измерений и возможность расчета погрешности результатов измерений при работе технических средств в составе систем.

1.2. Структура

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации представляет собой большой, сложный и непрерывно развивающийся комплекс приборов и устройств, серийно выпускаемых промышленностью и предназначенных для автоматизации контроля и управления различными технологическими процессами и оборудованием.

По роду используемой энергии носителя информационных сигналов устройства ГСП подразделяются на электрические, пневматические, гидравлические, а также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии, – приборы и регуляторы прямого действия. Для того чтобы обеспечить совместную работу устройств различных групп, применяют соответствующие преобразователи сигналов. В АСУ наиболее эффективным является комбинированное применение устройств различных групп.

Достоинствами электрических приборов являются высокая чувствительность, точность, быстродействие, удобство передачи, хранения и обработки информации. Пневматические приборы обеспечивают повышенную безопасность при применении в легковоспламеняемых и взрывоопасных средах, высокую надежность в тяжелых условиях работы, в агрессивной атмосфере. Однако они уступают электронным приборам по быстродействию, возможности передачи сигнала на большие расстояния.

Гидравлические приборы позволяют получать точные перемещения исполнительных механизмов.

По функционально-целевому признаку ГСП представляет собой четырехуровневую иерархическую структуру. На первом (нижнем) уровне расположены средства получения информации для воздействия на процесс и средства, непосредственно взаимодействующие с объектом управления. Они обеспечивают информацией все вышеразположенные средства.

На втором уровне находятся средства локального контроля и регулирования, с помощью которых осуществляются одноконтурные системы контроля и регулирования простых объектов или автономного контроля и регулирования отдельных параметров сложных объектов. Как правило, эти средства выпускают в составе параметрических рядов и унифицированных комплексов, создаваемых на основе одной или нескольких базовых моделей.

На третьем уровне расположены устройства централизованного контроля и регулирования, позволяющие реализовать связанное регулирование, косвенные измерения, многоступенчатые защиты и логические операции при пуске и останове объекта. Они предназначены для построения АСУ ТП, имеющих несколько сотен контролируемых и регулируемых параметров.

На четвертом (верхнем) уровне расположены средства автоматизации, предназначенные для работы в составе управляющих вычислительных комплексов со сложными алгоритмами управления, в том числе для решения оптимизационных, диспетчерских и других задач.

В технической документации наиболее широко используется такой классификационный признак, как *тип изделия* – совокупность изделий одинакового функционального назначения и принципа действия, сходных по конструктивному исполнению и имеющих одинаковые главные параметры. В состав типа может входить несколько типоразмеров и модификаций или исполнения изделия. *Типоразмеры* одного типа различаются значениями главного параметра и обычно выделяются в одно-функциональных изделиях.

Модификация – совокупность изделий одного типа, имеющих определенные конструктивные особенности или определенное значение неглавного параметра. Под *исполнением* обычно понимают изделия одного типа, имеющие определенные конструктивные особенности, влияющие на их эксплуатационные характеристики, например, тропическое или морское исполнение.

Более крупной классификационной группировкой, чем тип, является *комплекс*. Они бывают унифицированные и агрегатные. Отличительной особенностью *унифицированного комплекса* является то, что любые сочетания

технических средств комплекса между собой не приводят к реализации этими средствами новых функций. В *агрегатных комплексах* сочетанием технических средств можно реализовать новые функции. В настоящее время промышленностью выпускается примерно 30 агрегатных комплексов, предназначенных для получения, хранения, обработки информации, ее передачи, управления и исследования технологических процессов и объектов и т. д. Наиболее широко используется агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники (АСЭТ), вычислительной техники (АСВТ), телемеханической техники (АСТТ), средств сбора первичной информации (АСПИ) и др.

1.3. Информационные связи

Обмен информацией между техническими средствами ГСП реализуется при помощи сигналов связи и интерфейсов. Непрерывные (аналоговые) сигналы используются на нижних уровнях систем контроля и управления для получения измерительной информации и исполнения управляющих сигналов. На более высоких уровнях систем управления используют цифровые (дискретные) сигналы, обеспечивающие более надежную обработку сигналов. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой применяют аналого-цифровые преобразователи, выполняющие квантование по уровню и дискретизацию по времени аналоговых сигналов.

В АСУ наиболее распространены электрические сигналы связи, достоинствами которых являются высокая скорость передачи сигнала, низкая стоимость и доступность источников энергии, простота прокладки линий связи. Пневматические сигналы применяют в основном в нефтяной, химической и нефтехимической промышленности, где необходимо обеспечить взрывобезопасность и не требуется высокое быстродействие. Гидравлические сигналы в основном применяют в гидравлических следящих системах и устройствах управления гидравлическими исполнительными механизмами.

Информационные сигналы могут быть представлены в естественном или унифицированном видах. *Естественным сигналом* называется сигнал первичного измерительного преобразователя, вид и диапазон изменения которого определяются физическими свойствами преобразователя и диапазоном изменения измеряемой величины. Обычно это выходные сигналы измерительных преобразователей, чаще всего электрические, которые можно передать на небольшое расстояние (до нескольких метров).

У *унифицированного сигнала* вид носителя информации и диапазон его изменения не зависят от измеряемой величины и метода измерения. Обычно унифицированный сигнал получают из естественного сигнала с помощью встроенных или внешних нормирующих преобразователей.

Из электрических сигналов наиболее распространены унифицированные сигналы постоянного тока и напряжения. Частотные сигналы используются в телемеханической аппаратуре и в комплексе технических средств локальных

информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС). Сигнал взаимной индуктивности применяется в датчиках теплоэнергетических параметров, что обеспечивает высокую надежность и устойчивость к воздействию окружающей среды при простой конструкции. Импульсные сигналы используются для контроля состояния двухпозиционных устройств, передачи командных сигналов.

При создании сложных систем, особенно на базе микропроцессорных устройств и вычислительных средств, обмен информацией между техническими средствами верхнего уровня осуществляется с помощью интерфейсов. *Интерфейс*, или сопряжение ввода-вывода, – это совокупность программных и аппаратных средств, устанавливающих и реализующих взаимодействие устройств, входящих в систему, и предназначенных для сбора, переработки и использования информации.

По определению интерфейс состоит из программной и аппаратной частей. Программная (информационная) часть определяет протокол (порядок) обмена сигналами и информацией (алгоритмы и временные диаграммы). Аппаратная часть (интерфейсные карты, платы) позволяет осуществлять информационный обмен управляющими, адресными, оповестительными и другими сигналами между функциональными модулями.

Интерфейсы определяют скорость сбора информации, загрузку памяти ЭВМ или контроллера, стоимость аппаратуры, поэтому в настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию рациональных интерфейсов.

1.4. Измерительные преобразователи

Необходимую для управления информацию о состоянии объекта и внешних воздействиях получают в виде значений отдельных физических величин с помощью соответствующих технических устройств, которые называются *измерительными преобразователями* (ИП).

В отличие от измерительных приборов, где такая информация дана в виде, удобном для непосредственного восприятия оператором-человеком, информация в ИП представляется в виде определенной физической величины, удобной для передачи и дальнейшего преобразования в системе автоматики. Эту величину называют сигналом, и она однозначно связана с контролируемой физической величиной или параметром того или иного технологического процесса.

ГСП охватывает лишь часть контролируемых величин, которые наиболее часто используются в практике автоматики и автоматизации. В ГСП все контролируемые величины разделены на следующие группы:

- 1) теплоэнергетические величины – температура, давление, перепад давлений, уровень и расход;
- 2) электроэнергетические величины – постоянные и переменные ток и напряжение, мощность (активная и реактивная), коэффициент мощности, частота и сопротивление изоляции;

3) механические величины – линейные угловые перемещения, угловая скорость, деформация, усилия, вращающие моменты, количество изделий, твердость материалов, вибрация, шум и масса;

4) величины, характеризующие физические свойства, – влажность, электропроводность, плотность, вязкость, освещенность и др.;

5) величины, определяющие химические свойства.

Устройства, в которых однократно (первично) преобразуется измеряемая физическая величина, принято называть первичными ИП. ИП могут соединяться, образуя следующие структурные схемы:

- схема однократного прямого преобразования;
- схема последовательного прямого преобразования;
- дифференциальная схема;
- схема с обратной связью (компенсационная).

Простейшие ИП состоят из одного преобразователя. В случае последовательного соединения нескольких первичных преобразователей выходная величина предыдущего преобразователя является входной величиной последующего. Последовательное соединение ИП применяют в том случае, когда однократное преобразование не дает выходного сигнала, удобного для использования. При дифференциальной схеме устраняется влияние на результат преобразования искажающих внешних факторов благодаря сопоставлению (сравнению) преобразованной и некоторой эталонной величин, одинаково подверженных действию этих факторов. Схема ИП с обратной связью характеризуется высокой точностью, универсальностью и малой зависимостью коэффициента преобразования от внешних возмущений.

ИП бывают с естественным и унифицированным выходными сигналами.

Естественный сигнал формируется первичными ИП естественным путем и представляет собой угол поворота, перемещение, усилие, напряжение (постоянное и переменное), сопротивление (активное и комплексное), электрическую емкость, частоту и др. ИП с естественным выходным сигналом (термопары, терморезисторы, тензодатчики и др.) широко применяются при автоматизации простых объектов.

Унифицированный сигнал – это сигнал определенной физической природы, изменяющийся в определенных фиксированных пределах независимо от вида измеряемой величины, метода и диапазона ее измерения. Среди унифицированных сигналов наибольшее распространение получили электрические сигналы постоянного и переменного тока, напряжения и частоты, а также пневматические сигналы.

К основным видам аналоговых унифицированных сигналов относятся:

- 1) электрические постоянного тока, мА: 0... 5; 0... 20; 4... 20; -5... 0... 5;
- 2) электрические постоянного напряжения, В: 0... 10 мВ; 0...20 мВ; -10...0...10 мВ; 0... 1 В; -1 ...0... 1 В;
- 3) электрические переменного напряжения, В: 0...2; -1 ...0... 1;
- 4) электрические переменного тока на частоте, кГц: 4...8; 2...4;
- 5) пневматические, кПа: 20... 100.

Преобразователи, служащие для изменения масштаба сигнала, называются

масштабными ИП.

Для получения унифицированных аналоговых сигналов применяют ИП, называемые *нормирующими*.

Специфика контролируемой величины существенно влияет на метод преобразования, используемый в первичном ИП.

Преобразователи, применяемые в ГСП, подразделяются на шесть групп: механические, электромеханические, тепловые, электрохимические, оптические и электронно-ионизационные.

Преобразователи, предназначенные для передачи сигнала измерительной информации на расстояние, называются *передающими* и используются в системах телемеханики.

1.5. Управляющие и корректирующие элементы

Управляющие и корректирующие элементы автоматики выполняют функции формирования сигналов управления исполнительными элементами системы. В целях формирования этих воздействий могут использоваться различные операции: усиления входных сигналов, хранения, передачи и дальнейшего преобразования согласно принятому алгоритму.

Нередко для автоматического управления несложными объектами применяют простые управляющие элементы: усилители, реле и логические устройства. Для реализации более сложных алгоритмов управления (пропорционально-интегрального – ПИ, пропорционально-интегрально-дифференциального – ПИД) в цепи обратной связи электронного усилителя служат различные корректирующие элементы, например, ЛС-цепочки. Корректирующие элементы могут и не входить в состав управляющих элементов. Дальнейшее совершенствование управления (реализация функций адаптации, логических операций при пуске и останове объекта, многоступенчатой защиты и др.) предполагает использование агрегатированных комплексов автоматики, предусмотренных номенклатурой ГСП, а также управляющих вычислительных машин.

В качестве управляющих элементов можно использовать микроконтроллеры и микропроцессорные системы, выполненные в виде больших интегральных схем (БИС), характеризующихся рядом технических и эксплуатационных преимуществ.

Выходные каскады управляющих элементов представляют собой усилители мощности. Бесконтактные усилители мощности бывают тиристорными или магнитными.

Выходными каскадами управляющих элементов могут быть также гидравлические или пневматические усилители. В конструктивном отношении они имеют много общего и отличаются лишь энергоносителем (рабочим телом), в качестве которого в гидравлических усилителях используют жидкость под высоким давлением, а в пневматических – газ.

Гидро- и пневмоусилители конструктивно выполняют совместно с

исполнительными элементами. Основные преимущества таких усилителей: большой коэффициент усиления по мощности; высокое быстродействие; малые габаритные размеры и металлоемкость на 1 кВт выходной мощности. Недостаток их применения заключается в необходимости использования специализированных источников питания (гидравлических насосов, компрессоров). Кроме того, гидросистемы требуют более тщательной герметизации линий связи и нуждаются в специальных емкостях для хранения рабочей среды (воды или специального негорючего масла).

1.6. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

Для управления объектами в соответствующих системах автоматики предусматриваются исполнительные устройства, в состав которых входят исполнительные механизмы (ИМ) и регулирующие органы.

По виду потребляемой энергии ИМ подразделяются на электрические, гидравлические и пневматические.

Электрические исполнительные механизмы (ЭИМ) получили наиболее широкое распространение. Их выпускают постоянной и переменной скорости.

В системах управления технологическими процессами чаще всего применяют ЭИМ постоянной скорости. В результате повторно-кратковременного включения асинхронного электродвигателя ЭИМ реализует закон перемещения регулирующего органа (РО), формируемый управляющим элементом системы.

ЭИМ подразделяются также по характеру перемещения РО на следующие виды:

- 1) механизмы электрические однооборотные (МЭО);
- 2) механизмы электрические многооборотные (МЭМ);
- 3) механизмы электрические прямоходные (МЭП) с поступательным движением РО.

Обычно ЭИМ состоит из электродвигателя, редуктора, аппаратуры контроля и управления, а также из приставки, формирующей перемещение выходного вала.

Для улучшения динамических характеристик и фиксации выходного вала ЭИМ применяют тормоз.

Для обратной связи и контроля положения выходного вала служит датчик положения.

При управлении ЭИМ используют контактные и бесконтактные системы. В первом случае трехфазным асинхронным электродвигателем управляют посредством релейно-контактной аппаратуры, а во втором случае применяют тиристорное управление специальными двухфазными конденсаторными электродвигателями.

Если ЭИМ оснащен трехфазным асинхронным электродвигателем с контактным управлением, то в наименование добавляется буква К (МЭОК), а если управление бесконтактное – буква Б (МЭОБ).

Исполнительные элементы систем в пожаро- и взрывоопасных цехах

выполняют на базе пневматических исполнительных механизмов (ПИМ).

К недостаткам пневматических средств управления относятся следующие: неудобство в наладке, связанное со сложностью оперативных изменений давления воздуха при проверке работоспособности; необходимость применения специальных компрессорных установок питания.

С помощью гидравлических исполнительных механизмов (ГИМ) можно наиболее надежно и просто реализовать преобразование управляющих сигналов-команд в перемещение РО, осуществляемое с большой скоростью и мощностью. ГИМ надежно работают в неблагоприятных условиях (при высокой влажности, повышенных температурах, вибрациях).

1.7. Агрегатирование – основа систематического подхода к созданию современной электроизмерительной аппаратуры

Краткий анализ современного уровня развития электроизмерительной техники (ЭИТ) показывает, что очевидна неуклонная тенденция к усложнению и росту многообразия измерительной аппаратуры.

Кроме автономного использования эта аппаратура находит все более широкое применение в различного рода информационных системах, например, в АСУ ТП. Это накладывает свой отпечаток на принципы проектирования, изготовления и эксплуатации электроизмерительной аппаратуры, в основе которых может лежать только современный системный подход.

Системный подход в данном случае означает, что решение проблемы создания средств ЭИТ есть решение комплекса работ, направленных на:

- 1) достижение предельного уровня унификации и стандартизации средств ЭИТ, причем, в первую очередь, элементной и конструктивной баз;
- 2) установление номенклатуры и состава, обеспечивающих выполнение требований, предъявляемых к ЭИТ, определенным числом модификаций средств одного типа (с позиций совокупных затрат на проектирование, изготовление и эксплуатацию);
- 3) углубление предметной и технологической специализаций предприятий разработчиков и изготовителей.

Реализацию этого комплексного подхода и преследует создание агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники (АСЭТ).

Средства комплекса – это средства ЭИТ, предназначенные для совместного использования по установленным правилам компоновки при создании информационных измерительных систем (ИИС) различного назначения: от элементарных систем, представляющих собой объединение всего лишь нескольких средств ЭИТ, до сложных многофункциональных ИИС широкого назначения или специализированных систем для автоматизации измерения и управления в отдельных областях промышленности и научных исследований.

Кроме того, такие средства комплекса, как измерительная аппаратура, могут использоваться в качестве автономных приборов или в составе простейших соединений, обеспечивающих автоматизацию измерений и

регистрацию данных.

Таким образом, создание АСЭТ предусматривает удовлетворение требований промышленности в средствах измерения электрических и магнитных величин в различных отраслях и, в первую очередь, в машиностроении, металлургии, энергетике и научных исследованиях.

Переход к созданию средств ЭИТ в рамках АСЭТ обеспечивает возможность замены индивидуальной разработки сложных измерительных устройств ИИС в целом их проектной компоновкой с максимальной преемственностью решений и последующим переходом к проектированию с помощью ЭВМ.

Разработка и внедрение в производство средств АСЭТ позволяет:

- сократить затраты на разработку устройств ЭИТ и ИИС;
- повысить удельный вес заимствованных, специализированных и кооперированных деталей, узлов, блоков и средств, т. е. в конечном счете повысить производительность труда, а также увеличить объем производства на действующих мощностях за счет повышения производительности труда;
- сократить затраты на производство и сократить капиталовложения на развитие мощностей.

В общем случае принцип агрегатирования заключается в следующем:

- Машины, системы и другие сложные технические устройства представляют собой агрегат, состоящий из нескольких независимых средств, блоков или узлов.
- Расчленение на эти средства, блоки или узлы производится так, чтобы каждый из них выполнял определенную функцию, присущую ряду агрегатов, и имел конструктивно-техническую законченность.
- Виды сопряжений средств, блоков или узлов выбирают так, чтобы их можно было собирать в агрегатах с заданными технико-эксплуатационными характеристиками.
- Функциональное многообразие агрегатов достигается различным сочетанием средств, блоков и узлов, а также возможностью наращивания структуры агрегатов в процессе их эксплуатации.
- Средства одного функционального назначения образуют параметрические ряды.

Специфика агрегатирования в приборостроительной промышленности при создании средств автоматизации и систем измерения, контроля, регулирования и управления связана с большим числом характеристик средств, их разнохарактерностью и сложностью описания, что определяет следующие особенности:

- необходимость расширения понятия совместимости средств, развития ее видов, отражающих средства автоматизации по различным характеристикам;
- законченность и аттестованность по значительно большему числу параметров, чем, например, в машиностроении;
- многомерность параметрических рядов;
- усложнение процедуры компоновки агрегата с заданными технико-эксплуатационными характеристиками.

1.8. Структура и состав агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники

Решение методических вопросов определения структуры АСЭТ, изложенных в п. 1.7 позволило разработать структуру АСЭТ, исходя из удовлетворения требований функциональной и структурной полноты комплекса. Она включает в себя четыре основные укрупненные группы (рис. 1.1):

- устройства сбора и преобразования информации (первичные и вторичные преобразователи информации, коммутаторы и др.);
- устройства измерения и представления информации;
- устройства управления и блоки связи;
- вспомогательные устройства.

В свою очередь, каждая из указанных групп включает в себя номенклатурные группы средств АСЭТ.

Номенклатурными группами средств АСЭТ являются:

- *измерительные приборы*, реализующие определенную функциональную зависимость и предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи и дальнейшего преобразования, но не поддающейся непосредственному восприятию человеком;
- *коммутаторы*, обеспечивающие передачу и подключение по определенной программе или периодических сигналов, представленных в виде аналоговых электрических величин, или цифровых кодов от одних средств к другим;
- *аналого-цифровые преобразователи*, осуществляющие автоматическое преобразование аналоговой величины в цифровой код;
- *цифро-аналоговые преобразователи*, осуществляющие автоматическое преобразование сигналов, представленных в виде цифровых кодов, в аналоговые электрические величины;
- *компараторы*, предназначенные для вывода сигналов, характеризующих соотношение между текущим и заранее заданным значениями измеряемой (контролируемой) величины;
- *устройства измерения электрических величин*, обеспечивающие измерение значений электрических величин и представление результатов измерения в форме, доступной для восприятия человеком или компьютером;
- *устройства представления информации*, предназначенные для представления (индикации или регистрации) информации об исследуемой величине в форме, доступной для восприятия человеком;
- *устройства управления*, предназначенные для организации совместной работы всех блоков системы по определенному алгоритму;
- *устройства связи*, осуществляющие согласование между сопрягаемыми агрегатными средствами.

Каждая из перечисленных номенклатурных групп представляет собой широкую гамму агрегатных средств, которые могут быть классифицированы по критериям применения в системах на подгруппы, причем в большинстве случаев по нескольким уровням.

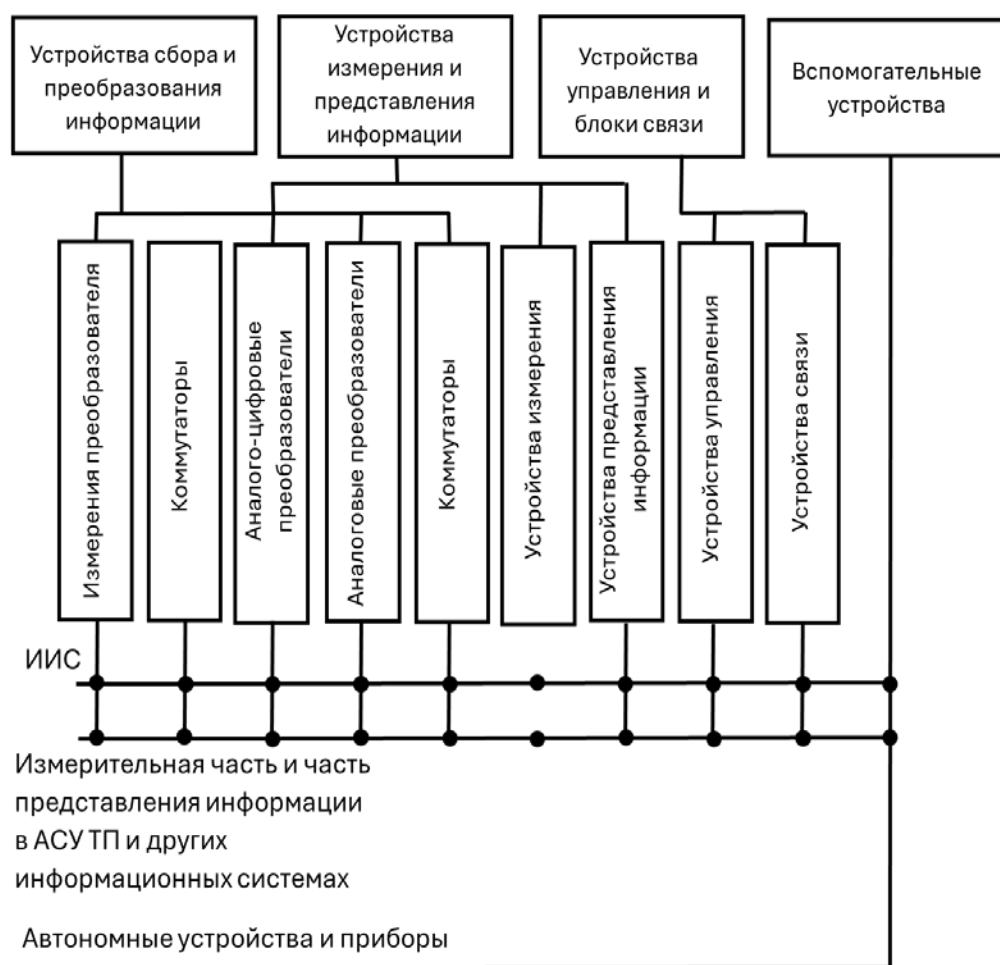


Рисунок 1.1 – Структурная схема агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники

1.9. Основные сведения об измерениях. Методы измерений

Изложенный выше материал, связанный с видами измерений, позволяет сделать вывод о том, что прямые измерения, являясь самостоятельными и наиболее распространенными, в то же время служат основой для более сложных видов измерений (косвенных, совокупных и совместных).

В связи с этим методы прямых измерений, рассматриваемые ниже, являются общими для всех видов измерений и в дальнейшем будут называться просто методами измерений. При этом учтено, что метод измерений представляет собой совокупность приемов использования принципов и средств измерений: метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой (мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера).

Классификационным признаком в таком разделении методов измерений является наличие или отсутствие при измерениях меры.

Для удобства изложения в дальнейшем используется классификация методов измерений, приведенная на рис. 1.2.

Метод непосредственной оценки (отсчета) – метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия (прибор прямого действия – измерительный прибор, в котором сигнал измерительной информации движется в одном направлении, а именно с входа на выход).

Метод сравнения с мерой – метод измерения, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Методы сравнения в зависимости от наличия или отсутствия при сравнении разности между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, подразделяют на нулевой и дифференциальный.

Нулевой метод – это метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля (прибор сравнения, или компаратор, – измерительный прибор, предназначенный для сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно).

Дифференциальный метод – это метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной, воспроизводимой мерой.

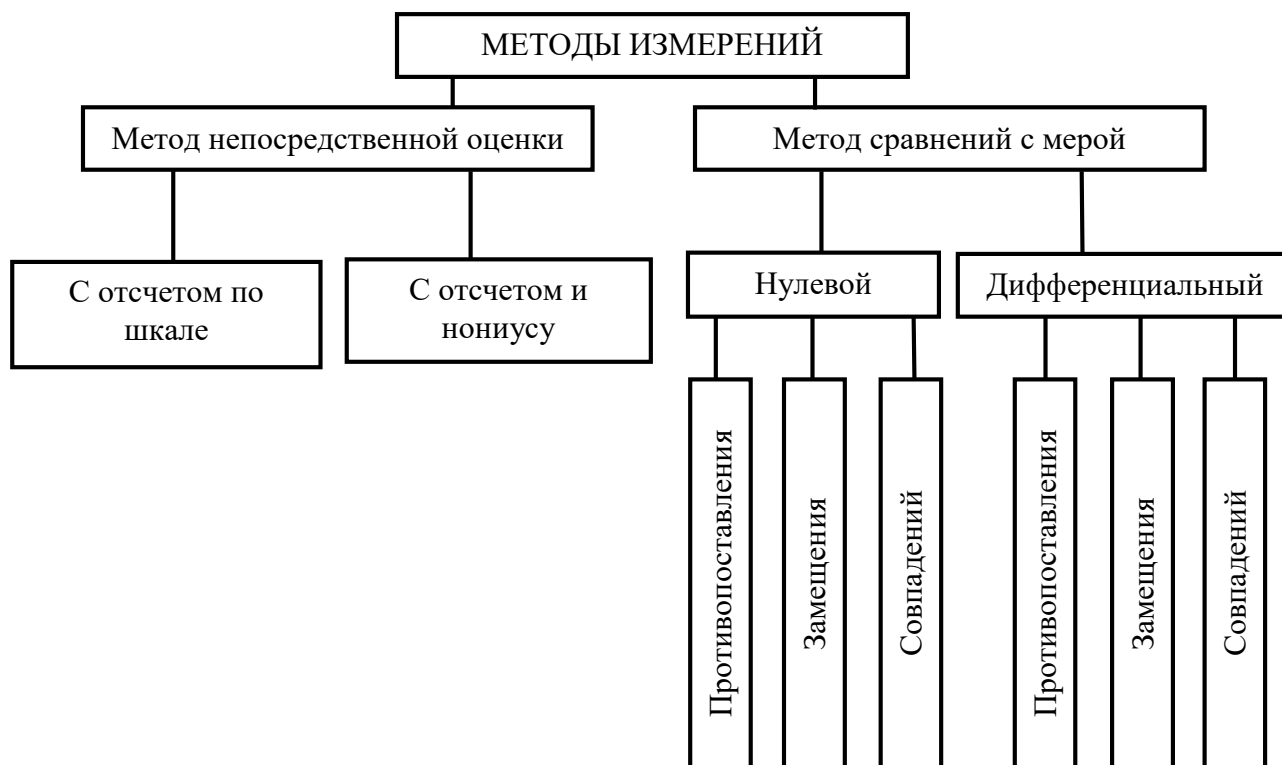


Рисунок 1.2 – Классификация методов измерения

Как в нулевом, так и в дифференциальном методах могут быть выделены методы противопоставления, замещения и совпадения.

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами.

Метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

Метод совпадения – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Для пояснения сущности приведенных определений обратимся к примерам реализации методов измерений.

Метод непосредственной оценки с отсчетом показаний по шкале прибора характеризуется тем, что лицу, осуществляющему измерение, не требуется каких-либо вычислений, кроме умножения показаний прибора на некоторую постоянную, соответствующую данному прибору. Примером данного метода измерений может служить взвешивание груза X на пружинных весах (рис. 1.3). Масса груза здесь определяется на основе измерительного преобразования по значению δ деформации пружины.

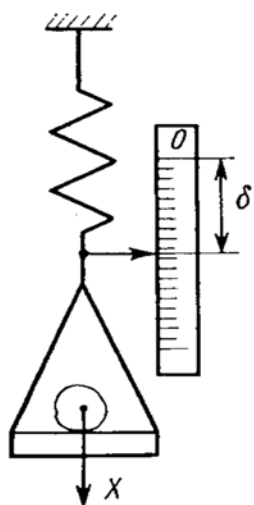


Рисунок 1.3 – Схема реализации измерений методом непосредственной оценки

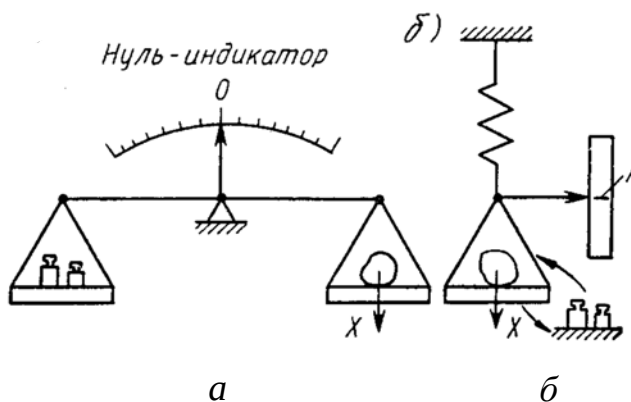


Рисунок 1.4 – Схема реализации измерений нулевыми методами сравнения с мерой:
а – взвешивание груза X на равноплечих весах; б – реализация метода полного замещения

Процесс измерения по методу непосредственной оценки характеризуется быстротой, что делает его часто незаменимым для практического использования. Однако точность измерения обычно оказывается невысокой из-за воздействия влияющих величин и необходимости градуировки шкал приборов.

Для точности измерения по методу непосредственной оценки при выполнении некоторых измерений, в частности линейных, применяют метод отсчета по шкале и нониусу (см. рис. 1.2) или верньеру (вспомогательной шкале). Этот метод характеризуется использованием совпадения отметок шкал (основной и вспомогательной).

Нулевой метод измерения характеризуется равенством воздействий, оказываемых измеряемой величиной и мерой, на прибор, используемый для сравнения. В соответствии с классификацией (см. рис. 1.2) различают *нулевые методы противопоставления, замещения и совпадения*. Первые два из этих методов иногда называют соответственно методами *полного противопоставления* и *полного замещения*.

Примером нулевого метода противопоставления может служить взвешивание груза X на равноплечих весах (рис. 1.4а), когда масса груза определяется массой гирь, уравнивающих воздействие груза на рычаг весов. Состояние равновесия определяется по положению указателя нуль-индикатора, который в этом случае должен находиться на нулевой отметке. Весы при таком измерении выполняют функцию компаратора. Данный метод используется для измерения самых разнообразных физических величин и, как правило, обеспечивает большую точность измерения, чем метод непосредственной оценки, за счет уменьшения влияния на результат измерения погрешностей средства измерений, которое в данном случае осуществляет только сравнение воздействий, создаваемых измеряемой величиной и мерой.

Недостатком данного метода является необходимость иметь большое число мер различных значений для составления сочетаний, воспроизводящих величины, равные измеряемым, т. е. необходимость воспроизводить любое значение известной физической величины без существенного понижения точности. Как правило, это связано с существенными трудностями. Разновидностью рассмотренного метода является *компенсационный метод измерений*, применяемый в тех случаях, когда важно измерить физическую величину, не нарушая процесса, в котором она наблюдается. При подключении измерительного устройства, реализующего компенсационный метод, к объекту измерения на этом устройстве создается действие, направленное навстречу действию, создаваемому изучаемым явлением. При этом создаваемое в измерительном устройстве явление изменяется до тех пор, пока не будет достигнута полная компенсация действия изучаемого явления на измерительное устройство. По размеру физической величины, создающей компенсирующее явление, судят о размере измеряемой физической величины. При условии полной компенсации изучаемое явление протекает в объекте так же, как оно протекает в случае, когда к объекту не подключено измерительное устройство.

Нулевой метод замещения состоит в том, что измеряемая физическая величина и мера последовательно воздействуют на измерительный прибор. При этом значение меры подбирают таким, чтобы ее воздействие на измерительный прибор было равно воздействию измеряемой физической величины. На рис. 1.4б показан пример реализации метода полного замещения для случая измерения массы груза. Здесь на пружинные весы устанавливают груз X и делают отметку

A на шкале как результат его взвешивания. При этом показания пружинных весов принципиально можно и не считывать. Затем снимают груз и на чашку устанавливают такой набор гирь, который обеспечивает такую же деформацию пружины, как и груз X , о чем судят по установке стрелки против отметки A .

Нулевой метод замещения применяется в тех случаях, когда производятся точные измерения параметров, так как он позволяет практически исключить влияние изменений характеристик используемого средства измерений (в рассмотренном случае – изменение характеристик пружины) на результат измерения.

Нулевой метод совпадения состоит в совпадении сигналов двух периодических процессов, характеристика одного из которых измеряется, а другого – используется в качестве меры.

Дифференциальный метод измерений характеризуется тем, что с помощью измерительного прибора методом непосредственной оценки измеряется разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод позволяет получить высокоточные результаты даже при использовании для измерения указанной разности относительно грубых средств измерений. Реализация дифференциального метода возможна только при условии наличия высокоточной меры, близкой по значению к измеряемой величине.

Исходя из классификации, приведенной на рис. 1.2, различают дифференциальные методы противопоставления, замещения и совпадения.

Первые два из них иногда называют методами *неполного противопоставления* и *неполного замещения*.

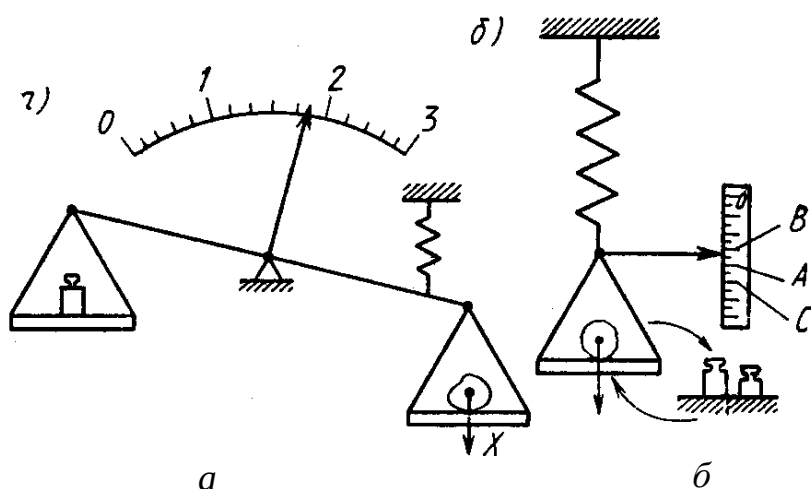


Рисунок 1.5 – Схемы реализации измерений дифференциальными методами сравнения с мерой:
 а – метод неполного противопоставления; б – метод замещения

Примером *метода неполного противопоставления* может служить взвешивание на равноплечих весах, показанных на рис. 1.5а. Здесь действие груза X уравнивается действием гири, служащей мерой, и силой упругой

деформации пружины. По существу, в данном случае по величине деформации пружины, значение которой может быть отсчитано по шкале, измеряется разность воздействий груза и гири на пружину. Так определяют разность их масс. Массу же груза определяют после взвешивания как сумму массы гири и показаний, считанных по шкале.

Сущность дифференциального *метода замещения* можно уяснить, рассмотрев пример (рис. 1.5б) взвешивания груза X на пружинных весах в том случае, когда из имеющегося набора гирь не удастся составить сочетание, позволяющее добиться такого показания весов, при котором стрелка установится на отметку A , соответствующую показанию весов при установке на них измеряемого груза X . Предположим, что при установке на весы подобранного набора гирь стрелка весов устанавливается на отметке шкалы B . Когда к подобранному набору добавляются гири с наименьшей массой, стрелка устанавливается на отметке шкалы C . В данном случае замещение получается неполным. Для определения массы груза прибегают к интерполяции, с помощью которой по известному значению массы наименьшей гири и числу делений шкалы между отметками B и C рассчитывают значение массы груза и массы подобранного набора гирь, а затем определяют массу груза.

Сущность дифференциального *метода совпадения* состоит в том, что совпадение сигналов двух периодических процессов является неполным. При этом измеряется характеристика периодического процесса, представляющего собой результат взаимодействия названных выше двух периодических процессов. Результат измерения определяется так же, как во всех дифференциальных методах.

2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Классификация средств измерений

Средства измерений – технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические свойства.

По назначению средства измерений разделяют на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы (рис. 2.1) [1]. По метрологическому назначению средства измерений делят на образцовые и рабочие [1].

Образцовые средства измерений предназначены для поверки по ним как рабочих, так и образцовых средств измерений менее высокой точности. Процесс передачи размера единиц от образцовых средств измерений высшей точности рабочим и образцовым средствам измерений более низкой точности представляет собой поверку средств измерений, поэтому все образцовые средства измерения являются средствами поверки.

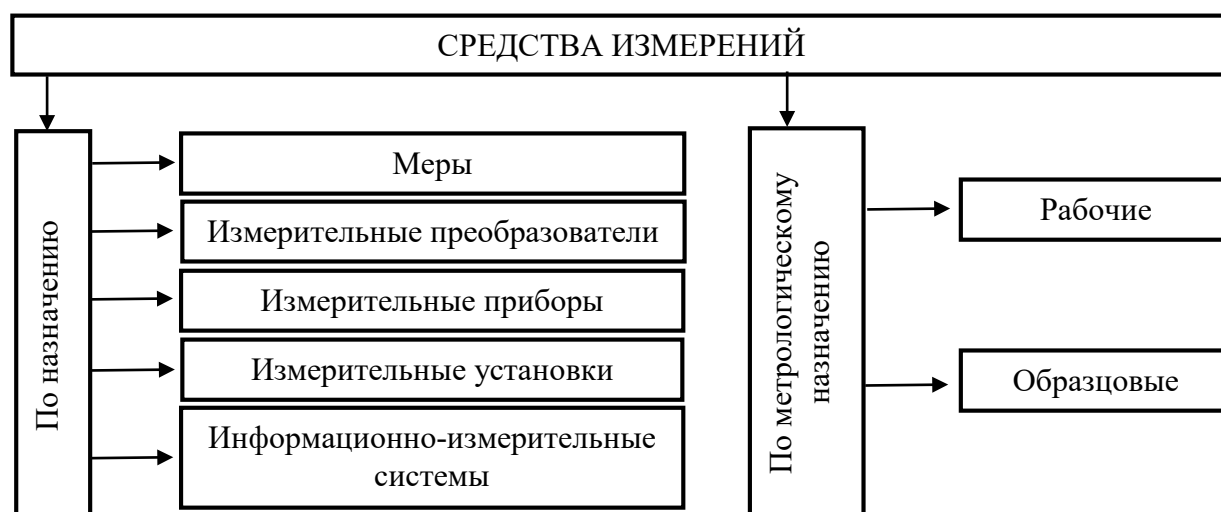


Рисунок 2.1 – Классификация средств измерений

Рабочие средства измерений применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц. Они предназначены для измерений размеров величин, необходимых в разнообразной деятельности человека.

Каждое средство измерения должно применяться только по своему прямому назначению. Не разрешается применять рабочие средства измерений для проведения поверочных работ; точно так же запрещается использование образцовых средств для измерений, не связанных с поверкой.

Запрещение применять образцовые средства измерений для практических измерений – одно из важнейших требований метрологии. Однако им нередко пренебрегают или недооценивают его значение. Каким бы точным ни было бы средство измерений, применяемое для практических измерений, его нельзя использовать для поверки других средств измерений. Само оно должно поверяться по образцовому средству измерений, имеющему более высокую точность.

2.2. Меры и наборы мер

Мерой называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Примерами мер являются аттенюаторы – меры затухания, магазины сопротивлений – меры сопротивления, измерительные генераторы – меры напряжения (мощности) и частоты сигналов и т.д. К мерам относятся также образцы и образцовые вещества [1].

Существуют однозначные и многозначные (переменные) меры (рис. 2.2). Мера, воспроизводящая физическую величину одного размера, называется *однозначной*, например, гиря, плоскопараллельная концевая мера длины, измерительная колба, мера ЭДС – нормальный элемент, конденсатор постоянной емкости. Величины, для которых операция сложения выполняется сравнительно легко, воспроизводятся с помощью многозначных или однозначных мер, объединяемых в наборы или магазины мер [1].

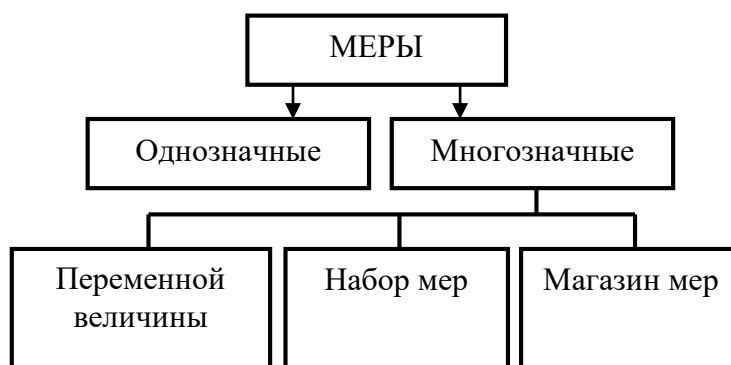


Рисунок 2.2 – Классификация мер

Мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера, называется *многозначной*. Этот ряд может быть непрерывным или дискретным. Наиболее распространенными многозначными мерами являются миллиметровая линейка, вариометр индуктивности, конденсатор переменной емкости.

В качестве многозначной меры может быть использован набор мер – специально подобранный комплект мер, применяемых не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных величин различного размера, например, набор гирь, набор образцовых конденсаторов и т. д.

Магазин мер – это набор мер, конструктивно объединенных в одно целое. Магазин мер имеет коммутирующее устройство для получения требуемого значения воспроизводимой величины, например, магазин активных сопротивлений как набор резисторов.

При изготовлении наборов или магазинов мер к выбору ряда значений предъявляют особые требования. При этом стремятся наиболее рационально, используя наименьшее число мер, обеспечить возможность получения числа сочетаний. Например, набор гирь строится по ряду 1; 2; 2; 5 (в каждом десятичном числовом разряде), что дает возможность воспроизвести все

значения от 1 до 10. Такой ряд признан более рациональным, чем ряд 1; 2; 3; 4, содержащий гири четырех размеров вместо трех. Это имеет большее значение при массовом производстве. Кроме того, гири 2 и 3, а особенно 3 и 4 не очень заметно отличаются по размерам, что усложняет пользование ими.

К наборам плоскопараллельных концевых мер длины предъявляется другое требование: любое значение длины (в заданных пределах) должно воспроизводиться с помощью не более чем четырех-пяти мер. Так, набор из 87 концевых мер от 0,5 до 100 мм позволяет воспроизводить длину от 0,5 до 340 мм с интервалами 0,005; 0,01 и 0,1 мм, применяя не более четырех концевых мер. Меры применяются как самостоятельные средства, так и в качестве элементов других средств измерений (приборов, преобразователей).

2.3. Измерительные преобразователи

Измерительный преобразователь – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Принцип их действия основан на различных физических явлениях. Измерительные преобразователи преобразуют любые физические величины x (электрические, неэлектрические, магнитные) в выходной электрический сигнал $Y = f(x)$.

Измерительные преобразователи являются составными частями измерительных приборов, установок и систем. Измерительные преобразователи можно классифицировать по характеру входной и выходной величин, месту в измерительной цепи, физическим явлениям, положенным в их принцип действия, и другим признакам (рис. 2.3). Физические величины могут быть непрерывными по значению и квантованными (они представляются обычно кодовыми сигналами).

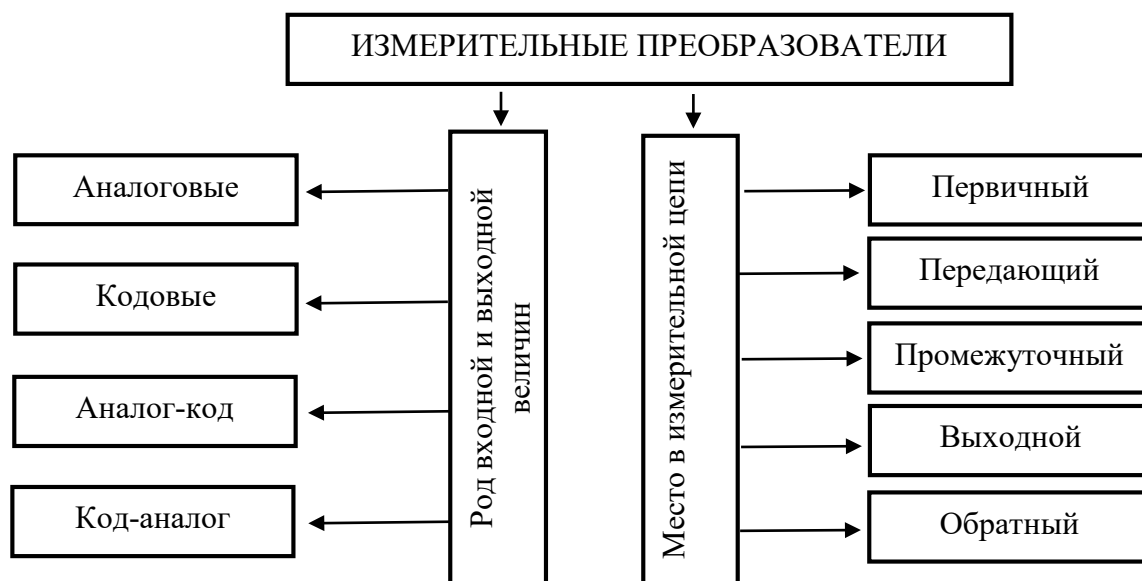


Рисунок 2.3 – Классификация измерительных преобразователей

Если входная и выходная величины измерительного преобразователя – непрерывные величины, такой преобразователь называют аналоговым. Измерительные преобразователи одного кодового сигнала в другой получили название кодовых. Преобразователи аналог-код превращают непрерывную величину в кодовый сигнал, а преобразователи код-аналог – кодовый сигнал в сигнал, непрерывный по значению (например, преобразователь двоичного числа в постоянное напряжение).

По месту, занимаемому в измерительной цепи, средства измерения, преобразователи подразделяются на первичные, передающие, промежуточные, выходные и обратные.

Первичный преобразователь – это преобразователь, к которому подведена измеряемая величина. Для первичных преобразователей характерно то, что на них воздействует непосредственно измеряемая величина. Физическая величина, в которую преобразует измеряемую величину первичный преобразователь, может быть подведена к измерительному механизму, может быть подана на другой преобразователь или использована, например, для целей телеизмерений.

Примером первичного преобразователя может служить термopара в цепи термоэлектрического термометра.

Конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации, называется *датчиком* [1].

Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы. Например, датчики запущенного метеорологического радиозонда передают измерительную информацию о температуре, давлении, влажности и других параметрах атмосферы; тензопреобразователь, наклеенный на упругий элемент и воспринимающий его деформацию, также является датчиком [1].

Передающий преобразователь – измерительный преобразователь, служащий для дистанционной передачи измерительной информации. Для этих преобразователей характерно назначение величины, образуемой на его «выходе». Очевидно, что преобразователь может одновременно выполнять функции первичного и передающего.

Промежуточный преобразователь – преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первичного.

Выходной преобразователь – преобразователь, стоящий последним в измерительной цепи. Он снабжается отсчетным или регистрирующим устройством, фиксирующим значение измеряемой величины.

Измерительные приборы сравнения (п. 2.4) имеют две цепи – прямого преобразования, начиная от входной величины, и обратного преобразования – к входной величине. Измерительные преобразователи, стоящие в цепи обратного преобразования, получили название *обратных*.

Для изменения в определенное число раз значения одной из величин, действующих в измерительной цепи, без изменения ее физической природы

используют *масштабные преобразователи*: делители напряжения, измерительные трансформаторы тока, измерительные усилители и т. п.

Полезно также все измерительные преобразователи разделить на две группы: генераторные (энергетические) и параметрические. Первые характеризуются тем, что для осуществления преобразования не требуется постороннего источника энергии. Генераторный измерительный преобразователь ее вырабатывает сам за счет воздействия преобразуемой величины. Параметрические же преобразователи должны быть возбуждены от постороннего источника энергии. Например, преобразователь в виде термопары для измерения температуры сам вырабатывает электрическую энергию, а термометр сопротивления (нагреваемая проволока) может осуществлять преобразование температуры в сопротивление, только будучи нагретым источником электрического тока.

Измерительные преобразователи могут быть встроены в корпус прибора и вместе с другими его устройствами образовать единую конструкцию. В этом случае метрологические характеристики нормируются для измерительного прибора в целом. В тех случаях, когда измерительные преобразователи (один или несколько) являются конструктивно обособленными элементами, метрологические характеристики нормируются на эти элементы. Это очень важно при построении измерительных средств на базе блочно-модульного принципа, при построении измерительных установок и систем, которые могут включать десятки различных измерительных преобразователей.

Измерительные преобразователи бывают *взаимозаменяемыми, ограниченно-взаимозаменяемыми и невзаимозаменяемыми, или индивидуальными*.

Взаимозаменяемые преобразователи могут без каких-либо ограничений заменять друг друга. При такой замене свойства прибора не должны измениться. Для того чтобы обеспечивалась такая взаимозаменяемость, нормируют ряд характеристик преобразователей. Для них устанавливают и стандартизуют рациональный ряд коэффициентов преобразования. Под коэффициентом преобразования понимается отношение значения величины на входе преобразователя к значению соответствующей ей величины на выходе.

Важные характеристики взаимозаменяемых преобразователей следующие:

- значения входной и выходной величин каждой в отдельности. Так, например, государственными стандартами устанавливаются следующие диапазоны изменения входных и выходных величин: сила постоянного электрического тока $I_0 = 0 \dots 5 \text{ мА}$; $0 \dots 20 \text{ мА}$, постоянное напряжение $U_0 = 0 \dots 10 \text{ В}$, переменное напряжение $U_{\sim} = 0 \dots 2 \text{ В}$, частота электрических колебаний $f = 1500 \dots 2500 \text{ Гц}$; $4000 \dots 8000 \text{ Гц}$ [1]. Установление определенного ряда этих значений и обеспечивает широкую взаимозаменяемость преобразователей. Благодаря установлению таких рядов значительно сокращается количество разновидностей первичных преобразователей и вторичных устройств (конструктивно обособленная остальная часть элементов измерительной цепи);

- точность и постоянство коэффициента преобразования на всем диапазоне его работы.

Для большинства взаимозаменяемых преобразователей устанавливают классы точности. При выборе преобразователя стремятся к тому, чтобы его класс точности, если это возможно, был выше класса точности измерительного прибора, применяемого с преобразователем, иначе говоря, чтобы применение преобразователя как можно меньше снижало общую точность измерения данным прибором.

Требования, предъявляемые к взаимозаменяемым преобразователям, весьма высоки. В ряде случаев некоторые из них невыполнимы или выполнение их экономически нецелесообразно. Тогда их применяют ограниченно, причем ограничение накладывают на какое-либо одно требование.

Чаще всего взаимозаменяемые преобразователи используют только для измерительного прибора одного вида или типа, а иногда даже только одной его конструкции, о чем на преобразователе делается соответствующая надпись.

Применение индивидуальных (невзаимозаменяемых) преобразователей позволяет улучшить метрологические характеристики измерительного прибора и установки за счет специальных регулировок.

2.4. Измерительные приборы

Измерительный прибор – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем [1].

Выработка измерительной информации может основываться на использовании различных физических принципов. Например, для измерения длины применяют механические, оптические, пневматические и электрические измерительные приборы.

Физический принцип, положенный в основу построения измерительного прибора, называют принципом действия прибора, который часто отражается в названии прибора, например, электродинамический ваттметр, термоэлектрический термометр.

Принципиально измерительный прибор состоит из ряда измерительных преобразователей, каналов связи, согласующих элементов, измерительного механизма, которые в совокупности образуют измерительную цепь прибора. Измерительная цепь осуществляет все преобразования сигнала измерительной информации.

Измерительная цепь начинается чувствительным элементом, являющимся составной частью первичного преобразователя. На элемент непосредственно воздействует измеряемая величина. Оканчивается цепь отсчетным устройством, с помощью которого наблюдатель определяет значение измеряемой величины, выраженное в принятых единицах измерения. Это значение называют показанием средства измерения, которое образуется от отсчета (отвлеченного числа), снятого при измерении с отсчетного устройства прибора. Переход от

отсчета к показанию осуществляется умножением отсчета на цену деления шкалы, под которой понимается разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Измерительные приборы можно классифицировать по различным признакам: структуре преобразования; виду выходной информации; способу ее выдачи; роду измеряемой величины; условиям применения и т. д.

Классификация измерительных приборов с учетом этих признаков представлена на рис. 2.4.

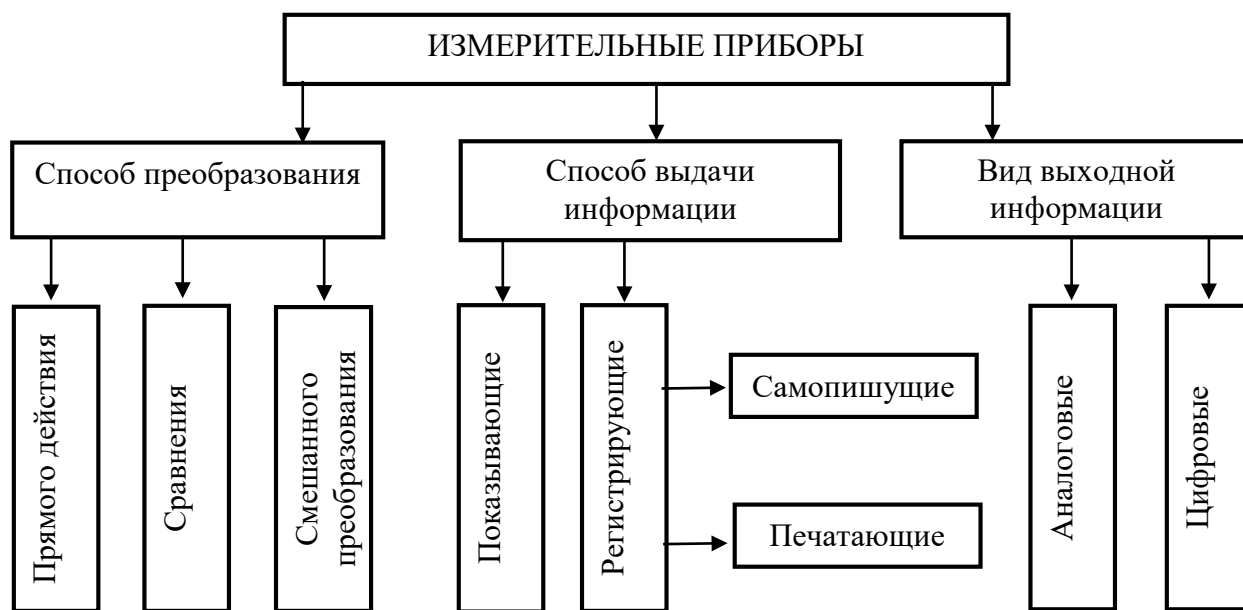


Рисунок 2.4 – Классификация измерительных приборов

Измерительные приборы по своей структуре представляют собой определенное сочетание измерительных преобразователей и устройств сравнения. Для условного изображения структуры прибора используется функциональная схема. По ней можно проследить все преобразования, которым подвергается измеряемая величина в процессе работы прибора.

По структуре преобразования все измерительные приборы можно разделить на три вида: приборы прямого преобразования, приборы уравнивающего преобразования и приборы смешанного преобразования.

Средства измерений прямого преобразования. Структурная схема прибора прямого преобразования показана на рис. 2.5, где $ИП_1, ИП_2, \dots, ИП_n$ – звенья; $x, x_1, x_2, \dots, x_n$ – информативные параметры сигналов.

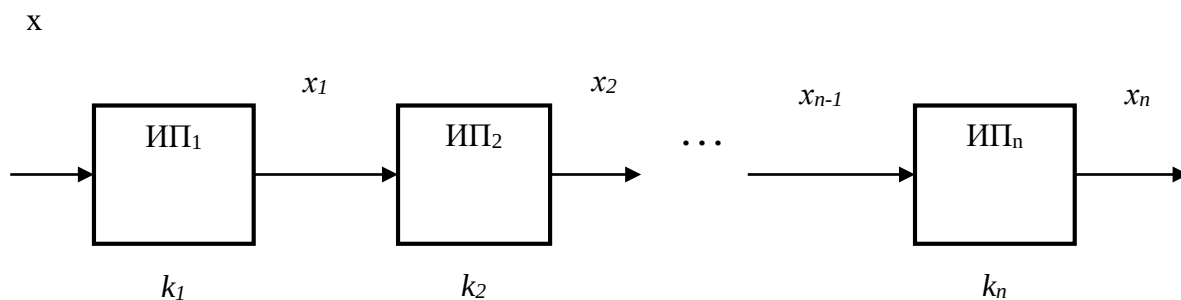


Рисунок 2.5 – Структурная схема прибора прямого преобразования

Как видно на рис. 2.5, входной сигнал x последовательно претерпевает несколько преобразований, и в итоге на выходе получается сигнал x_n .

Для измерительного прибора сигнал x_n получается в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, например, в виде отклонения указателя отсчетного устройства. Для измерительного преобразователя сигнал x_n получается в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения.

Примером электроизмерительного прибора, имеющего структурную схему прямого преобразования, может быть амперметр для измерения больших постоянных токов. В этом приборе измеряемый ток вначале с помощью шунта преобразуется в падение напряжения на шунте, затем в малый ток, который измеряется измерительным механизмом, т. е. преобразуется в отклонение указателя [1].

Структурная схема прибора прямого преобразования разомкнутая, в ней отсутствует общая обратная связь с выхода на вход. Если все измерительные преобразователи имеют линейную функцию преобразования ($x_i = k_i \cdot x_{i-1}$), то выходная величина связана с измеряемой величиной соотношением:

$$x_n = k_1 \cdot k_2 \dots k_n \cdot x = k \cdot x, \quad (2.1)$$

где $k_1, k_2, \dots, k_n$ – коэффициенты преобразования измерительных преобразователей.

Чувствительность (коэффициент преобразования) средства измерений, имеющего структурную схему прямого преобразования:

$$S = \frac{dx_n}{x} = \frac{dx_1}{dx} \cdot \frac{dx_2}{dx_1} \dots \frac{dx_n}{dx_{n-1}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \dots k_n. \quad (2.2)$$

При нелинейной функции преобразования чувствительность и коэффициенты преобразования зависят от входного сигнала.

Мультипликативная погрешность возникает при изменении коэффициентов преобразования. С течением времени и под действием внешних факторов коэффициенты $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ могут изменяться соответственно на $\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3, \dots, \Delta k_n$. При достаточно малых изменениях этих коэффициентов можно пренебречь членами второго и большего порядков малости, тогда относительное изменение чувствительности

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta k_1}{k_1} + \frac{\Delta k_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta k_n}{k_n}. \quad (2.3)$$

Изменение чувствительности приводит к изменению выходного сигнала на $\Delta x_n = (S + \Delta S) \cdot x - S \cdot x = \Delta S \cdot x$. Этому изменению выходного сигнала соответствует абсолютная погрешность измерения входной величины

$$\Delta x = \frac{\Delta x_n}{S} = \frac{x \cdot \Delta S}{S}. \quad (2.4)$$

Как видно из выражения (2.4), погрешность, вызванная изменением чувствительности, является мультипликативной. Относительная мультипликативная погрешность измерения $\delta_s = \Delta S/S$.

Аддитивная погрешность вызывается дрейфом «нуля» звеньев, наложением помех на полезный сигнал и т.д., приводящими к смещению графика характеристики преобразования i -го звена на $\pm \Delta x_{0i}$; (как показано на рис. 2.6). Аддитивную погрешность можно найти, введя на структурной схеме после соответствующих звеньев дополнительные внешние сигналы $\Delta x_{01}, \Delta x_{02}, \dots, \Delta x_{0n}$, равные смещениям характеристик преобразования звеньев.

Для оценки влияния этих дополнительных сигналов пересчитаем (приведем) их ко входу структурной схемы. Результирующее действие всех дополнительных сигналов равно действию следующего дополнительного сигнала на входе:

$$\Delta x_0 = \frac{\Delta x_{01}}{k_1} + \frac{\Delta x_{02}}{k_1 \cdot k_2} + \dots + \frac{\Delta x_{0n}}{k_1 \cdot k_2 \dots k_n}. \quad (2.5)$$

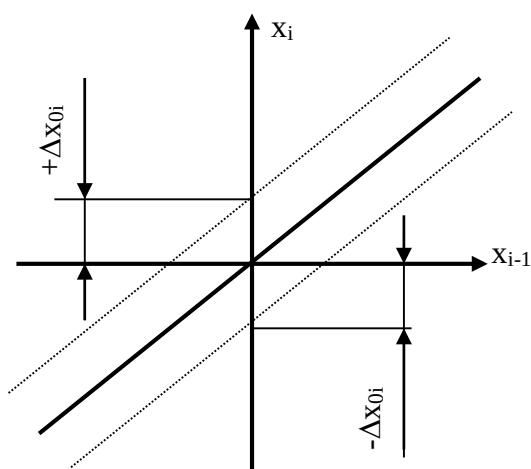


Рисунок 2.6 – Характеристика преобразования звена

Результирующая аддитивная погрешность равна Δx_0 . Таким образом, как следует из (2.3) и (2.5), в средствах измерений, имеющих структурную схему прямого преобразования, происходит суммирование погрешностей, вносимых отдельными звеньями, и это затрудняет изготовление средств измерений прямого преобразования с высокой точностью.

Средства измерений уравнивающего преобразования. Структурная схема средства измерений уравнивающего преобразования показана на рис. 2.7.

Структурная схема такого прибора содержит две цепи – цепь прямого преобразования и цепь обратного преобразования, т. е. в приборе имеется общая отрицательная обратная связь с выхода на вход.

Для цепи обратного преобразования (обратной связи):

$$x'_m = x_n \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_m = x_n \cdot \beta, \quad (2.6)$$

где β – коэффициент преобразования цепи обратного преобразования;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ – коэффициенты преобразования звеньев обратной связи.

На входе цепи прямого преобразования в узле СУ происходит сравнение (компенсация) входного сигнала x и выходного сигнала цепи обратного преобразования x'_m и при этом на выходе СУ получается разностный сигнал $\Delta x = x - x'_m$.

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

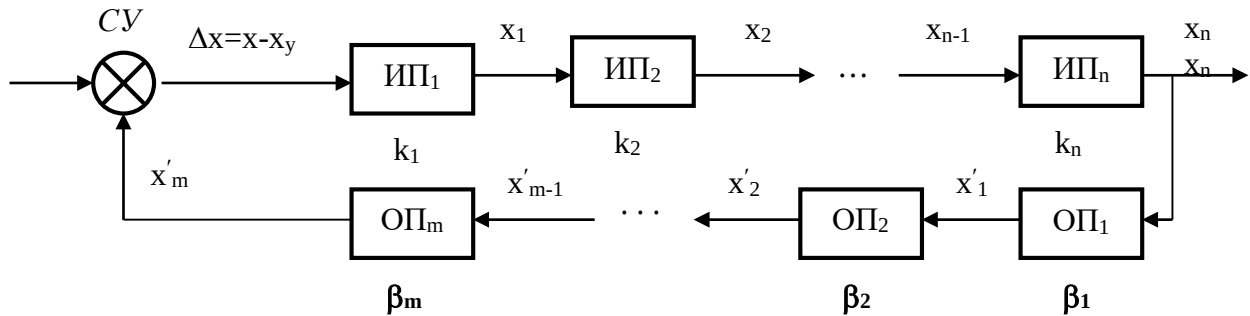


Рисунок 2.7 – Структурная схема средства измерения уравнивающего преобразования

Средства измерений, имеющие такую структурную схему, могут работать как с полной, так и с неполной компенсацией.

При полной компенсации (астатическое преобразование) в установившемся режиме:

$$\Delta x = x - x'_m = 0. \quad (2.7)$$

Это возможно в тех устройствах, у которых в цепи прямого преобразования предусмотрено интегрирующее звено с характеристикой преобразования $x_i = \int_0^t F(x_{i-1}) dt$. Примером такого звена является электродвигатель, для которого угол поворота вала определяется приложенным напряжением и временем.

В этом случае, учитывая (2.6) и (2.7), получим:

$$x_n = x / (\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_m) = x / \beta. \quad (2.8)$$

Таким образом, в момент компенсации сигнал на выходе средства измерений пропорционален входному сигналу и не зависит от коэффициента преобразования цепи прямого преобразования.

Чувствительность (коэффициент преобразования)

$$S = \frac{\partial x_n}{\partial x} = \frac{1}{\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_m} = \frac{x}{\beta}. \quad (2.9)$$

Мультипликативная относительная погрешность, обусловленная нестабильностью коэффициентов преобразования звеньев, при достаточно малых изменениях этих коэффициентов

$$\delta_M = \frac{\Delta S}{S} = -\frac{\Delta \beta}{\beta} = -\left(\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} + \frac{\Delta \beta_2}{\beta_2} + \dots + \frac{\Delta \beta_m}{\beta_m}\right). \quad (2.10)$$

Как видно из этого выражения, относительная мультипликативная погрешность обусловлена только относительным изменением коэффициента преобразования цепи обратного преобразования.

Аддитивная погрешность в средствах измерений с полной компенсацией практически обуславливается порогом чувствительности звеньев, расположенных до интегрирующего звена, и порогом чувствительности самого интегрирующего звена.

Под порогом чувствительности звена понимается то наименьшее изменение входного сигнала, которое способно вызвать появление сигнала на выходе звена. Порог чувствительности имеют, например, электродвигатели, часто применяемые в рассматриваемых устройствах. Для реальных звеньев график характеристики преобразования может иметь вид, как показано на рис. 2.8, где $\pm \Delta x_{i-1}$ – порог чувствительности.

Порог чувствительности средства измерений с полной компенсацией

$$\Delta x = \Delta x_1 + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_1 \cdot k_2} + \dots + \frac{\Delta x_i}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \dots k_{i-1}}, \quad (2.11)$$

где $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{i-1}$ – пороги чувствительности звеньев цепи прямого преобразования;

Δx_i – порог чувствительности интегрирующего звена.

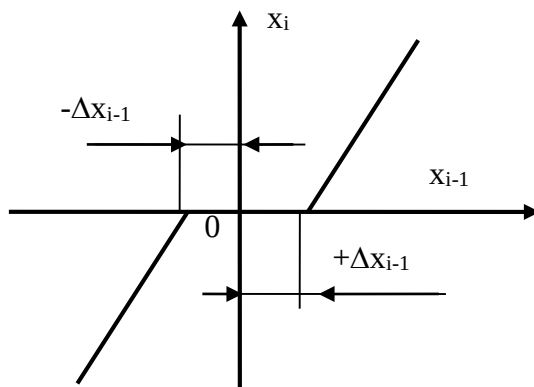


Рисунок 2.8 – Типовой график характеристики преобразования

При наличии порога чувствительности средства измерения состояние компенсации наступает при $x - x'_m = \Delta x$. Таким образом, изменение входного сигнала в пределах $\pm \Delta x$ не вызывает изменения выходного сигнала, т. е. появляется абсолютная аддитивная погрешность, значение которой может быть в пределах $\pm \Delta x$.

Из выражения (2.11) очевидно, что для уменьшения аддитивной погрешности, обусловленной порогом чувствительности звеньев, следует увеличивать коэффициенты преобразования $k_1, k_2, \dots, k_{i-1}$. Предел увеличения этих коэффициентов обусловлен динамической устойчивостью средства измерений.

При неполной компенсации (статическое преобразование) в средствах измерений интегрирующего звена нет и обычно выполняется условие (2.6), а также:

$$x_n = k \cdot \Delta x, \quad (2.12)$$

где $k = k_1 \cdot k_2 \dots k_n$ – коэффициент преобразования цепи прямого преобразования. В этом случае установившийся режим наступает при некоторой разности

$$\Delta x = x - x'_m. \quad (2.13)$$

Зависимость между выходным и входным сигналами, находящаяся путем решения уравнений (2.6), (2.12) и (2.13):

$$x_n = \frac{k \cdot x}{(1 + k \cdot \beta)}. \quad (2.14)$$

Как видно из выражения (2.14), при установившемся режиме выходной сигнал пропорционален входному и зависит от коэффициентов цепи как обратного, так и прямого преобразования.

Если выполняется условие $k \cdot \beta > 1$, то уравнение (2.14) переходит в (2.8) и при этом нестабильность коэффициента преобразования цепи прямого преобразования не влияет на работу устройства. Практически, чем выше $k \cdot \beta$, тем меньше влияние k . Предел увеличения $k \cdot \beta$ обусловлен динамической устойчивостью средства измерений.

Чувствительность (коэффициент преобразования) средства измерений с неполной компенсацией

$$S = \frac{\partial x_n}{\partial x} = \frac{k}{1 + k \cdot \beta}. \quad (2.15)$$

Мультипликативная погрешность, обусловленная изменением коэффициентов преобразования звеньев при достаточно малых изменениях этих коэффициентов:

$$\delta_M = \frac{\Delta S}{S} = \delta_k \cdot \frac{1}{1 + k \cdot \beta} - \delta_\beta \cdot \frac{k \cdot \beta}{1 + k \cdot \beta}, \quad (2.16)$$

где $\delta_k = \Delta k/k$; $\delta_\beta = \Delta \beta/\beta$. Если $k \cdot \beta > 1$, то $\delta_M \approx \delta_k/(k \cdot \beta)$.

Следовательно, при $k \cdot \beta > 1$ (что обычно имеет место) составляющая, обусловленная изменением коэффициента β , целиком входит в результирующую погрешность, а составляющая, обусловленная изменением коэффициента k , входит в результирующую погрешность ослабленной в $k \cdot \beta$ раз. Нелинейность характеристики преобразования цепи прямого преобразования можно рассматривать как результат влияния изменения коэффициента преобразования k относительно некоторого начального значения при $x=0$. Полученные уравнения показывают, что нелинейность характеристики преобразования уменьшается действием отрицательной обратной связи в $k \cdot \beta$ раз.

Аддитивная погрешность может быть найдена путем введения в структурную схему дополнительных сигналов $\Delta x_{01}, \Delta x_{02}, \dots, \Delta x_{0n}, \Delta x'_{01}, \Delta x'_{02}, \dots, \Delta x'_{0n}$, равных смещениям характеристик преобразования соответствующих звеньев.

Применяя методику, рассмотренную выше, получим абсолютную аддитивную погрешность, равную погрешности:

$$\Delta x_0 = \left[\frac{\Delta x_{01}}{k_1} + \frac{\Delta x_{02}}{k_1 \cdot k_2} + \dots + \frac{\Delta x_{0n}}{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n} \right] -$$

$$-(\beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \dots \cdot \beta_m \cdot \Delta x_{01} + \beta_3 \cdot \beta_4 \cdot \dots \cdot \beta_m \cdot \Delta x_{02} + \dots + \Delta x_{0m}).$$

Следует отметить, что средства измерений могут иметь *комбинированные структурные схемы*, когда часть цепи преобразования охвачена обратной связью.

Вид структурной схемы средства измерений влияет не только на рассмотренные характеристики (чувствительность, погрешность), но также на входные и выходные сопротивления, динамические свойства и др.

По виду *выдаваемой информации* все приборы делятся на аналоговые и цифровые. Аналоговым является измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией измеряемой величины, например, стрелочный вольтметр. Цифровым называется измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме, например, цифровой омметр.

По способу выдачи измерительной информации измерительные приборы делятся на показывающие и регистрирующие (см. рис. 2.4).

Показывающие приборы (рис. 2.9), если на них воздействует измеряемая величина, допускают только отсчитывание показаний. Указатель отсчетного устройства перемещается относительно шкалы и наблюдается визуально.



Рисунок 2.9 – Показывающие приборы со стрелочной шкалой

Шкала средства измерения – это часть отсчетного устройства, представляющая собой совокупность отметок и проставленных у некоторых из них чисел отсчета или других символов, соответствующих ряду последовательных значений измеряемой величины.

Шкалы с делениями постоянной длины и с постоянной ценой деления называются равномерными шкалами, а шкалы с делениями непостоянной длины – неравномерными.

К показывающим измерительным приборам относят также приборы с цифровым отсчетом (рис. 2.10). Их отсчетное устройство выдает показания в цифровой форме, показанное число соответствует значению измеряемой величины.



Рисунок 2.10 – Показывающий прибор с цифровым отсчетом

Измерительные приборы с цифровым отсчетом находят все большее распространение, поскольку они более производительны и удобны для наблюдателя.

Регистрирующие измерительные приборы (рис. 2.11) содержат механизм регистрации показаний. Регистрирующий прибор, в котором предусмотрена запись показаний в форме диаграммы, называют самопишущим прибором. Диаграмма представляет собой изображение измерений измеряемой величины в зависимости от изменений другой переменной величины.

По роду измеряемой величины приборам присвоены наименования в зависимости от названия единицы этой величины (в том числе кратных и дольных единиц), для измерения которой они предназначены: амперметры, микроамперметры – для измерения тока; веберметры, милливеберметры для измерения магнитной индукции и т. д.



Рисунок 2.11 – Регистрирующие измерительные приборы

2.5. Измерительные установки и системы

Измерительная установка – это совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме,

удобной для непосредственного восприятия наблюдателя, и расположенных в одном месте. В качестве примера можно привести измерительные установки для измерений удельного сопротивления электротехнических материалов, для поверки счетчиков электрической энергии и др.

Измерительные установки в большинстве случаев обладают большей или меньшей универсальностью как в отношении номенклатуры измеряемых величин, так и в отношении диапазонов измерения. Иногда установки более узкого назначения называют измерительными машинами. К измерительным машинам относятся силоизмерительные машины и машины для измерения больших длин.

Измерительная система также представляет собой совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, но предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления.

Средства измерений могут находиться в разных местах, а передача измерительной информации – осуществляться по специальным каналам связи. Измерительные системы широко используются для автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства и энергетики.

С развитием вычислительной техники, совершенствованием измерительных систем открываются возможности перехода на автоматизированную технологию во многих отраслях народного хозяйства. В этом случае управление технологическим процессом берет на себя вычислительно-измерительный комплекс, включающий широко разветвленную измерительную систему, функционально связанную с ЭВМ.

Таким образом, измерительная информация, вырабатываемая измерительной системой, является основой для автоматизации технологических процессов.

2.6. Метрологические характеристики средств измерений

Измерительная техника обладает большим арсеналом разнообразных средств измерений, предназначенных для решения различных измерительных задач. Все средства измерений можно характеризовать некоторыми общими свойствами – *метрологическими характеристиками*.

Метрологическими характеристиками средств измерений называются такие характеристики их свойств, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений и предназначены для оценки технического уровня и качества средств измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной и методических составляющих погрешности измерений [4]. Комплекс метрологических характеристик позволяет оценить метрологические (измерительные) возможности конкретного средства измерений, а также легко сопоставлять между собой различные разновидности этих средств. Метрологические

характеристики средств измерений установлены ГОСТ 8.009-84. Рассмотрим основные из них.

Измеряемая, преобразуемая или воспроизводимая (для мер) величина. Этот параметр характеризует назначение средства измерений для измерения той или иной физической величины (напряжение, масса, температура, ускорение, ток и т.д.). Эта величина обычно наносится на средство измерений или указывается в технической документации.

Предел и диапазон измерений. Очень важной характеристикой любого средства измерений, определяющей в первую очередь пригодность его для тех целей, для которых оно предназначено, являются *пределы измерения*, т. е. наименьшее и наибольшее значения измеряемой величины, могущие быть измеренными данным средством измерений.

Диапазон измерений – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

Значения величины, ограничивающие диапазон измерений снизу и сверху (слева и справа), называют соответственно, «*нижним пределом измерений*» и «*верхним пределом измерений*» [2].

Нижний предел измерения реально не бывает равным нулю, так как он ограничивается обычно порогом чувствительности, помехами или погрешностями измерений. Поэтому для многих измерительных приборов, на

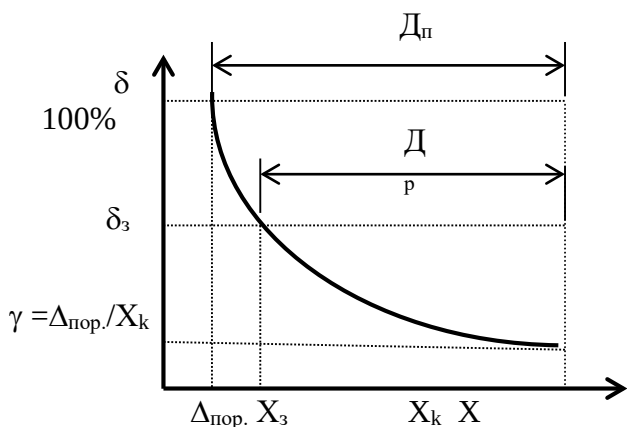


Рисунок 2.12 – Диапазоны измерений

шкале которых имеется отметка «0», нижний предел измерения в действительности не равен нулю.

Различают полный и рабочий диапазоны измерения измеряемой величины (рис. 2.12).

Диапазон, в котором относительная погрешность не превышает 100 %, называется *полным диапазоном*. Полный диапазон ограничивается снизу порогом чувствительности $\Delta_{\text{пор}}$, а сверху – конечным значением X_k , т. е. $X_{\text{п}} = \Delta_{\text{пор}} \dots X_k$ или $D_{\text{п}} = X_k / \Delta_{\text{пор}}$.

Под порогом чувствительности понимается такое значение измеряемой величины, когда $X = \Delta_{\text{пор}}$ и относительная погрешность ее измерения $\delta = 100 \%$.

Диапазон, в котором относительная погрешность не превышает некоторого заранее заданного значения δ_z , называется *рабочим диапазоном измерения* измеряемой величины. Рабочий диапазон ограничивается снизу значением $X = X_z$, при котором $\delta = \delta_z$, а сверху – конечным значением X_k , т. е. $X_p = X_z \dots X_k$ или $D_p = X_k / X_z$. Рабочий диапазон всегда представляет часть полного диапазона.

Во многих измерительных приборах имеются специальные устройства, позволяющие изменить диапазон измерения, иногда в очень широких пределах.

В этих случаях следует говорить об общем диапазоне измерения, охватываемом измерительным прибором, и об отдельных диапазонах, которые часто называют неудачно «поддиапазоны». Например, общий диапазон измерения 0 ... 100 делится на диапазоны 0 ... 0,1; 0 ... 1; 0 ... 10; 0 ... 100 или общий диапазон 0 ... 5 делится на диапазоны 0 ... 1; 1 ... 2; 2 ... 3; 3 ... 4; 4 ... 5.

Для преобразователей верхним и нижним пределами преобразования следует считать, соответственно, наибольшее и наименьшее значения входной и выходной величины, в пределах которых нормировано уравнение преобразования или коэффициент преобразования.

Для однозначных мер вместо диапазона значений воспроизводимых величин используют понятие *номинальное значение меры*, т. е. значение величины, указанное на мере или приписанное ей. Часто измерительный прибор имеет участки, на которых его погрешность не нормирована (обычно в начале и конце шкалы). В таком случае для прибора указывается еще и *диапазон показаний* – область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы. Диапазон показаний всегда шире диапазона измерений.

Градуировочная характеристика средства измерений (уравнение преобразования) представляет зависимость между значениями величин на выходе (Y) и входе (X) средства измерений. Уравнение преобразования $Y = f(X)$ может быть представлено в виде формулы, таблицы или графика.

Градуировочная характеристика средства измерений может быть линейной или нелинейной. Чаще всего стремятся иметь линейную зависимость, т. е. $Y = k \cdot X$. Нелинейность уравнения преобразования стараются скомпенсировать добавлением измерительного преобразователя с такой градуировочной характеристикой, чтобы совместная характеристика преобразования стала линейной. Линейная градуировочная характеристика может как проходить через начало координат ($X=0$; $Y=0$), так и иметь смещение по оси X или Y (например, $Y=0$ при $X=X_0$, средство измерений с подавленным нулем, смещенной шкалой).

Для средств измерений нормируется номинальная статическая градуировочная характеристика. Она приписывается средству измерений на основе анализа совокупности таких средств. Реальная градуировочная характеристика конкретного образца средства измерений может несколько отличаться от номинальной.

Чувствительность измерительного прибора (коэффициент преобразования измерительного преобразователя) определяется как отношение приращения выходного сигнала ΔY на выходе измерительного прибора (преобразователя) к вызвавшему это приращение изменению входного сигнала ΔX (входного сигнала преобразователя). В общем случае чувствительность определяется как:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dy}{dx}$$

и называется *абсолютной чувствительностью*. Эта величина является размерной и зависит от единиц, в которых выражаются X и Y . Для линейной градуировочной характеристики чувствительность $S = const$, для нелинейных

характеристик чувствительность является переменной величиной, различной для разных значений X .

В практике пользуются относительной чувствительностью:

$$S_0 = \frac{\frac{\Delta Y}{\Delta X}}{\frac{Y}{X}},$$

где $\Delta X/X$ – относительное изменение входной величины, выражаемое чаще всего в процентах. Относительная чувствительность S_0 имеет размерность выходной величины на 1 % изменения входной величины.

Применяют также выражение относительной чувствительности в виде:

$$S_{00} = \frac{\frac{\Delta Y}{Y}}{\frac{\Delta X}{X}},$$

выражая числитель и знаменатель чаще всего в процентах (например, 1 % изменения вызывает изменение Y на n %). Отметим, что S_{00} – величина безразмерная.

Для стрелочных приборов $S = \alpha / x$. Поэтому измеряемая величина $x = \frac{1}{S} \cdot \alpha$, где α – показание прибора; $1/S$ – постоянная прибора, или цена деления.

Для измерительных приборов и мер с переменным значением часто вместо чувствительности указывают цену деления шкалы. Цена деления представляет собой разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Цена деления есть величина, обратная чувствительности. Она имеет размерность измеряемой величины. В приборах с линейной градуировочной характеристикой цена деления постоянна в диапазоне измерений и носит название – постоянная прибора. Для получения значения величины в соответствующих единицах надо умножить отсчет в делениях на постоянную прибора.

Порог чувствительности средства измерений определяется как изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение выходной величины, которое может быть обнаружено с помощью данного средства измерений без каких-либо дополнительных устройств [2]. Введение этого параметра вызвано тем, что не всякое малое изменение измеряемой величины вызывает изменение результата измерения, а только лишь большее некоторой пороговой величины. Порог чувствительности равен абсолютной погрешности средства измерений, т. е. $\Delta_{пор} = \Delta X$.

В электромеханических измерительных преобразователях (измеряемая величина – угол) порог чувствительности не равен нулю вследствие трения подвижной части, а в цифровых измерительных приборах показание изменяется, если изменение входной величины больше шага квантования. Обычно порог чувствительности выражается в единицах входной величины.

Вариация выходного сигнала (показаний) средства измерений есть средняя разность между значениями выходного сигнала (показаниями) средства измерений, соответствующими данной точке диапазона измерения, при двух направлениях медленного многократного измерения входного сигнала в процессе подхода к данной точке диапазона измерения [2]. Вариация

определяется по значениям выходного сигнала при подходе к одному и тому же значению входного сигнала сначала со стороны больших, а затем – меньших значений. В отличие от чувствительности вариация характеризуется изменением не входного, а выходного сигнала.

Точность средства измерений есть качество средства измерений, отражающее близость нулю его погрешностей. Чем меньшие погрешности имеет средство измерений, тем оно считается более точным. Для всех средств измерений указываются метрологические характеристики погрешностей. Они включают в себя: характеристики систематической составляющей погрешности, случайной составляющей, а также вариации выходного сигнала. Нормирование характеристик погрешностей производится на основе методов математической статистики.

Потребляемая мощность средства измерения. Входное и выходное сопротивления.

Измеряемый объект и средство измерений связаны и взаимодействуют между собой. Такое взаимодействие необходимо для проведения измерения.

Для приведения в действие первичного измерительного преобразователя необходима энергия, которая потребляется от объекта измерения. Естественно, эта энергия должна быть небольшой, чтобы измерительный прибор не вносил заметного искажения в измеряемый процесс. Сравните между собой измерение ртутным термометром температуры моря и жидкости в пробирке. Во втором случае термометр может существенно нагреть или охладить жидкость в пробирке. Поскольку мощность, потребляемая входной цепью прибора, конечна, ее значение является важным показателем средства измерения.

У средств измерений электрических величин потребляемая мощность определяется входным сопротивлением прибора. Для приборов, реагирующих на напряжение (включаемых параллельно участку цепи), входное сопротивление должно быть большим, тогда входная мощность $P = U^2/R$ будет невелика. У приборов, чувствительных к току (включаемых последовательно в электрическую цепь), входное сопротивление, наоборот, должно быть минимальным (по крайней мере, намного меньшим, чем сопротивление участка цепи).

Понятие входного сопротивления применяется не только к измерению электрических величин, но и к измерению механических, тепловых и другого рода величин. В связи с этим нашло применение более общее понятие: *обобщенное входное сопротивление*, определяемое как отношение обобщенной силы к обобщенной скорости. Например, под механическим сопротивлением понимают отношение силы к вызванной ею скорости равномерного движения. Однако не для всех видов энергии понятие сопротивления соответствует общему определению.

Входное сопротивление является важным параметром средства измерений. Оно показывает степень приспособленности данного средства к измерениям в маломощных измерительных цепях. Если мощность, потребляемая входной цепью прибора, одного порядка с мощностью входного сигнала, приходится

вводить поправки или обеспечивать согласование прибора с источником измерительного сигнала.

Выходное сопротивление измерительного преобразователя характеризует реакцию его выходного сигнала на подключение к его выходу фиксированной нагрузки. Преобразователь с выходной стороны бывает нагружен входным сопротивлением последующего измерительного преобразователя. Для наиболее эффективного использования преобразователей необходимо согласование выходного сопротивления данного преобразователя с входным сопротивлением последующего преобразователя. Чем меньше выходное сопротивление предшествующего преобразователя по отношению к входному сопротивлению следующего преобразователя, тем меньше потребляемая последующим преобразователем мощность и тем меньше взаимная зависимость характеристик преобразователей.

Динамические характеристики средств измерений возникают при динамическом режиме его работы. Динамический режим работы средства измерений – это такой режим, при котором средство измерений воспринимает изменение входной величины и размеры измеряемой величины изменяются во времени.

Динамические характеристики средства измерений описывают инерционные свойства средств измерений и определяют зависимость выходного сигнала средств измерений от меняющихся во времени величин: входного сигнала, нагрузки, влияющих величин [2].

Для измерительных приборов обычно указывается время установления показания: промежуток времени с момента начала измерения до момента установления показаний (т. е. когда переходный процесс закончился). Величина, обратная времени измерения, получила название быстродействия средства измерений. Быстродействие выражается числом, равным максимальному числу измерений с помощью данного прибора в секунду. Время измерения стрелочных измерительных приборов составляет обычно 4 с, а быстродействие цифровых измерительных приборов может достигать величин 10^6 измерений в секунду.

Высокое быстродействие дает возможность измерять мгновенные значения быстроменяющихся величин, а также дает возможность повышать точность измерений введением дополнительных вычислительных устройств для обработки большого числа единичных измерений.

Условия применения средств измерений. При использовании средств измерений в реальных условиях необходимо учитывать характеристики среды, в которой это средство измерений находится при эксплуатации. Изменение внешних условий приводит к изменению метрологических характеристик, т.е. к увеличению погрешностей измерения. Величины, которые влияют на метрологические характеристики помимо измеряемой величины, называют *влияющими величинами*. Влияющими величинами могут быть: температура, влажность, атмосферное давление, напряжение источника питания, напряженность внешних магнитных и электрических полей, вибрации и ускорения и т. д. Кроме того, влияющими величинами считаются те параметры входного сигнала, изменения которых не несут информации об измеряемой

величине, но влияют на результаты измерений. Например, показания электронного вольтметра зависят не только от величины переменного напряжения, но и его частоты.

В стандартах или технических условиях (ТУ) на средства измерений обычно указывают области значений влияющих величин, обеспечивающих работоспособность и сохранность средств измерений. Так, например, под лабораторными условиями эксплуатации обычно понимаются такие, когда температура окружающего воздуха лежит в пределах $+(15...25) ^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха от 45 до 75 %, атмосферное давление $(860...1060) 10^2 \text{ Па}$.

Различают нормальные условия применения средств измерений, рабочие условия применения и предельные условия хранения и транспортирования.

При работе средства измерений в нормальных условиях воздействием влияющих величин на результаты измерений можно пренебречь. Метрологические характеристики погрешностей и динамические характеристики средств измерений обычно нормируются для нормальных условий эксплуатации. Считается, что погрешность в этих условиях определяется только конструкцией прибора. Часто такую погрешность называют основной погрешностью.

Обычно средства измерений продолжают нормально выполнять функции в более широкой области значений влияющих величин. В этом случае для средств измерений указываются рабочие условия эксплуатации. Метрологические характеристики средств измерений в рабочих условиях могут существенно изменяться под воздействием влияющих величин. Для оценки этого изменения могут применяться функции влияния.

Функция влияний представляет собой зависимость изменений метрологической характеристики средства измерений от изменений влияющих величин в пределах рабочих условий эксплуатации. Функции влияния нормируются отдельно для каждого влияющего фактора и могут выражаться в виде формул, таблиц или графиков. Допускается также вместо функции влияния характеризовать средства измерений наибольшим допустимым изменением метрологических характеристик в пределах рабочих условий.

С помощью функций влияния можно оценить погрешность средства измерений при работе его в тех или иных конкретных условиях. Погрешность, обусловленная воздействием влияющих величин, часто называется дополнительной погрешностью средства измерений.

Отметим, что функции влияния не нашли пока широкого применения в измерительной технике, так как для их достоверной оценки необходимо большое число испытаний приборов. Кроме того, суммарная погрешность средства измерений от совокупности внешних факторов во многих случаях не является суммой погрешностей от каждого фактора в отдельности.

Предельные условия хранения и транспортирования задаются областью значений влияющих величин, при которых возможно хранение и перевозка средств измерений в нерабочем состоянии. Однако после возвращения средств измерений в рабочие условия эксплуатации их метрологические характеристики

не должны измениться. Предельные условия характеризуются наиболее широкими областями значений влияющих величин, выход влияющих величин за предельные условия приводит обычно к поломке средства измерений.

Кроме метрологических характеристик, при эксплуатации средств измерений важно знать и не метрологические характеристики: показатели надежности, электрическую прочность, сопротивление изоляции, устойчивость к климатическим и механическим воздействиям, время установления рабочего режима, экономичность и др. Рассмотрим некоторые из них.

Надежность средств измерений. Под надежностью средства измерений понимают его способность сохранять эксплуатационные параметры в установленных пределах в течение заданного времени.

Одной из важных количественных характеристик надежности средства измерений является вероятность безотказной работы. Так например, если обозначить через τ время от момента включения средства измерений в работу до момента, когда по каким-либо причинам оно вышло из строя или уже не отвечает своим метрологическим параметрам, а через t – рассматриваемый промежуток времени (здесь τ – случайная величина), то

$$p(t) = p(\tau \geq t),$$

где $p(t)$ – вероятность того, что данное средство измерений будет работоспособно в рассматриваемый промежуток времени.

В настоящее время в технических условиях на любое средство измерений указываются требования к характеристикам надежности. Например, за $t = 1000$ ч величина $p(t)$ должна быть не менее 0,85, т. е. $p(t) \geq 0,85$.

Помимо вероятности безотказной работы, по Государственной системе приборов (ГСП) существуют и другие критерии надежности средств измерения, такие как интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, время восстановления. Оценка надежности производится в процессе разработки средства измерений.

Экономичность средств измерений – простота конструкций в обращении и оправданная экономическая стоимость.

2.7. Общие свойства и классификация измерительных преобразователей

На вход измерительного преобразователя кроме измеряемой величины воздействуют многочисленные посторонние факторы: механические возмущения, изменения температуры, влажности, электрические и магнитные поля и др. Поэтому к числу основных задач измерительных преобразователей наряду с минимальными потерями информации при преобразовании относится минимальная чувствительность к посторонним воздействиям.

Разнообразные по устройству и принципу действия измерительные преобразователи имеют различные характеристики и параметры, основными из которых являются градуировочная характеристика, коэффициент преобразования, погрешности преобразователей и диапазон преобразования.

Градуировочная характеристика – это зависимость между выходной и входной величинами измерительного преобразователя: $y = f(x)$.

Примерная градуировочная характеристика преобразователя показана на рис. 2.13.

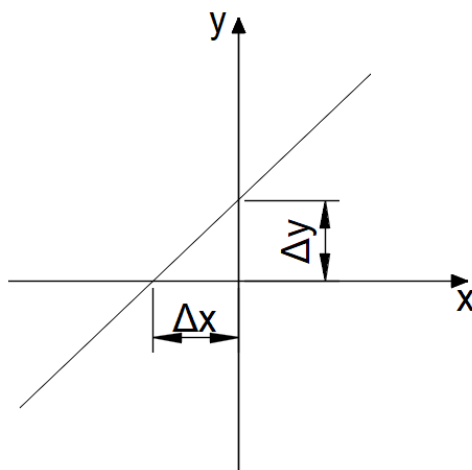


Рисунок 2.13 – Градуировочная характеристика измерительного преобразователя

Погрешности преобразователей подразделяются на абсолютные и относительные. В отличие от погрешностей мер и приборов, погрешности преобразователей определяют по входу и выходу.

Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по входу (выходу) – это разность между значением величины на входе (выходе) преобразователя, определяемым по действительному значению величины на его выходе (входе) при помощи градуировочной характеристики, приписанной преобразователю, и действительным значением величины на входе (выходе) преобразователя.

Относительная погрешность измерительного преобразователя по входу (выходу) – это отношение абсолютной погрешности преобразователя по входу (выходу) к истинному значению величины на входе (к значению величины на выходе, определяемому по истинному значению величины на входе по градуировочной характеристике, приписанной преобразователю).

Погрешности измерительных преобразователей подразделяются на основные и дополнительные, возникающие вследствие влияния посторонних факторов.

Диапазон преобразования – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допустимые погрешности преобразователя.

Кроме перечисленных характеристик преобразователей при их оценке учитывают следующие свойства: постоянство характеристик во времени, степень обратного воздействия преобразователя на измеряемую величину (например, за счет собственного потребления мощности), условия эксплуатации, взаимозаменяемость, массу, габаритные размеры, стоимость и др.

Измерительные преобразователи неэлектрических величин классифицируются в основном по назначению и принципу действия.

По *назначению* измерительные преобразователи подразделяются на

преобразователи механических, тепловых, химических, биологических и других физических величин.

По *принципу действия* преобразователи подразделяются на генераторные и параметрические (рис. 2.14).

В *генераторных* преобразователях измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в пропорциональные ЭДС или силу тока. К генераторным относятся электромагнитные (индукционные), пьезоэлектрические и оптические преобразователи, а также преобразователи, основанные на эффекте Холла.

В *параметрических* преобразователях измеряемая величина преобразуется в различные параметры электрических цепей: сопротивление, емкость, индуктивность, частоту и др. К параметрическим относятся резистивные (контактные, реостатные и тензорезисторы), электростатические, электромагнитные (индуктивные и магнитоупругие), оптические и другие преобразователи.

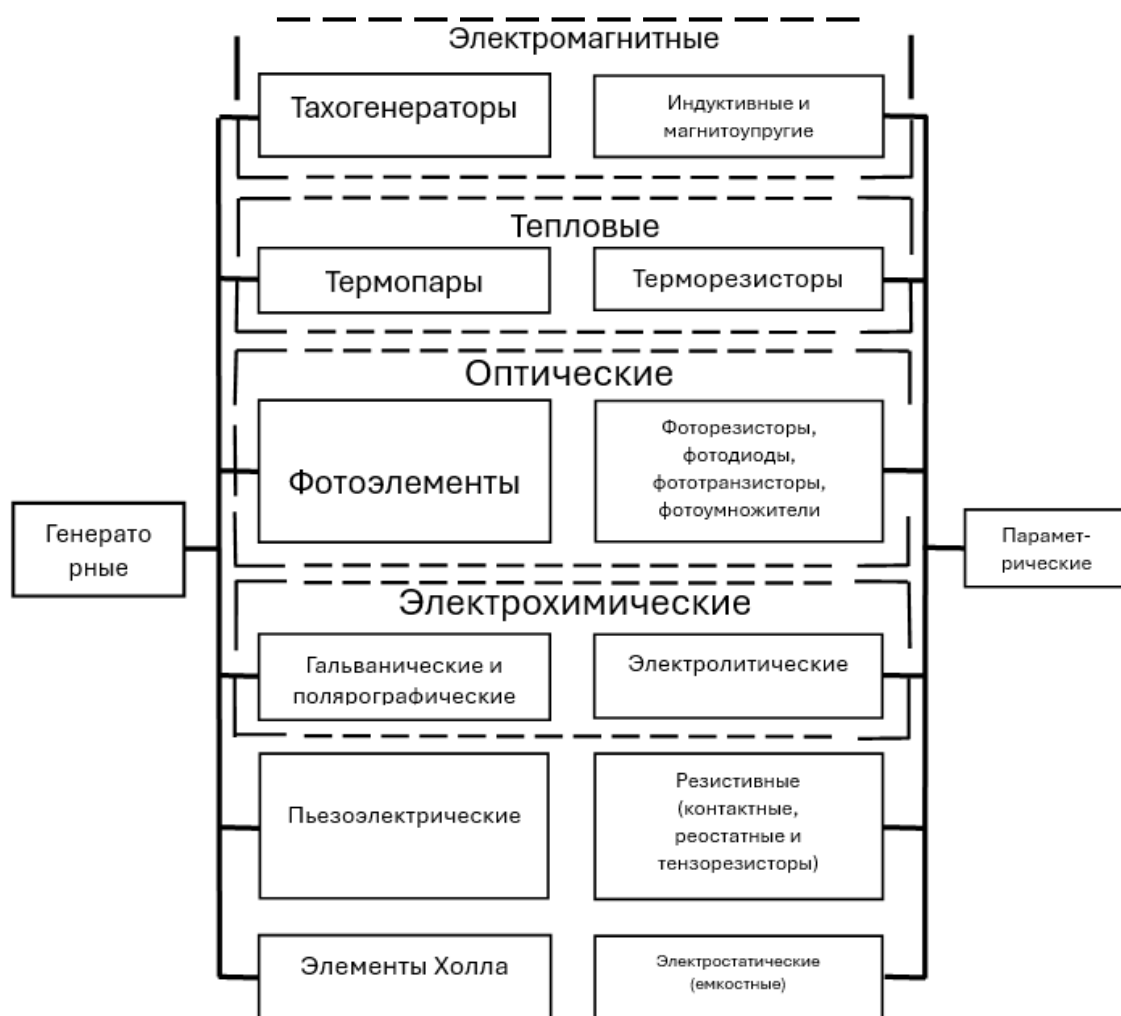


Рисунок 2.14 – Классификация измерительных преобразователей по принципу действия

На практике для преобразования одной и той же неэлектрической величины в зависимости от условий используют различные типы измерительных преобразователей.

3. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. НАЗНАЧЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ОПИСАНИЕ СТРУКТУР. КЛАССИФИКАЦИЯ

3.1. Средства измерений как система

Любое техническое устройство может рассматриваться как система – вопрос лишь в степени детализации. При использовании системных понятий для описания какой-либо части объекта (объективной реальности) эту часть отделяют от окружения таким образом, чтобы в поле рассмотрения осталось лишь конечное число наиболее важных взаимодействий с этой средой. Взаимодействия могут носить характер вещественных и (или) энергетических связей, выражаемых в обмене информацией (рис. 3.1а). Если внимание исследователя концентрируется только на обмене информацией между рассматриваемым объектом и окружающей его средой, то об объекте говорят, как об информационной системе. Выдаваемая этой системой информация по форме и содержанию зависит от входной информации.

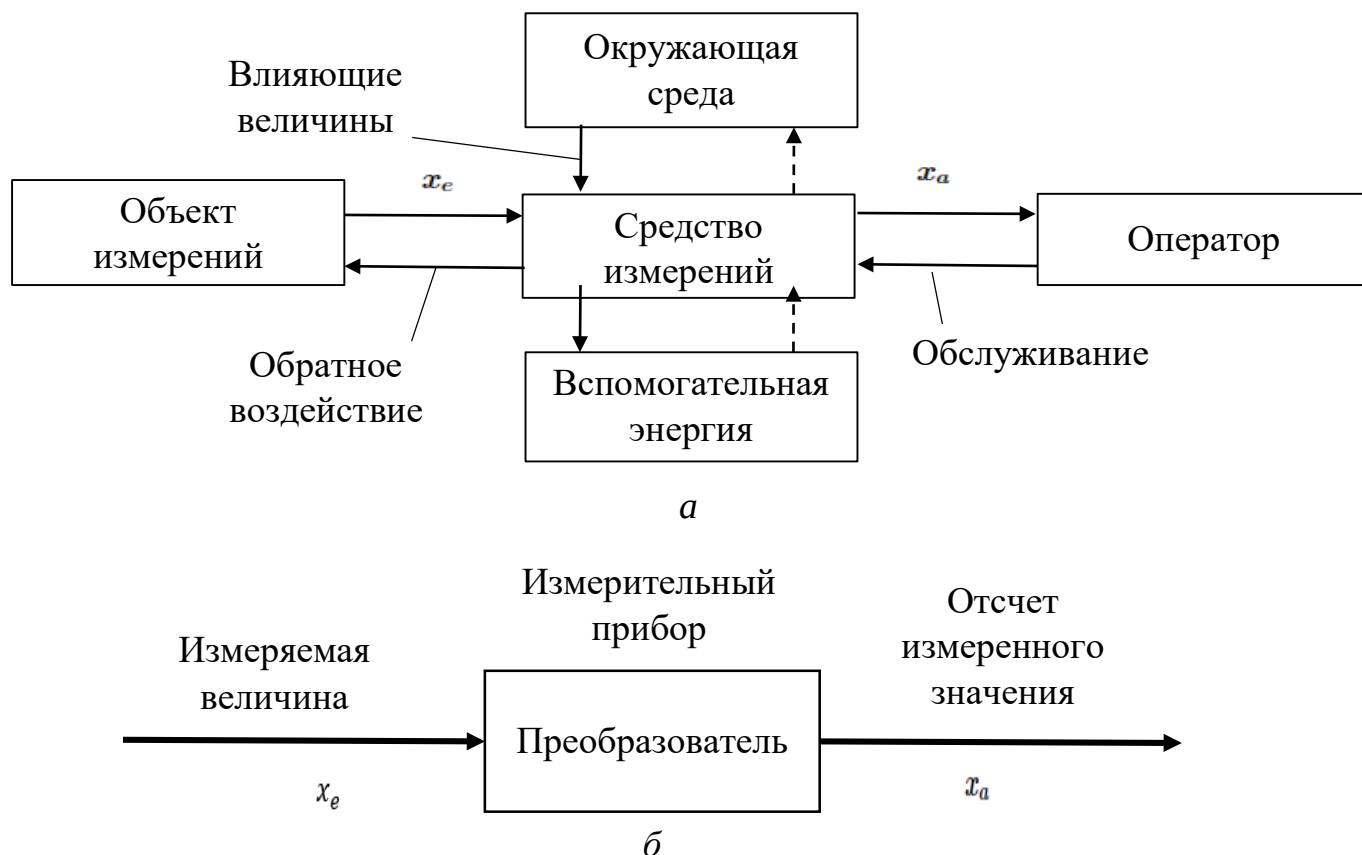


Рисунок 3.1 – Модели средств измерений:

a – обобщенная схема взаимодействия средства измерения с окружающей средой; *б* – обобщенная модель измерительного прибора

Приведенная на рис. 3.1б модель измерительного преобразователя в виде передаточного звена является примером простейшего схематического изображения информационной системы. К этой системе может подводиться информационный поток в виде множества входных величин ($x_{e1}, \dots, x_{en}$). В

результате их обработки в системе (выполнения операций, описываемых определенными математическими зависимостями) на выходе системы выдаются соответствующие выходные величины ($x_{a1}, \dots, x_{an}$).

Определенные связи (зависимости), существующие между входными и выходными величинами, называются передаточными свойствами (характеристиками) системы. Одинаковые системы характеризуются одинаковыми свойствами и характеристиками.

Одним из преимуществ системного подхода к исследованию объектов является возможность приложения характеристик, измеренных у первой системы, ко второй системе, отличающейся своим построением от первой, но имеющей такие же передаточные свойства. Если пренебречь воздействием влияющих величин и считать, что в данный момент времени на вход системы поступает единственная измеряемая величина x_e , которой соответствует одна выходная величина x_a , то такую систему можно описать статической характеристикой вида $x_a = f(x_e)$. Для более общего анализа необходимо учитывать изменение этих величин во времени:

$$x_a(t) = A(x_e(t))$$

Измеряемая величина лишь в редких случаях сохраняет постоянное значение в процессе измерений. Часто постоянство измеряемой величины является кажущимся, так как она наблюдается на фоне помех, которые приходится оценивать, чтобы исключить из результата измерения. Примером может служить измерение длины l металлического бруска, которая постоянна лишь при неизменной температуре окружающей среды.

Из последнего примера можно сделать вывод еще об одном ограничении при системном рассмотрении средств измерений: наряду с входными величинами нельзя не учитывать влияния окружающей среды, проявляющегося в виде воздействий влияющих величин, в том числе помех и шумов. Оценивание и ограничение влияния подобных мешающих воздействий – важная задача системотехники.

Можно выделить следующие общие положения, которыми надо руководствоваться при рассмотрении средств измерений в качестве ИИС:

- важнейшими видами взаимодействия ИИС с окружающей средой являются отбор информации, определение значений измеряемых величин и выдача их в виде выходной информации;
- существует причинно-следственная связь между входной и выходной информацией в направлении от входа к выходу, т. е. $x_e \rightarrow x_a$;
- желательно, чтобы ИИС как можно меньше влияла на входную (измеряемую) величину;
- воздействие помех и вызываемые ими погрешности играют при этом второстепенную роль;
- в автономных измерительных устройствах материальные связи с окружающей средой нередко отсутствуют, а наличие или отсутствие энергетических связей не имеет существенного значения для рассмотрения (их наличие обычно вызывает появление дополнительных шумов и помех);

– для ИИС желательна не имеющая запаздывания линейная передаточная характеристика вида $x_a = K_p x_e$ в любой момент времени, где K_p – коэффициент передачи;

– передаточная характеристика ИИС должна быть воспроизводимой и инвариантной относительно времени, т. е. зависимость между входной и выходной величинами не должна изменяться со временем.

3.2. Измерительная информация

Значимость измерительной информации следует рассматривать с точки зрения ее получения, т. е. выбора одного или нескольких значений измеряемой величины из имеющегося множества, что связано со статистическим подходом [3].

Каждое средство измерений обеспечивает выделение и восприятие информации, что схематично отражено на рис. 3.2а, в сравнении с передачей и обработкой сигналов в информационной системе, схематично показанных на рис. 3.2б. Элементы этих схем представляют собой операции над информацией (сигналами), а не физические устройства.

Один из подходов к толкованию информации в измерительной технике основан на положениях теории вероятностей, включающих в себя оценку вероятности измеренного значения. Если до начала измерений известно, что вероятность того, что значение искомой величины заключено в определенном интервале, весьма мала, то эту вероятность оценивают путем измерений. Вероятность p_v определенного значения измеряемой величины тем меньше, чем больше число уровней квантования или различных ступеней значений этой величины.

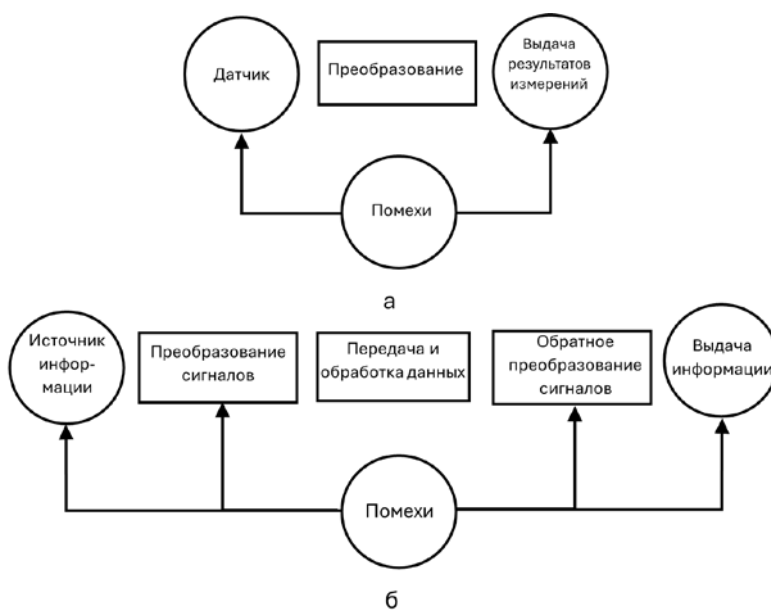


Рисунок 3.2 – Операции восприятия и обработки информации отдельным средством (а) и в информационной системе (б)

Если полагать, что каждое значение измеряемой величины в пределах измерений может появиться с одной и той же вероятностью:

$$p_y = 1/m, \quad (3.1)$$

то вероятность появления любого возможного значения этой величины составит

$$\sum_{v=1}^m p_v = 1. \quad (3.2)$$

Число различных ступеней m измеряемой величины зависит от погрешности средства измерений. Поясним это на примере шкалы гипотетического измерительного прибора (3.3а). Абсолютная погрешность, с которой выполняется каждое измерение, составляет $e = \pm 1$ (деление шкалы), а относительная погрешность $e^0 = \pm 0,05$, или $\pm 5\%$. Иначе говоря, измеренное значение может быть заключено, например, между 1 и 3, если указатель показывает цифру 2. В начале шкалы слева от 0 может быть деление -1. Число m делений (различимых значений) в данном случае составляет:

$$m = \frac{1}{2|e^0|} + 1 = 11. \quad (3.3)$$

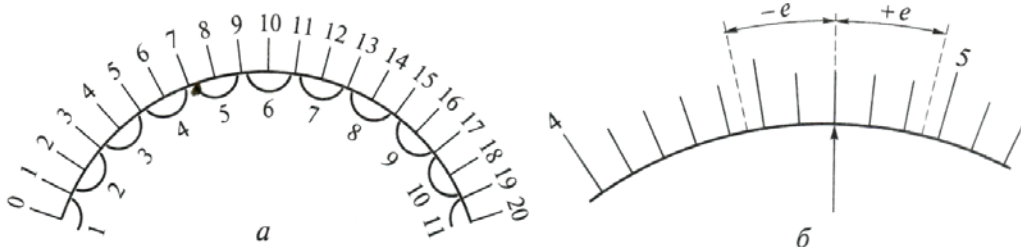


Рисунок 3.3 – Шкалы приборов:

а – иллюстрация зависимости числа различных ступеней квантования m от погрешности средства измерения на примере шкалы прибора; *б* – пример шкалы амперметра

Рассмотрим другой пример – измеритель тока с пределами от 0 до 10 А с ценой деления (шагом) шкалы 0,1 А. Хотя число делений на шкале равно 100, вследствие того, что $e^0 = \pm 0,025$, оказывается, что $m = 21$, т. е. различимы значения 0; 0,5; 1,0; ...; 9,5; 10 при абсолютной погрешности $e^0 = \pm 0,25$ А. Вероятность появления любого из перечисленных различимых значений составит $p_v = 21^{-1} = 0,0476$, или 4,76 %. Если желательно знать измеренное значение на $\pm 0,5$ А точнее, то при упомянутой ранее вероятности это исключено, что и иллюстрирует рис. 3.3б, где показана часть шкалы измерителя тока с положением стрелки напротив значения 4,7А.

При этом значение 4,5 А характеризуется 100 %-й вероятностью, а значение 5 А исключается, так как последнее находится за границами погрешности. Если хотят узнать силу тока точнее на $\pm 0,1$ А, то вероятность значения 4,7 А составит 20 %; при этом возможны значения 4,5 и 4,6 А, а также 4,8 и 4,9 А, лежащие в пределах границ погрешности $\pm e$.

Измерения можно трактовать (в статистическом смысле) как поиск информации с уменьшением неопределенности и увеличением вероятности.

3.3. Единицы измерения информации

Проще всего уменьшить неопределенность информации, если решение заключается в выборе одного из двух значений или представляет собой высказывание типа «Да» или «Нет». В измерительной технике подобные решения связаны с определением двух граничных значений [3].

Примером может служить определение уровня электропроводящей жидкости в резервуаре (рис. 3.4). При погружении в жидкость электрода 1, соединенного с катушкой определенного реле 2, последнее срабатывает, и загорается соответствующая сигнальная лампа 3, «отвечая» утвердительно на вопрос: «Уровень жидкости $h_F > 0,75 h_0$ ».

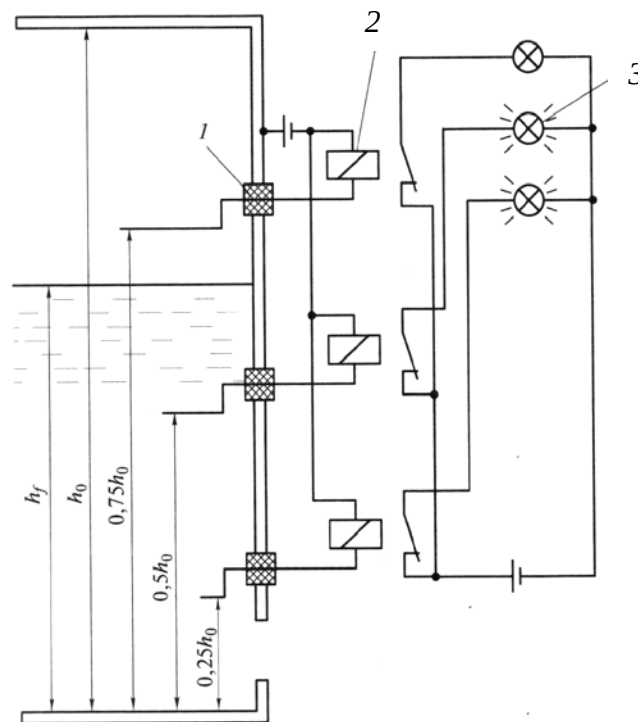


Рисунок 3.4 – Устройство для измерения уровня электропроводящей жидкости в резервуаре:

1 – электрод; 2 – реле; 3 – сигнальная лампа

Для подобного рода решений число различных значений величины $m = 2$ и вероятность появления одного из значений этой величины $p_0 = 0,5$. Однозначный ответ на подобного рода вопрос представляет собой единицу количества информации H_0 , которая называется «бит». В последнем рассмотренном случае $H_0 = 2$ бит, что иллюстрирует табл. 3.1, в которой приведены вопросы относительно четырех возможных уровней жидкости в резервуаре (см. рис. 3.4).

При восьми возможных измеряемых уровнях потребуется задать три вопроса, при 16 – четыре вопроса и т. д. В общем случае число ответов составит $m = 2^r$, где r – число вопросов.

Таблица 3.1 – Информация о возможных уровнях жидкости (по схеме рис. 3.4)

Вопрос 1	Ответ 1	Вопрос 2	Ответ 2	Результат
Горит ли лампа № 2?	Да (1)	Горит ли лампа № 1?	1	$\frac{3}{4}h_0 \leq h_F \leq h_0$
			0	$\frac{1}{2}h_0 \leq h_F \leq \frac{3}{4}h_0$
	Нет (0)	Горит ли лампа № 3?	1	$\frac{1}{4}h_0 \leq h_F \leq \frac{1}{2}h_0$
			0	$0 \leq h_F \leq \frac{1}{4}h_0$

Рассмотрим измерительный прибор, имеющий две шкалы: грубую и точную. Цена деления точной шкалы уменьшена по сравнению с грубой. Значение измеренной величины определяется суммой показаний обеих шкал. Примером такого измерительного прибора является микрометр, схематично изображенный на рис. 3.5. На его поворотной головке насечено 50 делений (точечная шкала). При числах 13 на шпинделе (грубая шкала) и 0,27 на поворотной головке измеряемая величина составит 13,27 мм. В этом случае количества информации также должны суммироваться, и количество $H_{изм}$ измеренной информации равно:

$$H_{изм} = H_1 + H_2. \quad (3.4)$$

Так как каждому делению грубой шкалы с числом делений $m_{гр}$ соответствует $m_{точ}$ делений точной шкалы, то общее число делений обеих шкал – $m_{изм}$, т. е. число возможных различных уровней двухшкального измерительного прибора составит:

$$m_{изм} = m_{гр} m_{точ}. \quad (3.5)$$

Из приведенных соотношений следуют два общих условия, которым должны удовлетворять математические выражения для определения количества информации:

1) согласно выражению (3.4) количества информации, получаемые в отдельных опытах, всегда суммируют;

2) при наступлении известного события, вероятность которого $p_v = 1$, информация оказывается нулевой, т. е. $H_{pv} = 0$.

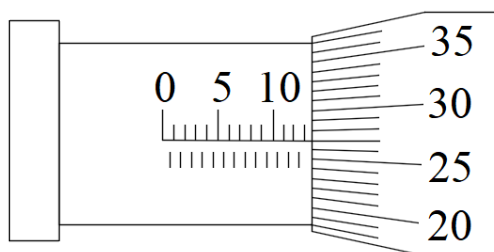


Рисунок 3.5 – Микрометр

Так как $m = 2^r$, где $r = H$, выражение (3.4) можно представить в логарифмическом виде:

$$H_{изм} = H_r + H_2 = \lg_2 m_{гр} + \lg_2 m_{точ} = \lg_2(m_{гр} m_{точ}) = \log_2 m_{изм} \text{ (бит)}, \quad (3.6)$$

т. е. выполняется первое из условий.

Логарифмическая мера информации определяется выбором основания логарифмов a . При $a = 2$ она называется двоичной единицей, при $a = 10$ – десятичной; при $a = e$ – натуральной. Далее двоичные логарифмы обозначены $lb(\lg_2 = lb)$. Если $p = 1$ и $m = 1$, то $H = \lg_a m = 0$, и выполняется второе из условий. Случай $p = 0$ не имеет смысла для измерений.

3.4. Кодирование чисел

Количественно информацию обычно представляют в двоичном виде (в виде двоичных чисел), так как два противоположных состояния легко воспроизводятся многими техническими средствами и распознаются с высокой вероятностью (например, отсутствие или наличие тока в реле, отсутствие или наличие напряжения на выходе транзисторного ключа, отсутствие или наличие пневматического давления на выходе пневмореле и др.). При этом соответствующие сигналы обозначают, т. е. кодируют значениями 0 и 1.

Подобным же образом, используя двоичное решающее правило, кодируют и многоразрядные числа. Предположим, что шкала прибора имеет 64 деления и предел измерения равен 64. Допустим, измеряемая величина равна 41. Обозначив утвердительный и отрицательный ответы на вопрос: «Это число больше, чем ...?» соответственно «1» и «0», воспользуемся правилом поиска числа 41 по двоичному правилу, т. е. последовательным делением числа 64 на 2 и сравнением искомого числа с частными.

Порядок отыскания – алгоритм – графически показан на рис. 3.6. Следуя выделенному пути (обозначен полужирными стрелками), можно определить двоичные разряды, т. е. двоичное число 101001, являющееся кодом числа 41.

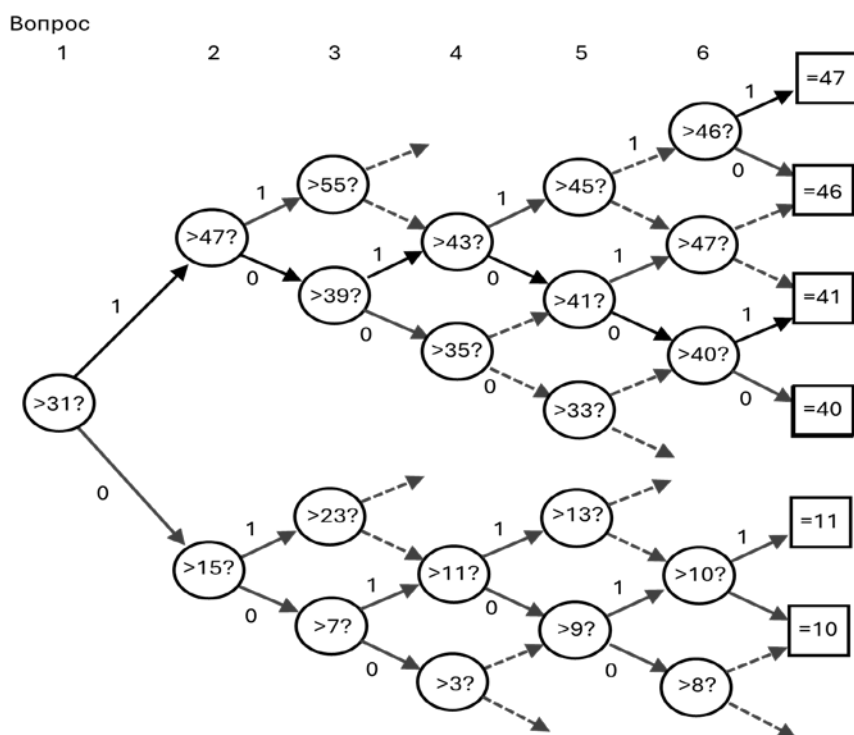


Рисунок 3.6 – Графическое изображение алгоритма двоичного поиска числа

Таблица 3.2 – Двоичные эквиваленты десятичных чисел

Десятичное число	Двоичное число				Код
	2^3	2^2	2^1	2^0	
0	0	0	0	0	0000
1	0	0	0	1	0001
2	0	0	1	0	0010
3	0	0	1	1	0011
4	0	1	0	0	0100
5	0	1	0	1	0101
6	0	1	1	0	0110
7	0	1	1	1	0111
8	1	0	0	0	1000
9	1	0	0	1	1001
10	1	0	1	0	1010
11	1	0	1	1	1011
12	1	1	0	0	1100
13	1	1	0	1	1101
14	1	1	1	0	1110
15	1	1	1	1	1111

В приведенном примере $m = 64$, значит, $r = 6$, что равно числу двоичных шагов поиска или числу разрядов искомого двоичного числа. Основание таких чисел равно 2 (у десятичных – 10). Показатели степеней двоичного числа

суммируют по модулю 2. Например, десятичное число 235 в двоичном виде записывают следующим образом: $1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 128 + 64 + 32 + 8 + 2 + 1 = 235$.

Как видно, каждый разряд двоичного числа обозначен 0 или 1, а двоичные числа представляются общим выражением

$$Z_2 = \sum_{i=0}^K a_i 2^i, \quad 0 \leq a_i \leq 1, \quad (3.7)$$

где a_i – целое число (0 или 1).

В табл. 3.2 приведены десятичные числа от 0 до 15 и их двоичные эквиваленты. Здесь $m = 16$, $r = 4$, $i = 3$. В двоичных числах разряды записывают слева направо в порядке убывания их старшинства.

3.5. Количество информации при измерениях

На практике обычно имеется представление об ожидаемых значениях измеряемой величины, т. е. о ее более и менее вероятных значениях.

В качестве примера можно указать на изменения напряжения в сети переменного тока, контролируемого вольтметром с пределами измерений от 0 до 300 В, при номинальном напряжении в сети 220 В. Очевидно, что значения напряжения вблизи пределов измерений имеют нулевую вероятность (если сеть не аварийная), а вблизи номинального значения вероятности значений максимальны. Кривая зависимости вероятности появления значений напряжения в функции от этих значений изображена (для гипотетического случая) на рис. 3.7а.

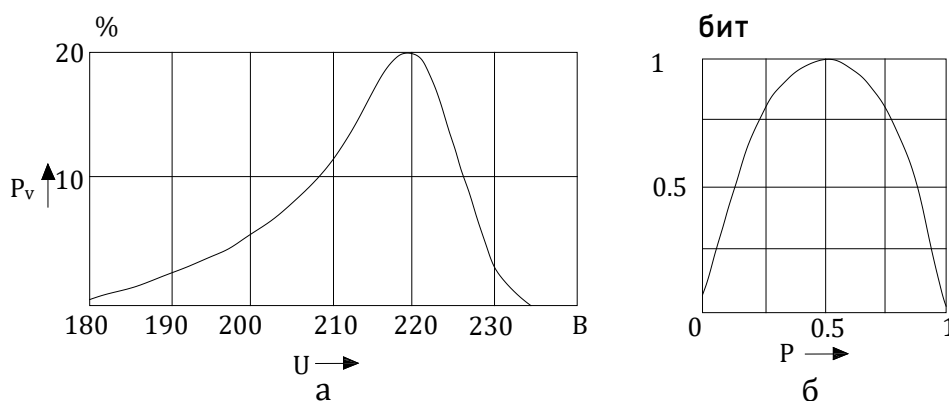


Рисунок 3.7 – Графики вероятности:

а – кривая вероятности значений напряжения в промышленной сети (возможный случай); *б* – график зависимости среднего количества информации H в функции вероятности высказывания «Да»

При определении среднего значения (среднего количества) информации H важную роль играет различие вероятностей разных значений. Если возможности появления каждого из значений равновероятны, то количество информации,

содержащееся в каждом измеренном значении, считается равным среднему значению. В противном случае полученные значения должны быть предварительно усреднены с учетом их «весов» (при этом наиболее вероятному значению соответствует и наибольший «вес»). Тем самым, определяют так называемое *взвешенное среднее*. Весовыми коэффициентами являются сами вероятности.

3.6. Формы представления информации при измерениях

Измерительная информация представляется в виде сигналов, являющихся ее носителями. Сигнал есть физическая величина, изменяющаяся во времени, имеющая хотя бы один параметр, который непосредственно (либо опосредованно, через другую связанную с ним величину) содержит информацию, и эта информация может быть определена. Указанные параметры носят название информативных и должны допускать измерение множества их значений. Эти параметры однозначно связаны с измеряемой величиной и обеспечивают воспроизводимость ее значений при повторении измерений; они служат одновременно мерами значений соответствующих измеряемых величин, т. е. измеряемые величины отображаются соответствующими информативными параметрами [3].

Обычно в качестве сигнала воспринимается сама измеряемая величина. Измерения представляют собой процессы преобразования сигналов, в которых сигнал «измеряемая величина» преобразуется в сигнал «выходная величина», т. е. «измеренное значение». Понятия сигнала и связанных с его определением свойств можно пояснить на следующих примерах.

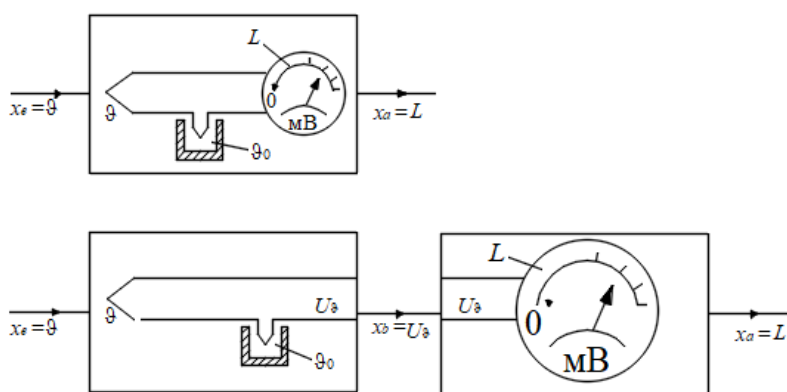


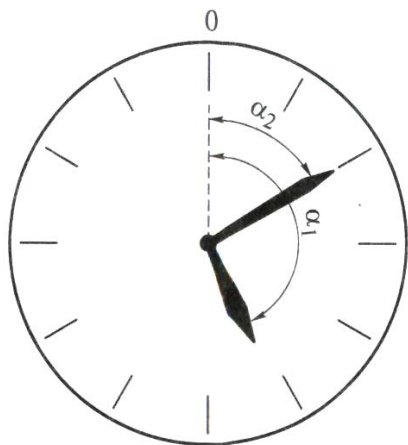
Рисунок 3.8 – Схема измерения термоЭДС:

a – термоэлемент и измерительный прибор – единый блок; *б* – термоэлемент и измерительный прибор разнесены

На рис. 3.8 схематично показаны термоэлемент и подключенный к нему прибор для измерения генерируемой термоЭДС. Пару датчик-прибор можно рассматривать как единую систему (рис. 3.8*a*) и как два последовательно

соединенных устройства (рис. 3.8б). В первой схеме можно выделить измеряемую величину – температуру (входной сигнал $x_e = \theta$); носитель сигнала x_a , преобразуемый в отклонение стрелки вдоль шкалы на длину L дуги; информативный параметр – длину L , отсчитываемую от нулевой отметки на шкале до деления, напротив которого остановилась стрелка.

Во второй схеме входными сигналами являются измеряемые величины $x_e = 0$ и $x_b = u_\theta$ – термоЭДС. Носителями сигнала x_a являются термоЭДС и отклонение стрелки, а информативными параметрами – значение термоЭДС и перемещение L стрелки.



В другом примере – в часах со стрелочным циферблатом (рис. 3.9) – входным сигналом x_e является время t , информативными параметрами – угол α_1 отклонения малой (часовой) стрелки и угол α_2 отклонения большой (минутной) стрелки от условно нулевой линии.

Рисунок 3.9 – Циферблат часов

3.7. Классификация сигналов

Систематизировать сигналы можно по различным классификационным признакам. Согласно положениям теории информации, сигналы могут различаться по их информативным параметрам. Здесь мы ограничимся так называемыми детерминированными сигналами, поведение которых в любой момент времени известно.

Схема классификации детерминированных сигналов и эпюры соответствующих примеров сигналов изображены на рис. 3.10, 3.11. Эти сигналы могут быть аналоговыми и квантованными. Аналоговый сигнал (точнее, его информативный параметр) в любой момент времени характеризуется каким-то численным значением и может быть представлен бесконечно большим количеством значений по уровню. Квантованный сигнал, наоборот, представляется конечным числом значений по уровню. Области значений, в которых определен подобный сигнал, называются *интервалами* (шагами, уровнями) *квантования*. Квантование по уровню должно быть очень точным, однако число возможных квантованных значений (уровней квантования) конечно. Числа уровней кодируют; такие сигналы называют цифровыми.

Деление сигналов на аналоговые и цифровые (с точки зрения значений их уровней) не надо путать с непрерывными и прерывистыми (дискретными) сигналами. Первые характеризуются объемом значений, а вторые различаются характером изменения во времени и продолжительностью воздействия.

Непрерывный сигнал все время изменяется; он действует и имеет определенное значение в любой произвольный момент времени. Дискретный сигнал изменяется только в интервалах времени, называемых интервалами (шагами) дискретизации.

Квантованные по уровню сигналы подразделяют, в свою очередь, на двух- и многоуровневые (или двух- и многозначные). Первые называются двоичными сигналами; они принимают только два значения: 0 или 1. В некоторых случаях им приписывают значения -1 и $+1$, хотя такие сигналы относятся к трехуровневым, так как включают в себя и нулевое значение (рис. 3.11*б*). Обычно эти сигналы называют цифровыми и представляют в виде совокупности импульсов, причем информативным параметром такой последовательности импульсов может быть не только амплитуда (рис. 3.11*в-д*), но и частота следования этих импульсов, и временное расстояние между ними.

В последнем случае (рис. 3.11*з*) нулевым значением информативного параметра сигнала-времени – является отсутствие импульса в такте, а количество таких значений (0 и 1) в такте представляет собой числовой код. Цифровые сигналы являются дискретными. Их можно передавать последовательно (по одному каналу) или параллельно, одновременно по группе параллельных каналов в виде параллельных слов. При последовательной передаче требуется также передавать символ-признак временного такта (рис. 3.11*з*).

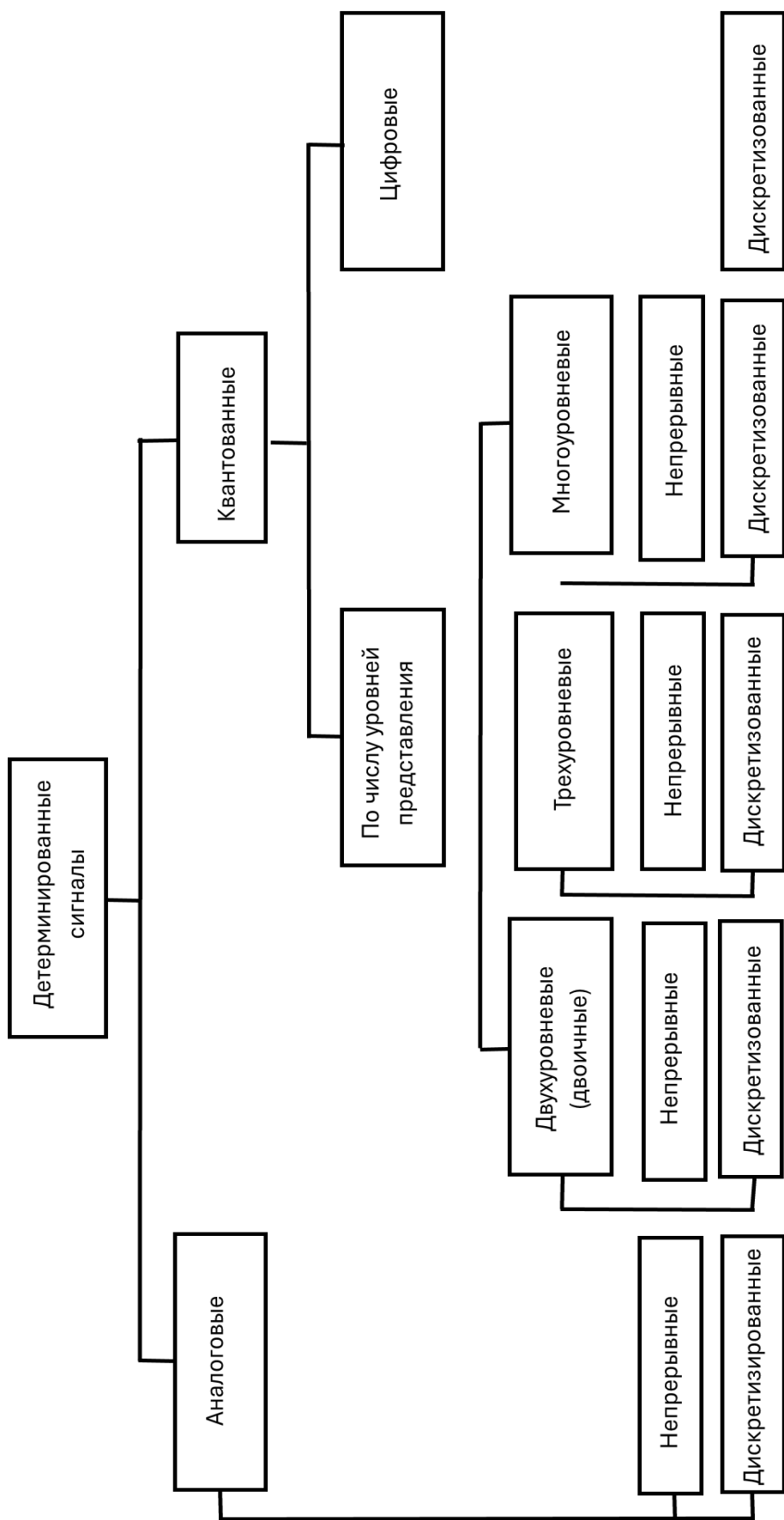


Рисунок 3.10 – Классификация детерминированных сигналов

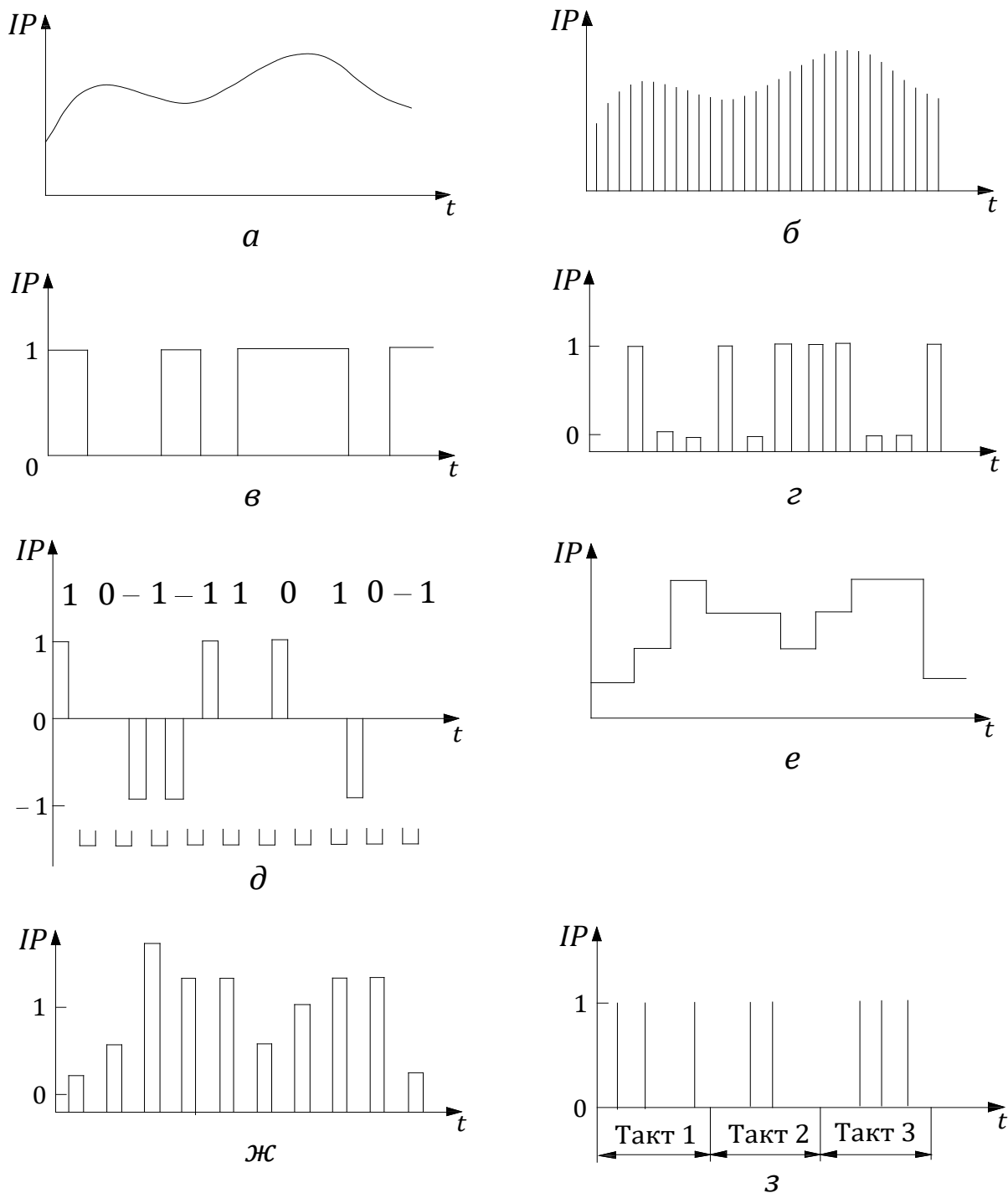


Рисунок 3.11 – Виды детерминированных сигналов:

а – аналоговый непрерывный; *б* – аналоговый дискретизованный;
в – двухуровневый непрерывный; *г* – двухуровневый дискретизованный;
д – трехуровневый дискретизованный; *е* – многоуровневый непрерывный;
ж – многоуровневый дискретизованный; *з* – цифровой дискретизованный

3.8. Графическое изображение передачи сигналов

Основные символично-графические обозначения передачи сигналов, используемые для построения функциональных блок-схем, отображающих прохождение сигналов в различных электрических и электронных устройствах, включая и средства измерений, приведены в табл. 3.3. Сигналы обозначают буквенными символами, а направление их передачи указывают стрелками. Следует обратить внимание на то, что линейными являются линейное передаточное и суммирующее звенья, а множительное и делительное звенья являются нелинейными элементами.

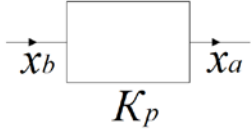
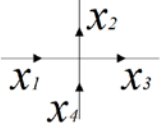
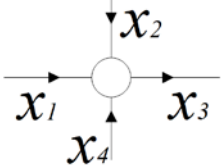
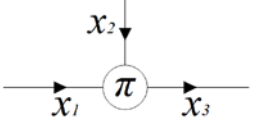
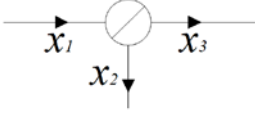
Необходимые для понимания функционирования измерительных устройств энергетические воздействия обозначают сдвоенной стрелкой $\Rightarrow$, которая свидетельствует о том, что данный сигнал разрешает подвод энергии либо данный сигнал включает источник, формирующий последующий сигнал. Рассмотрим составление блок-схем на двух примерах.

На рис. 3.12а схематично изображены пружинные весы, выходной величиной x_a которых является отклонение стрелки на шкале, равное s . При линейной характеристике растяжения пружины, когда усилие $F_F = D_F s$ (где D_F – пружинная константа), приложенная масса m груза оказывается пропорциональной удлинению s пружины (отклонению стрелки). Этот процесс взвешивания отображен соответствующей блок-схемой сигналов на рис. 3.12б, где g – ускорение свободного падения; K_x – передаточный коэффициент весов. На массу m действует сила тяжести $F_m = mg$, которая является выходным сигналом передаточного звена с постоянным коэффициентом пропорциональности (передачи) g . Сила тяжести F_m вызывает удлинение s пружины до тех пор, пока эта сила не уравнивается противоположным ей усилием F_F пружины, т. е. пока их разность ΔF не станет равной нулю. При этом $m \sim s$ (собственная масса весов не принимается во внимание).

На рис. 3.13а схематично изображена U-образная манометрическая трубка, заполненная ртутью. Измеряемое избыточное (сверх атмосферного) давление p_u уравнивается усилием F_G , создаваемым столбиком ртути высотой h , что отображается суммирующим узлом блок-схемы сигналов на рис. 3.13б. Столбик ртути поднимается на высоту h до тех пор, пока объем столбика $V = \Delta h$ и, следовательно, его масса $m = \rho V$ (ρ – плотность ртути) и соответствующая сила тяжести $F_G = mg$ не уравновесят силу F_p , создаваемую измеряемым давлением.

Преобразование сигнала h в сигнал F_G может осуществляться и общим передаточным звеном с коэффициентом $A\rho g$ (рис. 3.13в). Работу трубки можно представить и как уравнивание измеряемого давления p_u компенсирующим давлением p_{Hg} столбика ртути противоположного знака (рис. 3.13г).

Таблица 3.3 – Основные элементы передачи и преобразования сигналов

Название звена	Символическое изображение	Выполняемая функция	Примечание
Линейное передаточное звено		$X_a = K_p x_e$	Внутри графического символа может быть характеристика звена (передаточная функция, переходная функция и т. п.); K_p – передаточный коэффициент
Нелинейное Передаточное звено		$X_a = f(x_e)$	То же
Узел разветвления		$x_1 = x_2 = x_3 = x_4$	Число входящих сигналов не может превышать трех на один узел
Узел суммирования		$x_3 = x_1 + x_2 - x_4$	Знак указывается рядом со стрелкой
Множительный узел		$x_1 x_2 = x_3$	При числе сомножителей более двух используют дополнительные звенья
Делительный узел		$x_1 / x_2 = x_3$	—

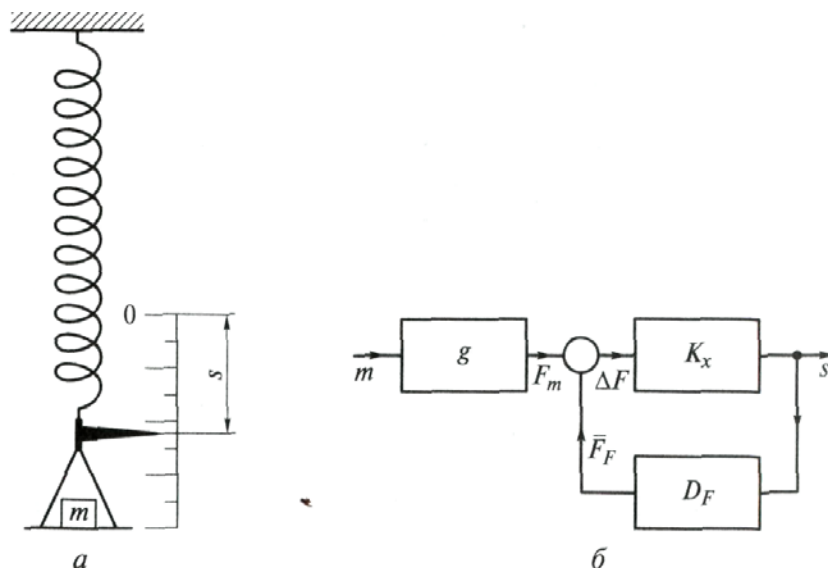


Рисунок 3.12 – Пружинные весы (а) и соответствующая блок-схема сигналов (б)

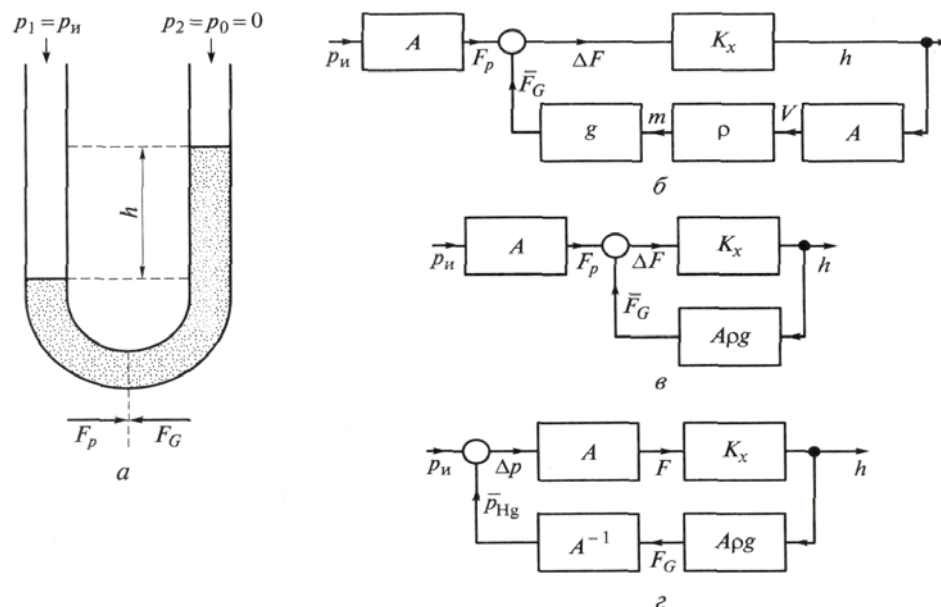


Рисунок 3.13 – U-образная манометрическая трубка (а) и соответствующие блок-схемы сигналов (б...г)

Из анализа рассмотренных примеров можно сделать следующие общие выводы.

1. Передаточные звенья на блок-схемах сигналов являются условными и необязательно соответствуют определенным техническим средствам. Так, на рис. 3.13 сигнал – сила тяжести F_G формируется из сигнала – массы m .

2. Блок-схемы сигналов одинаковых приборов могут немного различаться в зависимости от цели анализа и принципов разработки блок-схемы (например, при желании минимизировать количество узлов пересечений сигналов). Независимо от этого блок-схемы отражают один и тот же результат действия прибора (если нет ошибок), что видно из рассмотрения блок-схем, представленных на рис. 3.13.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, В. А. Измерительные преобразователи: учебное пособие / В. А. Кузнецов. – Самара: Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2018. – 146 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/91760.html> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст: электронный.
2. Бикулов, А. М. Методы и средства измерений: учебное пособие для поверителей средств теплотехнических и физико-химических измерений / А. М. Бикулов. – Москва: Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. – 132 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/44250.html> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст: электронный.
3. Селиванова, З. М. Информационно-измерительные системы: учебное пособие / З. М. Селиванова. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2019. – 81 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/99759.html> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст: электронный.
4. Метрология. Метрологические характеристики средств измерений. Метрологическое обеспечение производства: [сайт]. – URL: https://metro.b.ru/html/ci/metrologicheskie_harakteristiki_si.html (дата обращения: 25.03.2024). – Текст: электронный.

Учебное издание

**Бахтин Андрей Владимирович
Ремизова Ирина Викторовна**

Технологические измерения и приборы
**Основы измерительной техники и информационно-
измерительные системы**

Учебное пособие

2-е издание, дополненное и переработанное

Редактор и корректор А. А. Чернышева
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2024 г., поз. 5151/24

Подписано к печати 09.04.2024.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 4,1.	Уч.-изд. л. 4,1.
Тираж 30 экз.	Изд. № 5151/24	Цена «С». Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.