

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Г.Н.Солопченко

## ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие

Санкт - Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2011

УДК 621.317.08.(075.8)  
С 606

**Г.Н.Солопченко. Измерение электрических и неэлектрических величин.**  
**Учебное пособие.** - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - 122 С.

Соответствует требованиям образовательных стандартов, регламентирующих учебные программы подготовки бакалавров, магистров и дипломированных специалистов по направлению 150100.

Приводятся основные понятия метрологии и измерительной техники, перечисляются основные виды средств измерений и характеристики качества измерений. Рассмотрена метрологическая структурная схема измерений, источники погрешностей средств измерений и результатов измерений. Представлены основные сведения о принципах действия, правилах применения и о предельных возможностях аналоговых и цифровых измерительных приборов и измерительных преобразователей, в том числе АЦП и ЦАП. Обсуждаются вопросы обеспечения связи с компьютером и защиты измерительной информации от помех. Рассмотрены средства и методы измерений неэлектрических величин: температуры, деформаций, силы, ускорения, давления, скорости, виброперемещений, малых и больших перемещений, уровня, толщины материалов, магнитной индукции, скорости вращения. Приводятся структурные схемы соответствующих измерительных каналов ИИС. Перечислены метрологические характеристики датчиков. В приложениях приводится примерная форма методики поверки и(или) калибровки средств измерений.

Табл.5. Илл. 49.

Печатается по решению редакционно - издательского совета Санкт - Петербургского государственного политехнического университета.

© Санкт - Петербургский государственный  
политехнический университет, 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Технические измерения. Общие положения .....	5
1.1. Основные понятия, принятые в измерительной технике .....	5
1.2. Роль и значение измерений в практической деятельности .....	7
1.3. Виды средств измерений .....	10
1.4. Основные этапы измерительных технологий .....	15
1.5. Примеры взаимодействия средств измерений с объектом измерений .....	18
1.6. Классификация погрешностей средств измерений и результатов измерений .....	22
1.7. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме. Средства измерений линейные .....	
1.8. Правила округления при измерениях .....	29
2. Аналоговые электроизмерительные приборы .....	30
2.1. Общие характеристики, обозначения на шкале .....	30
2.2. Приборы магнитоэлектрической системы .....	33
2.2.1. Общие свойства .....	33
2.2.2. Простейшие применения магнитоэлектрических приборов .....	35
2.2.3. Применения в составе электронных аналоговых приборов ..	37
2.3. Приборы электродинамической системы .....	38
2.4. Приборы ферродинамической системы .....	41
2.5. Приборы электромагнитной системы .....	42
2.6. Приборы электростатической системы .....	44
2.7. Приборы индукционной системы .....	45
2.8. Средства расширения пределов измерения и правила выбора подходящего предела измерения .....	48
2.8.1. Типичные способы и средства расширения пределов измерения .....	48
2.8.2. Шунты .....	49
2.8.3. Добавочные резисторы .....	50
2.8.4. Измерительные трансформаторы тока .....	51
2.8.5. Измерительные трансформаторы напряжения .....	52
2.8.6. Правило выбора предела измерения .....	53
3. Мостовые методы измерения параметров элементов электрических цепей .....	54
3.1. Мосты постоянного тока .....	54
3.1.1. Мосты постоянного тока в равновесном режиме .....	54
3.1.2. Мосты постоянного тока в неравновесном режиме .....	57
3.2. Мосты переменного тока .....	59

3.2.1. Условия равновесия мостов переменного тока .....	59
3.2.2. Мост переменного тока для измерения емкости конденсатора .....	60
3.2.3. Мост переменного тока для измерения индуктивности катушки .....	62
4. Цифровые средства измерений .....	63
4.1. Цифроаналоговые преобразователи .....	63
4.2. Аналого-цифровые преобразователи .....	65
4.2.1. АЦП поразрядного уравнивания .....	65
4.2.2. Интегрирующие АЦП .....	67
4.2.4.1. АЦП двойного интегрирования .....	67
4.2.4.2. Сигма-дельта АЦП .....	69
4.2.6. Связь ЦАП и АЦП с компьютером .....	70
4.3. Цифровые измерительные приборы .....	71
4.4. Помехи и борьба с ними .....	73
5. Измерительные преобразователи неэлектрических величин .....	77
5.1. Средства и методы измерения температуры .....	77
5.1.1. Термоэлектрические датчики температуры .....	77
5.1.2. Термопреобразователи сопротивления проволочные .....	81
5.1.3. Полупроводниковые термометры сопротивления .....	84
5.2. Измерение деформаций .....	85
5.3. Тензорезистивные датчики .....	92
5.4. Пьезоэлектрические датчики .....	100
5.5. Емкостные датчики .....	105
5.6. Индуктивные датчики .....	109
5.7. Гальваномагнитные датчики .....	111
5.10.1. Гальваномагнитные датчики Холла .....	111
5.10.2. Источники погрешности датчиков Холла .....	115
5.10.3. Магниторезистивные датчики .....	117
5.11. Датчики скорости вращения .....	117
5.12. Метрологические характеристики датчиков .....	121
Библиография .....	123

## 1. Технические измерения. Общие положения

### 1.1. Основные понятия, принятые в измерительной технике

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Относительная погрешность (*relative error*) – отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины.

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

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

Основная погрешность (*intrinsic error*) – погрешность средства измерений в нормальных условиях эксплуатации.

Нормальные условия эксплуатации (*reference conditions*) устанавливаются в соответствии с ГОСТ 8.395 "Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования". Нормальные условия - это довольно жесткие ограничения на пределы допускаемых изменений значений влияющих величин (например, температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления, параметров внешних электрических и магнитных полей, напряжения питания, солнечной радиации, амплитуды вибраций, интенсивности солнечной радиации и других), при которых определяется и контролируется основная погрешность средств измерений во время их метрологических испытаний. Такие ограничения необходимы для обеспечения взаимного доверия к результатам контроля метрологических характеристик, проводимого в стандартизованных условиях. Рекламации, вызванные превышением основной погрешностью установленной для нее нормы, принимаются только в том случае, когда это превышение установлено в нормальных условиях.

Рабочие условия применения средств измерений (*normal conditions*), как правило, отличаются от нормальных условий, что приводит к увеличению погрешности.

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

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

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

Государственное управление по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляет Федеральное агентство РФ по стандартизации, метрологии и сертификации (Росстандарт) через Государственные научные метрологические центры (метрологические институты), через территориальные органы государственного метрологического надзора, действующие во всех субъектах федерации, а также через метрологические службы юридических лиц, аккредитованные в установленном порядке.

## **1.2. Роль и значение измерений в практической деятельности**

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

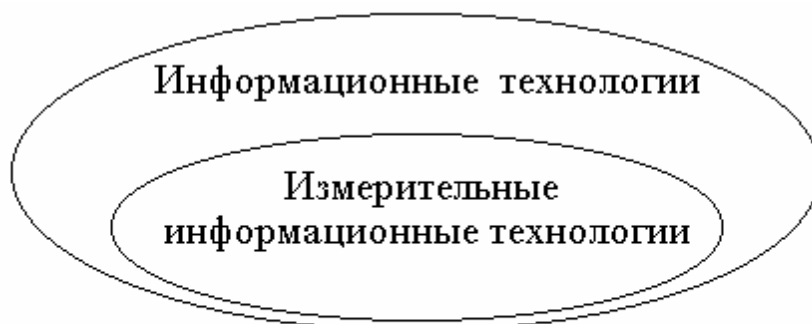


Рис. 1. Измерительные информационные технологии в группе информационных технологий

числительной техники: от микропроцессоров до компьютерных сетей.

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

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

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

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

На рис. 2 в укрупненном виде представлено функционирование (поведение) любой технической, управленческой, социальной или биологической системы, как последовательность операций, первой среди которых является получение первичной информации от объекта в результате информативного взаимодействия с ним. Конкретная форма, в которой испол-



няется эта первая операция в той или иной сфере деятельности, различна. При научных исследованиях, при разработке, производстве и эксплуатации промышленных объектов, технических средств, транспорта,

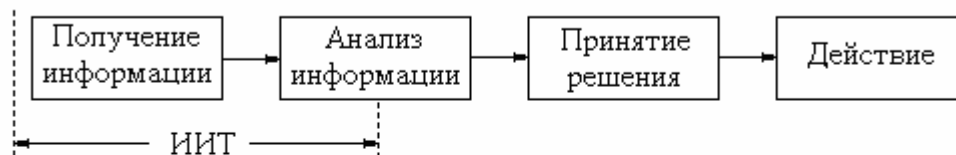


Рис. 2. Место измерительных информационных технологий в практической деятельности

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

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

ствуют региональные организации на территориях Европы, Северной Америки, Азии и других континентов.

### 1.3. Виды средств измерений

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

Используемое технологическое оборудование:

- измерительные инструменты – средства измерений – основное оборудование,

- вспомогательное оборудование, в том числе, средства вычислительной техники – компьютеры, процессоры, микропроцессоры, периферийные устройства, средства передачи и хранения информации.

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

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

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

Средства измерений подразделяются на следующие 4 вида.

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

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

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

*Стандартный образец* – мера в виде вещества (материала), состав или свойство которого установлены при аттестации.

*Калибратор* – многозначная мера, как правило, допускающая управление от компьютера.

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

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

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

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

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

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

Примеры первичных измерительных преобразователей (датчиков): термopара, термометр сопротивления, датчики давления, влажности, параметров магнитного поля, параметров вибраций, скорости и расхода нефти и газа и многие другие.

Измерительными преобразователями кроме датчиков являются измерительные усилители, фильтры (вторичные измерительные преобразователи), измерительные трансформаторы, коммутаторы, преобразователи непрерывных (аналоговых) величин в цифровой код (*аналого-цифровые преобразователи, АЦП*), преобразователи цифрового кода в аналоговый сигнал тока или напряжения (*цифроаналоговые преобразователи, ЦАП*). Типичные характеристики преобразования линейных ЦАП и АЦП показаны на рис. 3 а) и 3 б) соответственно. На этих рисунках обозначено:

$N_{\max}$  – максимальное значение входного кода (для ЦАП) и выходного кода (для АЦП),

$x_{\max}$  – максимальное значение выходной аналоговой величины (для ЦАП) и максимальное значение входной величины (для АЦП),

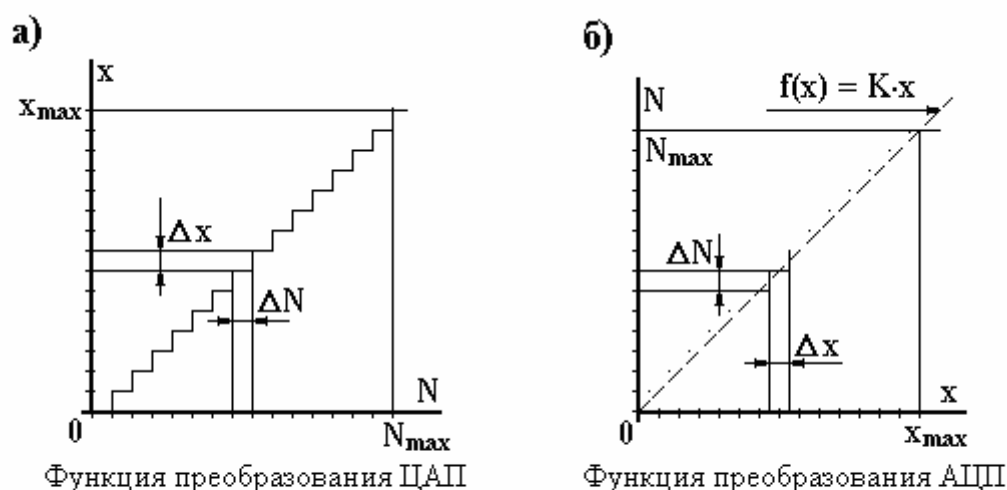


Рис. 3. Примеры типовых функций преобразования ЦАП и АЦП

$\Delta N$  – единица младшего разряда кода (входного для ЦАП и выходного для АЦП),

$\Delta x$  – цена единицы младшего разряда кода (входного для ЦАП и выходного для АЦП).

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

Типовая структура современных измерительных информационных систем (ИИС) представлена на рис. 4.

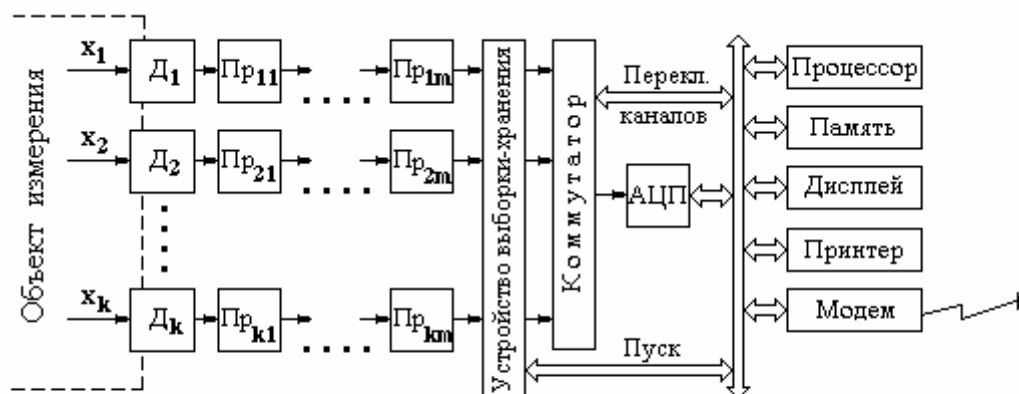


Рис. 4. Типовая структура современных измерительных информационных систем

Обычно количество измерительных каналов в ИИС достигает нескольких (до нескольких тысяч) измерительных каналов. Каждый канал представляет собой последовательное соединение измерительных преобразователей, первым из которых является датчик. С помощью коммутатора, управляемого от процессора, сигналы измерительной информации каждого  $j$  – го канала поочередно подключаются на вход АЦП, на выходе которого при каждом таком подключении формируется числовой эквивалент значения соответствующей измеряемой величины, как правило, в двоичном коде. Переключение каналов в ИИС выполняется последовательно в момен-

ты времени  $t_i + (j - 1) \cdot \Delta t$ , где  $t_i$  – время подключения к АЦП первого канала,  $j$  – номер канала,  $\Delta t$  – время, которое в соответствии с принятым в ИИС интерфейсом затрачивается на выполнение протокола обмена между компьютером и коммутатором, между компьютером и АЦП, на выполнение компьютером программ управления, на аналого-цифровое преобразование, а также на срабатывание устройств сопряжения. Однако, несмотря на различие моментов измерения, все результаты относятся к одному моменту, а именно, к моменту начала цикла опроса каналов  $t_i$ . Если измеряемые величины изменяются со скоростью  $dx_j/dt$ , то результат измерения  $j$  – ой величины будет содержать погрешность, равную  $x_j(t_i + (j - 1) \cdot \Delta t) - x_j(t_i) \approx \Delta t \cdot (j - 1) \cdot (dx_j/dt)$ . Эта погрешность, вызванная неопределенностью момента измерения, называется *апертурной погрешностью*. Она появляется только, когда измеряемые величины существенно изменяются за время опроса каналов. В статическом режиме измерений, когда измеряемые величины практически не изменяются, апертурная погрешность отсутствует.

Средством практически полного исключения апертурной погрешности может служить многоканальное устройство выборки-хранения, все каналы которого в момент запуска от компьютера переходят из режима слежения, когда сигнал на выходе повторяет сигнал на входе, в режим запоминания. Таким образом, на выходе всех каналов устройства выборки – хранения оказываются неизменные значения всех сигналов, соответствующие одному и тому же значению времени запуска  $t_i$ . Эти значения последовательно преобразуются АЦП в двоичный код и передаются в компьютер. В компьютере каждое из полученных двоичных чисел сопоставляется со шкалой соответствующей измеряемой величины. В результате этого сопоставления формируются значения измеряемых величин в их единицах и тем самым выполняется прямое измерение. Последующие операции (математическая обработка, хранение, передача, визуализация результатов измерений) выполняется в соответствии с целями эксперимента компьютером и иными средствами, входящими в состав системы.

Многие современные ИИС строятся на базе компьютерных сетей. Диспетчеризация работы таких распределенных ИИС и обмен информаци-

ей выполняются с помощью сетевого программного обеспечения и средств межмашинной связи (телефонные каналы, радиоканалы, оптоволоконные линии связи, каналы спутниковой связи и другие). Для соединения с этими каналами предусматриваются соответствующие модемы.

#### 1.4. Основные этапы измерений

В дальнейшем будем различать прямые и косвенные измерения.

Прямое измерение (direct measurement) – измерение, при котором результат измерения получают непосредственно из опытных данных.

В некоторых случаях прямое измерение величин оказывается невозможным или нецелесообразным. Тогда прибегают к *косвенным измерениям*.

Косвенное измерение – (indirect measurement) – определение искомого значения измеряемой величины путем вычислений на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной.

Этапы прямых измерений представлены на рис. 5.

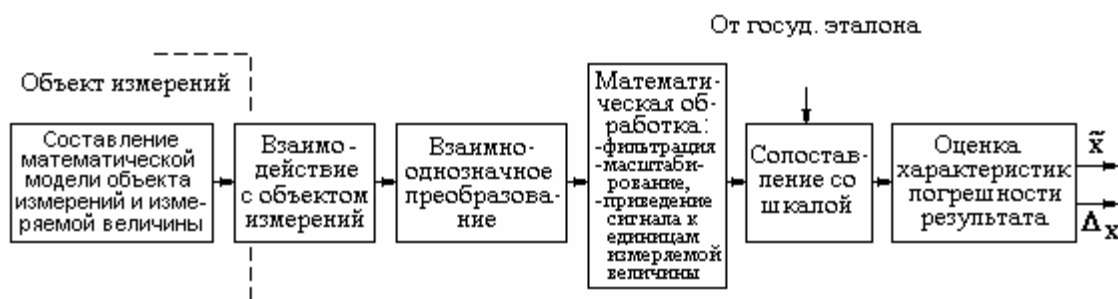


Рис.5. Этапы прямых измерений

Первым этапом при любой измерительной процедуре является формализация и составление модели объекта измерений и измеряемой величины. Так, перед измерением диаметра стержня необходимо представить его, как круглый цилиндр с указанием отклонений от круглости. При измерении температуры воздуха в некотором объеме необходимо представить модель распределения температуры в этом объеме и сформулировать измеряемую температуру, как измеряемую величину: среднюю по объему, как мини-

мальную и максимальную, или как температуру в какой-либо точке объема.

На следующем этапе организуется взаимодействие измерительного инструмента с объектом измерений. Этот этап является важнейшим в процедуре восприятия информации от объекта. В нем сконцентрирована физическая, информационная и философская сущность измерений, как познавательного процесса. Именно здесь сталкиваются две противоположные стороны любого познания: без контакта с объектом познание невозможно, но этот контакт с объектом искажает его, что приводит к потере части информации. В связи с изложенным это взаимодействие должно быть:

- достаточно “деликатным” по отношению к объекту с тем, чтобы извлечь максимум информации при минимальном искажении объекта,
- избирательным только по отношению к измеряемой величине и нечувствительным по отношению к иным свойствам и параметрам объекта,
- стабильным во времени,
- нечувствительным к внешним мешающим факторам: климатическим, механическим и другим.

Сигнал измеряемой величины, воздействующий на чувствительный элемент измерительного инструмента, порождает реакцию этого инструмента в виде сигнала измерительной информации, который должен быть связан с сигналом измеряемой величины взаимнооднозначной стабильной функциональной зависимостью.

Сигнал измерительной информации, который получается в результате взаимодействия чувствительной части измерительного инструмента с объектом, обычно подвергается преобразованиям, таким, как фильтрация, усиление, ослабление, нелинейному преобразованию, преобразованию в цифровой код с целью получения сигнала, пригодного для дальнейшей математической обработки. Все эти преобразования должны быть взаимнооднозначными, стабильными во времени, не зависящими от действия внешних мешающих факторов.

Последующая математическая обработка имеет целью приведение сигнала измерительной информации к единицам измеряемой величины и к такому размеру, чтобы обеспечить уверенное сопоставление со шкалой измеряемой величины. Эта шкала формируется благодаря выполнению спе-



циальной метрологической процедуры, связывающей ее с государственным эталоном, который хранит единицу измеряемой величины.

Обязательным заключительным этапом измерения является формирование и представление результата измерения и характеристик  $\Delta_x$  погрешности этого результата, то есть характеристик остаточной неопределенности значения измеряемой величины.

Этапы выполнения процедуры косвенных измерений представлены на рис. 6. От процедуры прямых измерений они отличаются добавлением



Рис. 6. Этапы косвенных измерений

этапа вычисления результата косвенного измерения  $\tilde{w} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k)$ , где  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k$  - результаты прямых измерений. Понятно, что здесь перед планированием и выполнением измерений важно составить более подробную модель объекта измерений потому, что она должна содержать те самые соотношения между параметрами объекта, которые будут использоваться на этапе вычисления результатов косвенных измерений. И здесь в обязательном порядке результат измерения должен сопровождаться оценкой характеристики погрешности  $\Delta_w$ .

Для иллюстрации описанных этапов измерительных технологий ниже будет приведен простейший пример, в котором попутно показаны состав и источники погрешностей результатов измерений. Поэтому соответствующая схема есть метрологическая структурная схема измерений.

### 1.5. Примеры взаимодействия средств измерений

## с объектом измерений

Объект измерения – электрическая цепь. Измерению подлежит параметр этой цепи, а именно, постоянное напряжение на ее участке, сопротивление которого равно  $R_H$  (см. рис. 7 а). Эквивалентное сопротивление остальной части цепи равно  $R_{\text{ц}}$ . Истинное значение измеряемого напряжения, которое было на сопротивлении  $R_H$  до подключения вольтметра, равно  $U_x$ . Средство измерений – стрелочный вольтметр, собственное сопротивление которого указано в его технической документации.

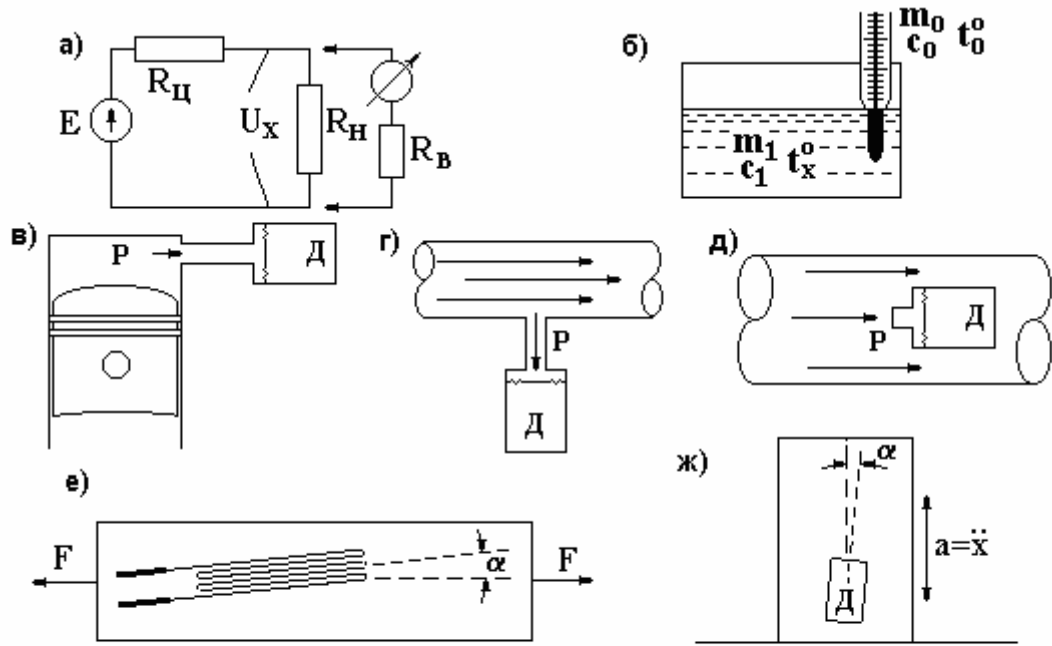


Рис. 7. Примеры взаимодействия средств измерений с объектом измерений

Для расчета эффекта, производимого взаимодействием, будем считать, что инструментальная погрешность вольтметра равна нулю.

$$U_x = E \frac{R}{R + R_{\text{в}}}, \quad \tilde{U} = E \frac{R_H R_{\text{в}}}{R_H R_{\text{в}} + R_H R_{\text{ц}} + R_{\text{в}} R_{\text{ц}}},$$

$$\Delta U = \tilde{U} - U_x = -E \frac{R_H^2 R_{\text{ц}}}{(R_H R_{\text{в}} + R_H R_{\text{ц}} + R_{\text{в}} R_{\text{ц}})(R_H + R_{\text{ц}})}.$$

В этих формулах  $\tilde{U}$  - напряжение, которое образуется после подключения вольтметра и оказывается меньше исходного истинного напряжения

в силу шунтирования этого участка цепи сопротивлением вольтметра. Общий ток в цепи увеличивается на значение тока, потребляемого вольтметром, и тем самым объект измерений изменяется. В результате этого влияния возникает систематическая погрешность, обозначенная здесь через  $\Delta U$ . По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{\tilde{U}} = -\frac{R_H \cdot R_{Ц}}{(R_H + R_{Ц})} \cdot \frac{I}{R_B}.$$

Умножив числитель и знаменатель полученного выражения на  $(\tilde{U}^2)$ , увидим, что относительная погрешность, вызванная взаимодействием вольтметра и цепи, равна отношению энергий, то есть частному от деления энергии, потребляемой вольтметром, на энергию, рассеиваемую объектом:

$$\gamma_U = -\frac{R_H \cdot R_{Ц}}{(R_H + R_{Ц})} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_B} = -\frac{(\tilde{U})^2}{R_B} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_{ЦВ}},$$

где  $R_{ЦВ}$  – сопротивление, “видимое” со стороны вольтметра и равное сопротивлению, образованному параллельным соединением сопротивления нагрузки  $R_H$  и сопротивления цепи  $R_{Ц}$ .

В данном случае эта погрешность может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Остаточная погрешность будет определяться точностью, с которой известны значения величин, входящих в выражение для  $\Delta U$ .

В соответствии с определением, приведенным в разд.1.3, сопротивление вольтметра  $R_B$  есть одна из его метрологических характеристик, поскольку оказывает влияние на погрешность результата измерений.

Объект измерения – перемешиваемая жидкость в сосуде (рис. 7 б). Измерению подлежит параметр объекта: температура жидкости. Масса жидкости  $m_1$ , удельная теплоемкость  $c_1$ , истинная температура  $t_x^o$ . Средство измерений – ртутный термометр, который будем считать абсолютно точным. Его масса  $m_o$ , удельная теплоемкость погружаемой части  $c_o$ . Собственная температура термометра до его погружения в жидкость равна  $t_o^o$ ,

ее значение может быть считано со шкалы. Считаем, что теплообмена с внешней средой нет.

В таком случае общее количество теплоты сохраняется неизменным, и уравнение теплового баланса имеет вид:

$$t_o^o m_o c_o + t_x^o m_l c_l = \tilde{t}^o (m_o c_o + m_l c_l),$$

где  $\tilde{t}^o$  – результат измерения установившейся температуры жидкости, а, следовательно, и погружаемой части термометра.

Понятно, что если температура термометра была ниже истинной температуры жидкости, температура жидкости снизится и наоборот поднимется в противном случае. В результате такого взаимодействия термометра с объектом (жидкостью) возникает систематическая погрешность

$$\Delta t^o = \tilde{t}^o - t_x^o = - \frac{m_o c_o}{m_o c_o + m_l c_l} (t_x^o - t_o^o).$$

По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_t = \frac{\Delta t^o}{\tilde{t}^o} = - \frac{m_o c_o (t_x^o - t_o^o)}{t_o^o m_o c_o + t_x^o m_l c_l} = - \frac{Q_{TE PM}}{Q_{\Sigma}},$$

то есть относительная погрешность измерения температуры, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом, равна частному от деления количества теплоты (то есть энергии), необходимой для нагревания (или охлаждения) термометра до измеряемой температуры, на количество общей теплоты, содержащейся в объекте и термометре.

В данном случае эта погрешность систематическая и может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Неисключенный остаток погрешности будет определяться точностью, с которой известны величины, входящие в формулу для  $\Delta t^o$ .

В соответствии с определением, приведенным в разд. 1.3, масса и теплоемкость погружаемой части ртутного термометра являются его метрологическими характеристиками, поскольку оказывают влияние на погрешность результата измерений.

Объект измерения – цилиндр двигателя внутреннего сгорания (рис. 7 в). Параметр, подлежащий измерению, – давление газов внутри цилиндра. Присоединение датчика Д с помощью трубки приводит к увеличению

объема камеры сгорания и тем самым – к уменьшению давления, поскольку произведение давления на объем должно быть примерно постоянным. Это означает, что объект изменился. Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической.

Объект измерения – трубопровод с потоком жидкости или газа (рис. 7 г, д). Параметр, подлежащий измерению – давление транспортируемого вещества. В одном случае (рис. 7 г) погрешность, вызванная нежелательным взаимодействием, будет отрицательной, в другом (рис. 7 д) - положительной.

Объект измерения – механическая конструкция. Параметр, подлежащий измерению – деформация участка конструкции. Средство измерений (датчик) – проволочный тензорезистор. Принцип действия – изменение сопротивления проволоки, из которой изготовлен датчик, при его деформации в пределах упругости. Для передачи деформации от объекта к датчику он приклеивается к объекту специальным неэластичным клеем (рис. 7 е). Погрешность от взаимодействия будет вызвана следующими обстоятельствами:

- неудовлетворительным качеством приклеивания датчика,
- увеличением жесткости объекта за счет приклеивания к нему датчика,
- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемой деформации.

Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической, отрицательной.

Объект измерения – транспортное средство, механическая конструкция, строительное сооружение. Параметр, подлежащий измерению – ускорение вибраций в заданной точке. Средство измерений – датчик ускорения, жестко устанавливаемый на объекте (рис. 7 ж). Погрешность будет вызвана следующими обстоятельствами:

- недостаточная жесткость крепления датчика к объекту, вследствие чего ускорение виброперемещений объекта не передается к датчику,
- увеличением массы объекта на величину массы датчика, вследствие чего изменяется частота собственных колебаний объекта и амплитуда виброускорений,

- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемых ускорений.

Для ограничения разброса жесткости крепления датчика ускорений к объекту в технической документации на подобные датчики должно сообщаться значение усилия завинчивания крепящих винтов (при винтовом креплении). Обеспечение заданного усилия крепления датчика осуществляется за счет применения динамометра либо ключей, снабженных устройством дозирования усилия.

Для оценки степени влияния массы датчика на объект измерений в технической документации должно быть приведено значение массы датчика с указанием пределов допускаемых отклонений от номинального значения, как одной из метрологических характеристик, обуславливающих степень взаимодействия с объектом и соответствующую погрешность.

### **1.6. Классификация погрешностей средств измерений и результатов измерений**

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

Признак – происхождение:

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

Признак – условия эксплуатации :

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

Признак – характер зависимости от измеряемой величины:

- мультипликативная, пропорциональная измеряемой величине,
- аддитивная – не зависит от измеряемой величины.

Признак – характер проявления:

- систематическая погрешность,
- случайная погрешность.

Признак – режим измерения:

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

Признак – способ представления:

- абсолютные погрешности,
- относительные погрешности,
- приведенные погрешности (fiducial errors), которые представляют собой отношение абсолютной погрешности к некоторому *нормирующему значению* измеряемой величины  $x_{нрм}$ .

В качестве нормирующего значения могут быть использованы:

- максимальное значение  $x_{max}$  измеряемой величины в диапазоне измерения  $x_{нрм} = x_{max}$ ,
- ширина диапазона измеряемой величины  $x_{нрм} = |x_{max} - x_{min}|$ .

Для обеспечения единства измерений и взаимного доверия к результатам измерений инструментальные погрешности средств измерений *должны нормироваться*, то есть для этих погрешностей при любом способе их представления (в виде абсолютных, относительных или приведенных) должны быть установлены нормы, при превышении которых средства измерений не могут применяться по своему назначению. В большинстве случаев нормы устанавливаются на относительные и приведенные основные инструментальные погрешности в виде пределов допускаемых значений их характеристик. Эти установленные нормы входят в состав *метрологических характеристик* средств измерений (см. разд. 1.3) и подлежат периодическому контролю в испытательных подразделениях метрологической службы России.

Полный перечень метрологических характеристик средств измерений, подлежащих нормированию, их определение, подход к выбору номенклатуры характеристик применительно к конкретному типу средств измерений, способы установления норм на них и примеры применения приведен в стандарте ГОСТ 8.009-84 “Государственная система обеспечения единст-

ва измерений. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений”.

### 1.7. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме. Средства измерений линейные

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

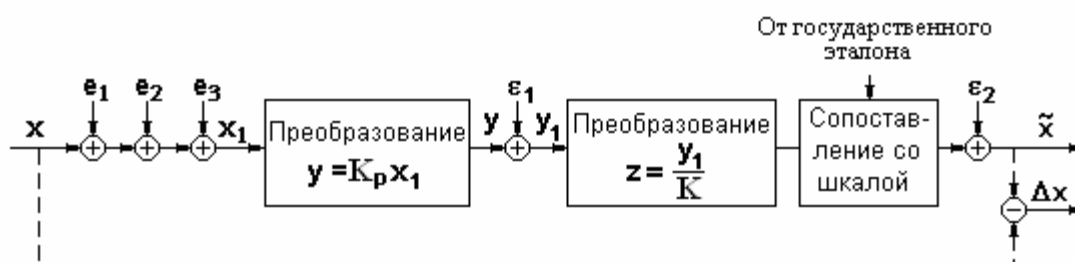


Рис. 8. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме

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

На рис. 8 обозначено:

$x$  – истинное значение измеряемой величины,

$e_1$  – погрешность, вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям,

$e_2$  – погрешность, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом (см. разд. 1.5) ,

$e_3$  – погрешность, вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами,

$K_p$  – реальный фактический коэффициент преобразования конкретного экземпляра средства измерения,

$K$  – номинальный коэффициент преобразования, декларированный для средств измерений данного типа,



$\varepsilon_1$  – собственная погрешность преобразования средства измерения, вызванная дрейфом выходного сигнала преобразователя, собственными тепловыми шумами и помехами,

$\varepsilon_2$  – погрешность, состоящая из погрешности деления на номинальный коэффициент преобразования, из погрешности воспроизведения шкалы и погрешности сопоставления со шкалой, в том числе это погрешности округления, выполняемого оператором при отсчете показаний аналогового прибора или вызванного конечной разрядностью цифрового прибора или аналого-цифрового преобразователя,

$\tilde{x}$  – результат прямого измерения величины  $x$ ,

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

Различие между коэффициентами  $K_p$  и  $K$ , вызвано неточностью воспроизведения номинального коэффициента  $K$  из-за погрешностей изготовления и старения комплектующих изделий, из-за воздействия внешних влияющих факторов, а также из-за разброса на множестве экземпляров средств измерений. Разность между этими коэффициентами обозначим  $\Delta K = K_p - K$ . Такая разность случайна на множестве экземпляров средств измерений одного типа, и в целях обеспечения надлежащего метрологического качества должна быть ограничена пределами допускаемых различий  $(-\Delta_K, +\Delta_K)$  между этими коэффициентами для всех значений измеряемой величины из диапазона измерения:

$$|K_p - K| \leq \Delta_K. \quad (2)$$

Неравенство (2) ограничивает область, в которой должны находиться значения коэффициентов преобразования всех средств измерений, признаваемых пригодными к применению.

Для удобства дальнейших рассуждений обозначим

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

и назовем эту погрешность *погрешностью применения*.

Тогда, используя схему, представленную на рис. 8, запишем выражение для абсолютной погрешности результата прямого измерения, выполняемого подобным средством:

$$\Delta x = \frac{1}{K} (K_p (x + e) + \varepsilon_1) + \varepsilon_2 - x$$

и перегруппируем слагаемые:

$$\Delta x = \frac{1}{K} (K_p - 1)x + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + K_p e = \frac{\Delta K}{K} x + \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 + K_p e. \quad (3)$$

Первые три слагаемых, находящиеся в правой части равенства (3), порождены собственными свойствами средства измерений, поэтому сумма

$$\frac{\Delta K}{K} x + \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \quad (4)$$

называется *инструментальной составляющей абсолютной погрешности* или *инструментальной погрешностью*. При выпуске средства измерений из производства, при его транспортировании, хранении и эксплуатации инструментальная погрешность (4) не должна превышать (может быть, с некоторой вероятностью) некоторого заранее установленного значения, то есть нормы  $\Delta_x$ . Значение нормы  $\Delta_x$  погрешности  $\Delta_{\text{инст}} x$ , устанавливается при проектировании средства измерений и сообщается пользователю в сопроводительной технической документации. Процесс установления нормы на инструментальную погрешность называется *нормированием характеристики инструментальной погрешности средства измерений*. Норма погрешности  $\Delta_x$  в соответствии с определением, приведенным в разд. 1.3, является метрологической характеристикой средства измерений. Ответственность за инструментальную погрешность несет разработчик и производитель средства измерений.

Слагаемое  $K_p e$  в правой части равенства (3) порождено причинами, возникающими при применении средства измерений, а именно взаимодействием с объектом, неадекватностью принятых математических моделей измеряемой величины и объекта, пульсациями и помехами, источником которых является объект. Это слагаемое составляет *различие между погрешностями средства измерений и погрешностями результата измерений*, и за него несут ответственность пользователи средства измерений. Поэтому в данном курсе погрешность  $e = e_1 + e_2 + e_3$  носит название *погрешности применения* средства измерений. Оценку характеристики погрешности применения для конкретных условий выполняет пользователь средства измерений. Норма на эту погрешность, как правило, не устанавливается.

Как отмечено ранее, значение погрешности результата каждого измерения не может быть определено, поэтому на практике используют оценки интервальных характеристик погрешности. Исходными данными для расчета характеристики абсолютной погрешности результата измерений в виде границ интервала неопределенности  $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$  могут быть только предельно допускаемые значения  $\Delta_K$  и  $\Delta_\varepsilon$  составляющих абсолютной инструментальной погрешности. Гарантии в отношении сохранности этих характеристик обеспечивает изготовитель средства измерений и контролирующие метрологические органы. Предельно возможные границы  $(-\Delta_e, +\Delta_e)$  погрешности  $e$  определяются пользователем в соответствии с конкретными условиями измерений.

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

$$|K_p - K| \leq \Delta_K, \quad |\varepsilon| = \left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon, \quad |e| \leq \Delta_e,$$

то на основании равенства (6) об абсолютной погрешности результата измерений можно заключить, что ее значения не должны выходить за пределы, которые определяются неравенством

$$|\Delta x| \leq \frac{\Delta_K}{K} x + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (7)$$

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

$$\Delta_x = \frac{\Delta_K}{K} x + \Delta_e + \Delta_\varepsilon,$$

$\tilde{x}$  – результат измерения.

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

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\Delta_K}{K} x + \Delta_\varepsilon. \quad (8)$$

В свою очередь инструментальная погрешность делится на *мультипликативную* и *аддитивную*. Предельной мультипликативной погрешностью является первое слагаемое в равенстве (8), которое линейно зависит

от измеряемой величины. Второе слагаемое есть предел допускаемой *аддитивной* погрешности, он не зависит от измеряемой величины и остается неизменным во всем диапазоне измерения.

В большинстве случаев нормированию подлежит относительная инструментальная погрешность, выражаемая в процентах:

$$\begin{aligned} |\gamma_{\text{инстр}}| &\leq \frac{\Delta_{\text{инстр}}}{|x|} 100\% = \left( \frac{\Delta_K}{K} + \frac{\Delta_\varepsilon}{|x|} + \frac{\Delta_\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} - \frac{\Delta_\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} \right) 100\% = \\ &= \left( \frac{\Delta_K}{K} + \frac{\Delta_\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} \right) 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} \left( \left| \frac{x_{\text{max}}}{x} \right| - 1 \right) 100\%, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $x_{\text{max}}$  – максимальное значение измеряемой величины в диапазоне измерения или верхняя граница диапазона измерения.

Введем обозначения:

$$\frac{\Delta_\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} 100\% = d, \quad \frac{\Delta_K}{K} 100\% + d = c,$$

тогда выражение (9), нормирующее относительную инструментальную погрешность линейного средства измерений примет вид:

$$|\gamma_{\text{инстр}}| \leq c + d \left( \left| \frac{x_{\text{max}}}{x} \right| - 1 \right). \quad (10)$$

Правая часть неравенства (10) называется *двучленной формулой* нормирования относительной погрешности. В стандарте ГОСТ 8.401 представлен ряд чисел, рекомендуемых для выражения значений коэффициентов двучленной формулы:

$$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; (1,6 \cdot 10^n); 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; (3 \cdot 10^n); 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n,$$

где  $n = 1, 0, -1, -2, \dots$ . Значения, указанные в скобках, не рекомендованы и используются в порядке исключения.

Возникает естественный вопрос: какие величины представляют собой коэффициенты  $c$  и  $d$  двучленной формулы?

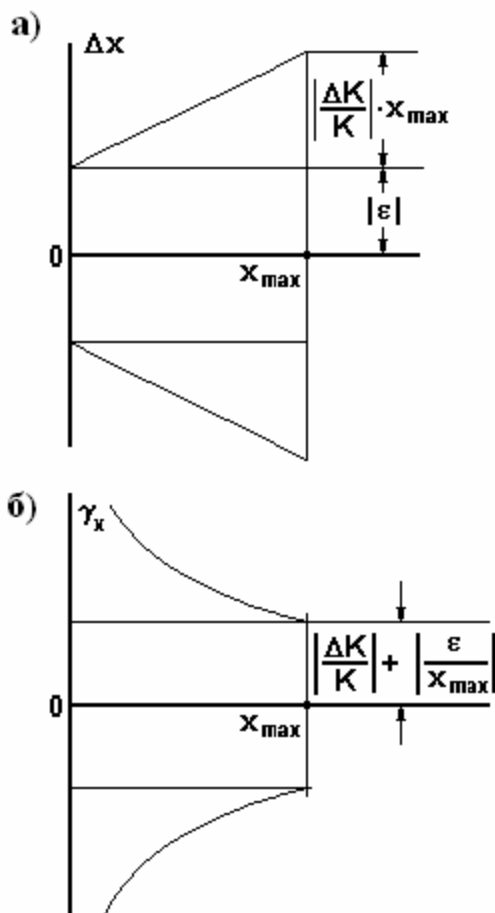


Рис. 9. Нормы на абсолютную а) и относительную б) погрешности линейных средств измерений

Обратимся к формуле (8). Из этой формулы следует, что при  $x = 0$ , то есть в начале диапазона предельно допускаемая погрешность есть  $\Delta_\varepsilon$ , а это значит, что  $d$  – это предел допускаемой погрешности в начале диапазона, приведенной к максимальному значению в диапазоне измерения. Коэффициент  $s$  получается из формулы (10) при  $x = x_{\max}$ , то есть это приведенная погрешность линейного средства измерений в конце диапазона. На рис. 9 показаны границы, внутри которых должна лежать абсолютная (рис. 9 а) и относительная (рис. 9 б) инструментальная погрешность средства измерения.

В англоязычных нормативных документах нормирование относительной погрешности линейных средств измерений осуществляется иначе. Нормы мультипликативной и аддитивной погрешности указываются по отдельности: норма на относительную

мультипликативную погрешность  $\frac{\Delta K}{K}$  (gain error), в процентах и норма на абсолютную аддитивную погрешность  $\varepsilon$  (offset error) в единицах измеряемой величины. Такое нормирование создает трудности в оценке погрешности результатов измерений.

### 1.8. Правила округления при измерениях

При измерениях, выполняемых с применением современных средств вычислительной техники, результаты измерений и их погрешности предъявляются пользователю с избыточным количеством цифр. Это обстоятельство создает чисто визуальное представление о том, что измерения выпол-

нены очень точно. Особенно ярко это проявляется при усреднении результатов многократных измерений. При этом предельная погрешность (неопределенность) измерений оценивается также с применением вычислительных средств.

Пусть, например, результат усреднения результатов измерений получен в виде  $8,352487963,$   
а оценка предельной погрешности  $0,003567825.$

Ясно, что в этом случае все цифры результата, находящиеся на третьем месте после запятой и далее, недостоверны, поскольку все они расположены внутри зоны погрешности, ограниченной первой цифрой, находящейся также на третьем месте после запятой. Поэтому результат следует округлить до того знака (разряда), в котором появилась первая значащая цифра погрешности. В данном случае это третий знак после запятой.

Погрешность бессмысленно выражать всеми значащими цифрами.

Дело в том, что погрешность оценивается приближенно сверху. В соответствии с действующей нормативной метрологической документацией погрешность выражается всего одной или, максимум, двумя значащими цифрами и должна округляться в сторону увеличения.

Поэтому в данном примере результат должен быть выражен числом  $8,352,$   
а предельная погрешность (неопределенность) этого результата – числом  $0.004.$

## **2. Аналоговые электромеханические электроизмерительные приборы.**

### **2.1 Общие характеристики, обозначения на шкале**

В нормативной и сопроводительной документации на аналоговые электроизмерительные приборы приводятся нормы, устанавливаемые на следующие метрологические характеристики:

- диапазон изменения измеряемой величины,
- предел допускаемой основной приведенной погрешности (*fiducial error*), выражается в %%,
- собственное сопротивление или импеданс (нормируется только для электроизмерительных приборов),

- предел допускаемой дополнительной погрешности, выражается в долях (обычно 0.5 или 1.0) от предела допускаемой основной приведенной погрешности и нормируется для каждой влияющей величины отдельно.

Для аналоговых измерительных приборов нормируется основная приведенная погрешность (*intrinsic fiducial error*) без разделения на мультипликативную и аддитивную составляющие.

При установлении нормы на приведенную погрешность считают, что абсолютная погрешность средства измерений неизменна, и в качестве таковой принимают наибольшее ее значение в диапазоне измерений. Это значение абсолютной погрешности  $\Delta$  приводится к некоторому условному нормирующему значению (*fiducial value*) измеряемой величины  $x_{нрм}$ , и для него во всем диапазоне изменения измеряемой величины устанавливается предел допускаемых значений

$$\left| \frac{\Delta}{x_{нрм}} \right| \cdot 100\% \leq \gamma_{прив},$$

откуда следует, что основная абсолютная погрешность средства измерений, признанного пригодным к применению, в любой точке диапазона измерений должна удовлетворять неравенству

$$|\Delta| \leq \frac{\gamma_{прив}}{100} \cdot |x_{нрм}|$$

Аналоговым измерительным приборам с непосредственным отсчетом присваивается класс точности (class index), который обозначается числом, равным пределу допускаемой основной приведенной погрешности  $\gamma_{прив}$ . Стандартом ГОСТ 8.401 “Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования” предписывается выбирать значение  $\gamma_{прив}$  из следующего ряда чисел:

$$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; (1,6 \cdot 10^n); 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; (3 \cdot 10^n); 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n,$$

где  $n = 1, 0, -1, -2, \dots$ . Значения, указанные в скобках, не рекомендованы и используются в порядке исключения. Обозначение класса точности прибора обычно изображается на шкале или лицевой панели прибора различным образом в зависимости от принятого для приборов данного типа нормирующего значения:








**1,5** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности, которая определена при нормирующем значении  $x_{нр.м} = |x|_{max}$ .

**1.5** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной относительной погрешности которая определена при нормирующем значении.




**|1,5|** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности которая определена при нормирующем значении  $x_{нр.м} = |x_{max} - x_{min}|$

Кроме класса точности на шкалах приборов наносятся следующие обозначения:







#### Обозначения системы прибора:

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

#### Обозначения вида тока (напряжения)

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

#### Другие обозначения

-  - нормальное рабочее положение прибора вертикальное (на щите),
-  - нормальное рабочее положение прибора горизонтальное,
-  - испытательное напряжение прочности изоляции 500 В,
-  - испытательное напряжение, превышающее 500 В (здесь 2 кВ),
-  - прибор не подлежит испытанию прочности изоляции,
-  - перед использованием прибора внимательно изучить инструкцию



по его эксплуатации,



- зажим не изолирован от высокого напряжения,



- зажим соединен с корпусом, не заземляется,



- зажим соединен с корпусом, заземляется.

Единственная динамическая характеристика, которую имеет смысл нормировать для аналоговых приборов, это время установления показаний, то есть время реакции, которое для всех подобных приборов устанавливается по умолчанию равным 1 с, обеспечивается конструкцией прибора и специально не указывается.

## 2.2. Приборы магнитоэлектрической системы

### 2.2.1. Общие свойства

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

Принцип действия магнитоэлектрического прибора (в дальнейшем МЭ - прибора) основан на взаимодействии проводника с током и магнитного поля. На рис. 10 представлен схематический чертеж МЭ – прибора с примером возможных надписей на его шкале. Обозначение типа отечественных приборов содержит сведения о системе (‘М’ – магнитоэлектрический) и о заводе-изготовителе (первая цифра ‘1’ – завод “Вибратор”).

Магнитное поле создается постоянным магнитом, прошедшим стабилизацию. Между полюсами магнита расположен сердечник таким образом, чтобы воздушный зазор, в котором движется рамка с обмоткой, был равномерным. В обмотку рамки через пружинки или иные упругие элементы, например, растяжки, поступает ток  $I$ , и в результате его взаимодействия с

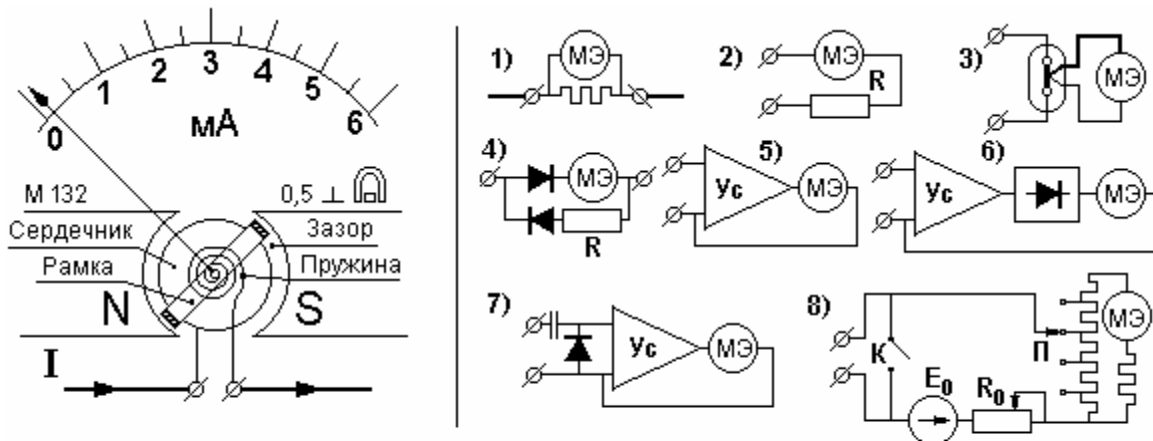


Рис. 10. Приборы магнитоэлектрической системы, принцип действия, варианты применения

постоянным магнитным полем возникает вращающий момент  $M_{BP} = B \cdot SwI$ , где  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре,  $S$  – площадь обмотки рамки,  $w$  – число витков обмотки рамки. Вращающему моменту противодействует момент, создаваемый пружинкой или растяжкой, который в пределах упругих деформаций этих элементов линейно зависит от угла поворота рамки  $\alpha$ :  $M_{np} = W \cdot \alpha$ , где  $W$  – жесткость пружинки (растяжки). В установившемся состоянии, когда  $M_{BP} = M_{np}$ ,

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

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

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

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

$$J\alpha'' + P\alpha' + W\alpha = B \cdot Sw \cdot i(t), \quad (11)$$

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

Предельно достижимые значения параметров МЭ – приборов:

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

В силу таких высоких показателей МЭ – приборы имеют широкое применение. Примеры применений 1) ÷ 8) показаны на рис. 10 справа.

### **2.2.2. Простейшие применения магнитоэлектрических приборов**

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

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

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

3) Амперметры с термопреобразователем для измерения действующего значения переменного тока в пределах от 0.005 А до 100 А (с трансформатором тока) в частотном диапазоне до  $10^8$  Гц с погрешностью от 1%. Измеряемый ток поступает в термопреобразователь, который представляет собой баллон, заполненный инертным газом и внутри него расположен проводник, нагреваемый измеряемым током, и термопары. Температура проводника определяется выделяемой в нем активной мощностью измеряемого тока, то есть действующим значением тока. До этой же температуры нагревается горячие спаи термопар. Возникающая термоЭДС в силу замкнутости цепи вызывает в ней постоянный ток, который измеряется МЭ – прибором.

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

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

5) Аналоговый омметр. На схеме показаны:

$E_0$  – внутренний источник постоянного напряжения,

П – переключатель пределов измерения,

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

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

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

### 2.2.3. Применения в составе аналоговых электронных приборов

1) Условная схема высокочувствительных электронных аналоговых амперметров и вольтметров постоянного тока и напряжения с усилителем приведена на рис 10-5). Используемые здесь усилители помимо повышения чувствительности обеспечивают благоприятные условия взаимодействия с объектом измерений за счет того, что входное сопротивление усилителя тока (для амперметра) может быть сделано пренебрежимо малым, а входное сопротивление усилителя напряжения (для вольтметра), напротив, – очень большим до  $10^7 \div 10^{14}$  Ом.

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

2) Условная схема высокочувствительных электронных амперметров и вольтметров, предназначенных для измерения параметров переменного тока и напряжения, приведена на рис. 10-6). В этих приборах, как и в предыдущих, усилитель исполняет одинаковые функции. Кроме того здесь могут быть предусмотрены частотные фильтры, обеспечивающие фильтрацию измеряемого (исследуемого) сигнала.

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

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

3) Условная схема амплитудного электронного вольтметра представлена на рис. 10-6). Показанная на рисунке входная цепь, состоящая из кон-

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

### 2.3. Приборы электродинамической системы

Принцип действия приборов электродинамической системы (в дальнейшем ЭД – приборов) и пример обозначений на шкале показаны на рис. 11.

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

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

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

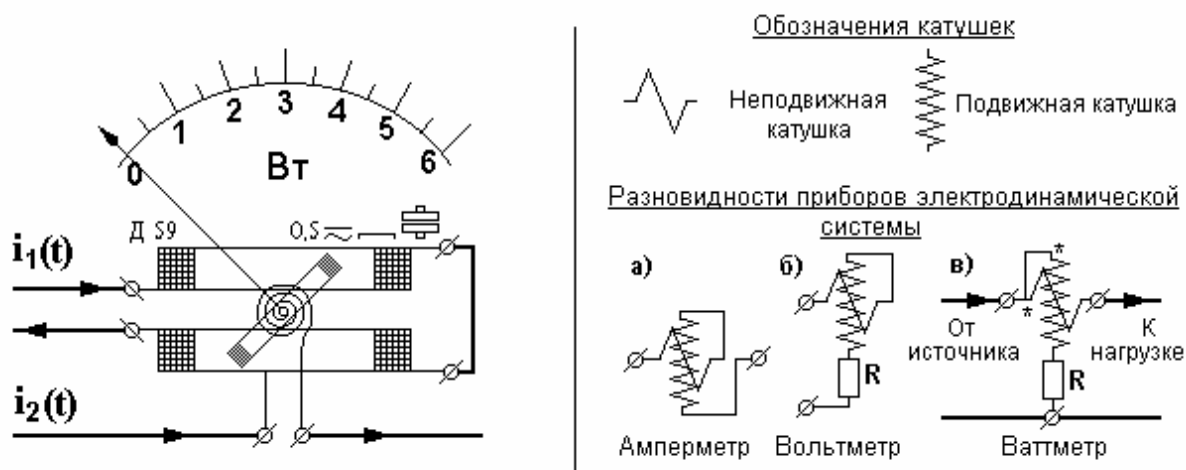


Рис. 11. Приборы электродинамической системы. Принцип действия, обозначения, варианты применения

измерения характеристик периодических сигналов, то постоянная составляющая вращающего момента записывается в виде среднего значения

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

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

На основе механизма электродинамической системы создаются амперметры, вольтметры и ваттметры (см. схемы **а**), **б**), **в**) рис. 11).

**а)** ЭД амперметр. Из схемы рис. 11 видно, что через обе катушки течет один и тот же ток, поэтому среднее значение вращающего момента пропорционально действующему значению измеряемого тока вне зависимости от формы кривой тока:

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

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

Предельные свойства ЭД амперметров.

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

- диапазон измерений – от 0,005 А и выше, с трансформатором тока - до 6 000 А,

- диапазон частот – 0; 45 ÷ 5000 Гц,

- собственное сопротивление не более нескольких Ом.

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

**б)** ЭД вольтметр. В силу отмеченных обстоятельств ЭД вольтметр используется для измерения постоянного и действующего значения перемен-

ного напряжения практически вне зависимости от формы кривой, если частоты высших гармоник кривой напряжения не выходят за пределы его частотного диапазона. Из-за большого потребляемого тока (5 мА) сопротивление ЭД вольтметра не может быть большим. Так, на пределе 50 В его сопротивление не может быть больше 10 000 Ом. Поэтому ЭД вольтметры применяются для измерений в мощных цепях, в которых шунтирующее действие их невысокого сопротивления не будет заметно сказываться на результатах измерений.

Пределные свойства ЭД вольтметров.

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

- диапазон измерений – от 5 В до 600 В, с трансформатором – до  $3 \cdot 10^4$  В.

- диапазон частот – до 5000 Гц,

- собственное сопротивление – (100 ÷ 2000) Ом.

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

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

$$\begin{aligned} \overline{M}_{em} &= \frac{K_{ЭД}}{T} \int_t^{t+T} i(t) \cdot \frac{u(t + \varphi)}{R} \cdot dt = \frac{K_{ЭД}}{R \cdot T} \int_t^{t+T} I \sin(\omega t) U \sin(\omega t + \varphi) dt = \\ &= K_{BT} \frac{UI}{2 \cdot T} \left[ \int_t^{t+T} \cos(\varphi) dt - \int_t^{t+T} \cos(2\omega t + \varphi) dt \right] = K_{BT} \cdot I_D U_D \cdot \cos \varphi. \end{aligned}$$

Первый из интегралов равен  $T \cos \varphi$ , второй равен нулю, как интеграл от периодической функции на интервале, равном двум периодам. В полученном результате обозначено:  $U, I, U_D, I_D$ , – амплитудные и действующие значения напряжения и тока напряжения,  $K_{BT}$  – постоянный коэффициент.



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

Зажимы ваттметра, помеченные звездочкой, как это показано на рис. 11 в), присоединяются к проводам, идущим от источника, и потому эти зажимы называются *генераторными*.

Предельные свойства электродинамических ваттметров.

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

## 2.4. Приборы ферродинамической системы

Назначение, схемы включения и принцип действия – те же, что и у электродинамических приборов. Как видно из рис.11, конструктивное различие заключается в том, что с целью усиления электромагнитного поля

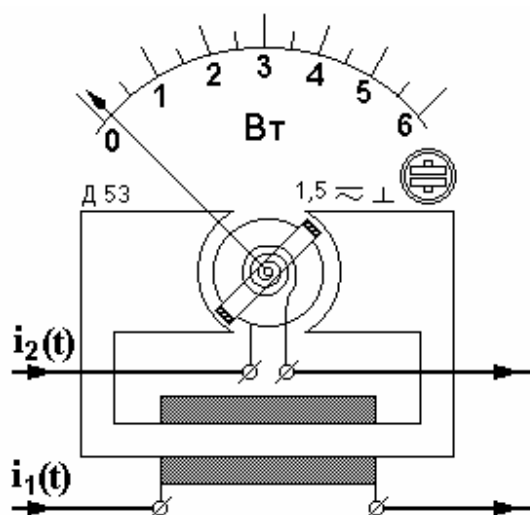


Рис. 11. К принципу действия прибора ферродинамической системы

неподвижной катушки, она снабжена магнитопроводом из листовой наборной электротехнической стали. По аналогии с МЭ – приборами, магнитопровод снабжен наконечниками и – для уменьшения магнитного сопротивления – сердечником, так что для подвижной катушки обеспечивается равномерный воздушный зазор.

За счет указанных мероприятий вращающий момент ФД – приборов существенно увеличен, а вся магнитная система оказывается экранированной

от действия внешних магнитных полей, которые могут возникать на энергоемких предприятиях, особенно в местах расположения приборных щитов. Поэтому чаще всего ФД – приборы применяются, как щитовые

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

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

Диапазоны измерений действующих значений тока, напряжения и активной мощности те же, что и у ЭД – приборов. Точность ФД – приборов ниже и не бывает лучше, чем 0,5%. Частотный диапазон 0 Гц,  $45 \div 500$  Гц. Собственное сопротивление ФД вольтметров составляет  $(100 \div 2000)$  Ом. Большое значение вращающего момента дает возможность использовать ФД механизм для построения самопишущих приборов. Для этого на стрелке устанавливается пишущий инструмент (перо, чернильница), и в прибор встраивается лентопротяжный механизм, перемещающий бумажную ленту – диаграмму.

## 2.5. Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы (в дальнейшем ЭМ – приборы) поясняется рис. 12, на котором приведены типичные надписи на шкале. Вращающий момент создается за счет того, что ток  $i(t)$ , протекающий по катушке, выполненной, как соленоид со щелевидным отверстием, создает электромагнитное поле, которое втягивает внутрь катушки фигурную пластину, изготовленную из электротехнической стали. Этот момент пропорционален квадрату силы тока и содержит поэтому постоянную и переменную составляющие. Частота первой гармоники переменной составляющей равна удвоенной частоте первой гармоники измеряемой силы тока. В силу инерционности подвижной части переменная составляющая фильтруется, и средний вращающий момент равен

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

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

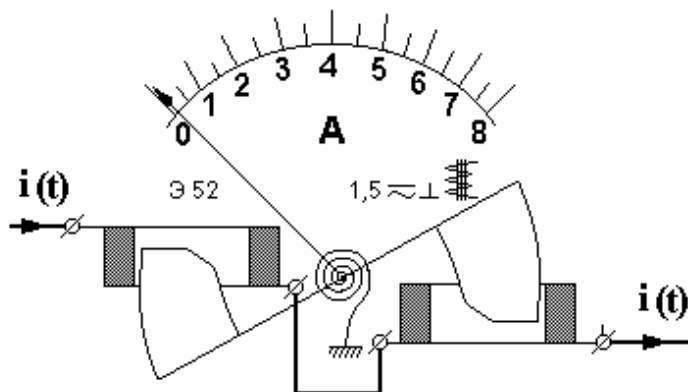


Рис. 12. К принципу действия прибора электромагнитной системы

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

На рис. 12 показан ЭМ амперметр. ЭМ вольтметр

получается присоединением к ЭМ амперметру последовательно добавочного сопротивления.

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

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

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

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

## 2.6. Приборы электростатической системы

Действие электростатического прибора (в дальнейшем ЭС – прибора) основано на использовании силы, возникающей между пластинами воздушного конденсатора, заряды на которых имеют разные знаки. Схематический чертеж ЭС – прибора представлен на рис.13. Измеряемое напряжение  $u(t)$  прикладывается к неподвижным и подвижным пластинам, которые под действием указанной силы втягиваются в пространство между неподвижными пластинами. Вращающий момент пропорционален квадрату напряжения и содержит поэтому постоянную и переменную составляющую. Частота первой гармоники переменной составляющей в два раза больше частоты первой гармоники измеряемого напряжения. В силу инерционности подвижной части переменная составляющая вращающего момента фильтруется, и подвижная часть отклоняется на угол, пропорциональный постоянной составляющей, то есть среднему значению вращающего момента:

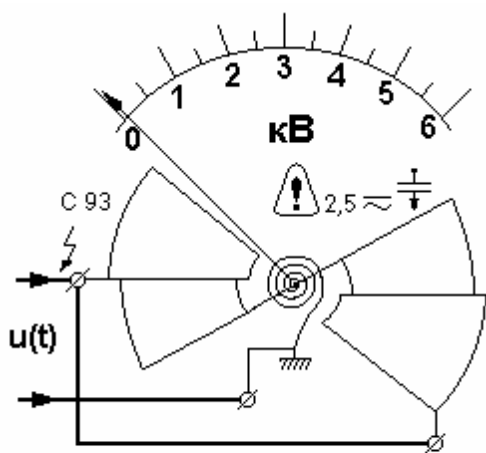


Рис. 13. К принципу действия прибора электростатической системы

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

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

Устройство и принцип действия ЭС – прибора говорят о том, что ЭС – прибором может быть

только вольтметр, обеспечивающий измерение постоянного напряжения и действующего значения переменного напряжения. ЭС – вольтметр выделяется среди вольтметров всех систем, в том числе и электронных, своим экстремально высоким сопротивлением, которое при измерении постоянного напряжения равно сопротивлению изоляции. При измерении переменного напряжения собственное сопротивление ЭС – вольтметра определяется его емкостью, не превышающей нескольких сот пикофард.

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

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

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

## 2.7. Приборы индукционной системы

Единственной разновидностью приборов индукционной системы являются счетчики активной и реактивной электрической энергии переменного тока, потребляемой нагрузкой. Устройство счетчика электрической энергии схематически представлено на рис. 14. Подвижной частью этого прибора является диск из электропроводящего материала (обычно это алюминий, как обладающий наименьшим весом). Диск вращается на оси, закрепленной в подпятниках, которые должны быть износостойчивыми и создавать минимальный и неизменный во времени момент трения. Вращающий момент создается двумя электромагнитами, расположенными по разные стороны от диска. Их расположение таково, что вихревые токи,

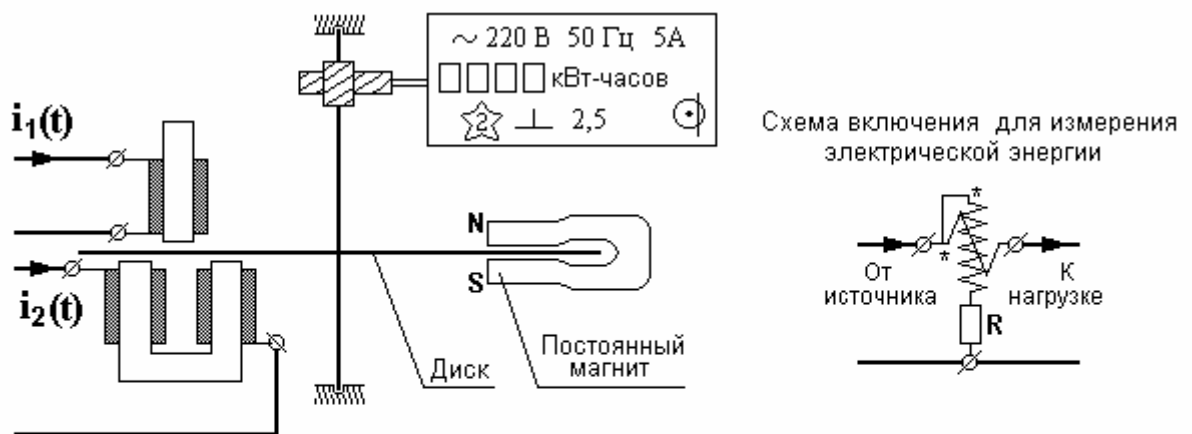


Рис. 14. Прибор индукционной системы (счетчик электрической энергии). Принцип действия, обозначения, схема включения.

создаваемые ими в диске, взаимодействуют с полями этих электромагнитов, и при этом взаимодействии возникает момент, пропорциональный произведению токов:

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

Если в одном из электромагнитов протекает ток нагрузки (назовем эту цепь по аналогии с подобной цепью ЭД ваттметра *последовательной*, см. разд. 2.3), а в другом электромагните протекает ток, пропорциональный напряжению на нагрузке, то есть  $i_2(t) = u(t) / R$  (назовем эту цепь *параллельной*, как соответствующую цепь ЭД ваттметра, см. разд. 2.3), где  $R$  – добавочное сопротивление параллельной цепи, то средний вращающий момент, как и в случае ЭД ваттметра, будет пропорционален активной мощности:

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

где  $\varphi$  - угол сдвига фазы между током и напряжением в нагрузке.

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

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

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

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

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

Отсюда, пренебрегая моментом трения, получаем:

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

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

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

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

Метрологические свойства счетчиков электрической энергии:

- бытовые счетчики предназначены для измерения электрической энергии при напряжении 220 В и токах силой 5.0 А, 10.0 А, 15.0 А, 20.0 А предел допускаемой основной относительной погрешности (то есть приведенной к текущему показанию) 2.5%,

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

Нормированием и международной унификацией свойств счетчиков электрической энергии занимается специальный комитет международной электротехнической комиссии (МЭК), поскольку результаты измерений перетоков электрической энергии через государственные границы являются основой для соответствующих расчетов и экономических санкций.

Схема включения счетчика электрической энергии точно такая, как схема включения ваттметра (сравнить рис. 11 в и схему рис. 14). Так же, как у ваттметра, генераторные зажимы счетчика обозначены звездочкой. После присоединения счетчика к электрической цепи корпус счетчика и

все присоединительные зажимы пломбируются во избежание экономических злоупотреблений.

В настоящее время начался выпуск доступных двухтарифных электронных счетчиков электрической энергии. Переключение тарифов выполняется сигналами по проводам электрической сети.

## **2.8. Средства расширения пределов измерения и правила выбора подходящего предела**

### **2.8.1. Типичные способы и средства расширения пределов измерений**

Расширение пределов измерения приборов - это важная технико - экономическая задача, целью которой является уменьшение объема приборного парка предприятия без ущерба для метрологического обеспечения испытаний изделий и управления технологическими процессами. При наличии средств расширения пределов измерения оказывается возможным применять один и тот же обычно дорогостоящий прибор для измерения величин различного размера.

В качестве внешних средств расширения пределов измерения используются:

- шунты – для расширения пределов измерения силы тока в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности, применяются на постоянном и переменном токе,

- делители напряжения и добавочные резисторы – для расширения пределов измерения напряжения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности, применяются на постоянном и переменном напряжении,

- усилители тока и напряжения – для расширения пределов измерения тока или напряжения в сторону уменьшения максимального значения измеряемой величины, то есть для увеличения чувствительности, применяются на постоянном и переменном токе и напряжении,

- измерительные трансформаторы тока и напряжения – могут применяться для расширения пределов измерения тока или напряжения в обе стороны, но чаще всего применяются для расширения пределов измерения



в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности.

Конкретные метрологические характеристики каждого из видов средств расширения пределов перечислены в соответствующих разделах.

### 2.8.2. Шунты

Схема соединения однопредельного амперметра с шунтом показана на

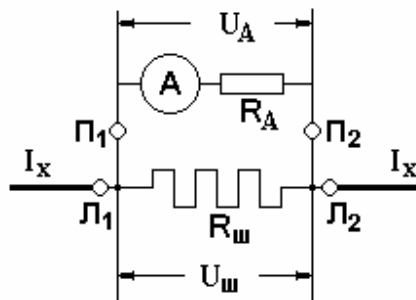


Рис. 15. Соединение амперметра с шунтом

рис. 15. Шунт имеет четыре зажима.

Пара зажимов  $L_1, L_2$  называются *токовыми зажимами*, к ним подключается линия с измеряемым током. Два других зажима  $П_1, П_2$  – *потенциальные*, к ним подключается амперметр, собственное сопротивление которого показано на рисунке и обозначено через  $R_A$ . Потенциальные зажимы жест-

ко соединены с определенными точками шунта путем сварки или другими методами, обеспечивающими высокую стабильность расположения этих точек и пренебрежимо малое и стабильное переходное сопротивление от этих точек к потенциальным зажимам.

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

Пусть  $I_A$  – ток полного отклонения стрелки, соответствующий верхнему пределу диапазона измерения амперметра А, а  $U_A$  – падение напряжения на сопротивлении амперметра при этом токе:  $U_A = I_A R_A$ .

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

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

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

Всегда  $K > 1$ .

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

### 2.8.3. Добавочные резисторы

Для расширения пределов измерения напряжения могут использоваться делители напряжения и добавочные резисторы. Однако, из-за того, что делитель напряжения должен потреблять от объекта ток, превышающий ток собственного потребления вольтметра, на практике для расширения пределов измерения вольтметров применяют добавочные резисторы. Исключение составляет только электростатический вольтметр, который практически не потребляет ток, и с ним могут использоваться делители напряжения, составленные из активных резисторов или конденсаторов.

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

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

где  $I_{Bmax}$  – ток полного отклонения стрелки вольтметра.

Поэтому коэффициент расширения предела измерения равен:

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

Всегда  $K > 1$ .

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

- по коэффициенту расширения предела измерения  $R_D = R_B (K - 1)$ ,

- по максимально допустимому току через  $R_D$ , который не должен быть больше, чем  $I_{Bmax}$ , и при этом сопротивление  $R_D$  не должно перегреваться этим током,

- по характеристикам инструментальной погрешности созданного таким образом нового вольтметра, которая будет складываться из собственной погрешности вольтметра и погрешности сопротивления добавочного резистора, в том числе, возникающей в результате перегрева протекающим по нему током.

#### 2.8.4. Измерительные трансформаторы тока

Применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного тока. Измерительные трансформаторы тока имеют существенное преимущество перед шунтами, которое заключается в том, что при их применении отсутствует гальваническая связь между первичной обмоткой, включенной в мощную электрическую цепь объекта, и вторичной обмоткой.

Схема включения измерительного трансформатора тока в линию с измеряемым током  $I_x$  и присоединения амперметра ко вторичной обмотке представлена на рис. 16. На этом рисунке  $L_1, L_2$  - зажимы первичной обмотки трансформатора, к которым подключена линия,  $I_1, I_2$  - зажимы вторичной обмотки, к которым подключается амперметр, К - ключ, замыкающий вторичную обмотку.

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

Перед включением первичной обмотки в линию вторичная обмотка

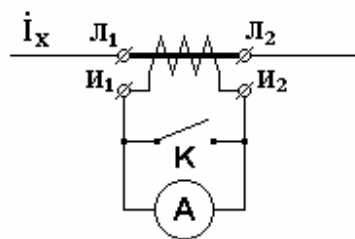


Рис. 16. К применению трансформатора тока

обязательно должна быть замкнутой накоротко ключом  $K$  или на амперметр, как показано на рис. 16. Если обмотка была замкнута ключом, то его можно разомкнуть для работы только тогда, когда включен амперметр и проверена целостность его цепи и качество контактов в местах присоединений.

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

### 2.8.5. Измерительные трансформаторы напряжения

Измерительные трансформаторы напряжения применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного напряжения. Применение измерительных трансформаторов напряжения дает те же преимущества перед применением добавочных сопротивлений, что и применение трансформаторов тока (разд. 2.8.4).

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

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

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

### 2.8.6. Правило выбора пределов измерения

При выборе пределов измерения аналоговых приборов следует иметь в виду, что из нормы, установленной на их инструментальную погрешность, как на приведенную к максимальному значению в диапазоне измерения, следует, что потребителю даются гарантии только в том, что вне зависимости от истинного значения измеряемой величины в любой точке шкалы

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

где  $\gamma_{СИ}$  - гарантированное значение основной приведенной погрешности прибора, допущенного к применению и это же - численное обозначение класса точности прибора.

Это означает, что если истинное значение измеряемой величины составляет половину от максимального, то есть показание прибора оказывается в середине шкалы, то об относительной погрешности  $\gamma_{рез}$  результата такого измерения потребитель не может предполагать ничего, кроме того, что

$$|\gamma_{рез}| = \frac{|\Delta_{инст}|}{|x|} \cdot 100\% \leq \frac{\gamma_{СИ} \cdot |x|_{max}}{|x|_{max} / 2} = 2\gamma_{СИ}.$$

Если истинное значение измеряемой величины составляет треть от верхнего предела измерений, то относительная погрешность результата оказывается втрое больше, чем объявленный класс точности. Вообще, чем ближе к началу шкалы прибора, тем больше относительная погрешность результата измерения.

В связи с этим следует руководствоваться *следующим правилом выбора предела измерений*.

Предел измерений аналогового измерительного прибора следует выбирать таким образом, чтобы показания прибора находились в последней трети его шкалы. При таком выборе возрастание относительной погрешно-

сти результатов измерений по отношению к объявленному классу точности прибора не будет превышать 1,5.

### 3. Мостовые методы измерения параметров элементов электрических цепей

Мостовые методы измерения и преобразования параметров элементов электрических цепей (сопротивления, индуктивности и емкости) широко применяются как для измерения этих параметров, так и для создания на их основе измерительных преобразователей измерительных информационных систем (ИИС).

Будут рассмотрены мосты постоянного и переменного тока, работающие в равновесном и неравновесном режимах.

#### 3.1. Мосты постоянного тока

##### 3.1.1. Мосты постоянного тока в равновесном режиме

Мосты постоянного тока, работающие в равновесном режиме (в дальнейшем – *равновесные мосты*), относятся к средствам измерения сравнения и предназначены для измерения сопротивления. Схема равновесного моста постоянного тока приведена на рис. 17 а). Этот мост называется *одинарным мостом* и предназначен для измерения сопротивлений от единиц Ом до  $10^{14}$  Ом. Для измерения малых сопротивлений от  $10^{-4}$  до 50 Ом применяется *двойной мост*, схема которого представлена на рис. 17 б).

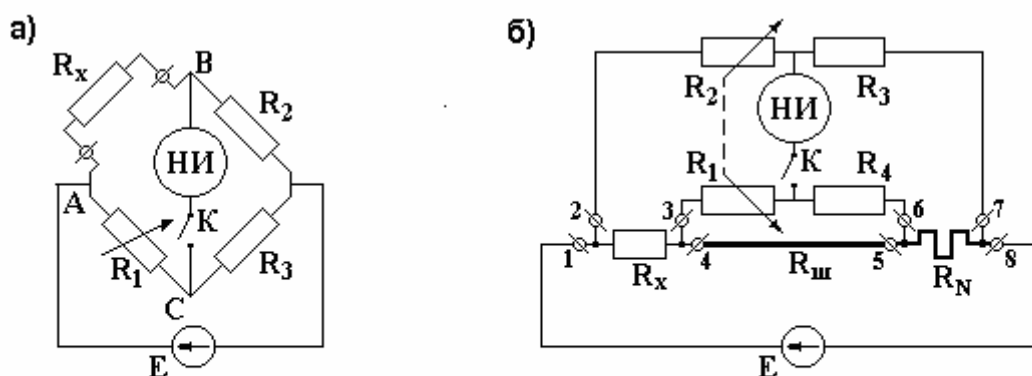


Рис. 17. Одинарный и двойной мосты постоянного тока

Рассмотрим вначале свойства одинарного моста.

Измеряемое сопротивление  $R_x$  включается в одно из плеч моста, и процесс измерения заключается в том, что изменением сопротивления, стоящего в другом плече, например, сопротивления  $R_1$ , добиваются равновесия моста, то есть такого состояния, при котором в диагонали моста ВС ток не идет. Для индикации этого состояния в диагональ ВС, называемую *измерительной диагональю*, включается высокочувствительный микроамперметр, выполняющий функцию нуль-индикатора (НИ). Ключ К предназначен для кратковременного включения нуль-индикатора в диагональ, поскольку при значительном отличии от равновесия длительное включение НИ может привести к выходу его из строя.

Равновесие моста наступит тогда, когда падения напряжений на плечах АВ и АС сравниваются, то есть, когда

$$E \frac{R_x}{R_2 + R_x} = E \frac{R_1}{R_1 + R_3},$$

где  $E$  - напряжение питания моста.

Из этого равенства следует

$$R_x(R_1 + R_3) = R_1(R_2 + R_x),$$

откуда получаем условие отсутствия тока в измерительной диагонали, то есть условие равновесия моста

$$R_x R_3 = R_1 R_2. \quad (12)$$

Значения сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$  известны, поэтому значение измеряемого сопротивления вычисляется по формуле

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}. \quad (13)$$

Обычно в серийных мостах с ручным уравниванием сопротивления  $R_2, R_3$  подбираются так, чтобы отношение  $R_2 / R_3 = 10^k$ , где  $k$  - целое число, положительное, отрицательное или 0. Тем самым обеспечивается удобство отсчитывания значения измеряемого сопротивления в десятичном коде по шкале значений регулируемого сопротивления  $R_1$ . В мостах, которые уравниваются под управлением компьютера, обеспечивается отношение  $R_2 / R_3 = 2^k$ .

Как следует из (12), (13), условия равновесия не зависят от напряжения питания моста. Но это не значит, что это напряжение может быть сколь угодно малым, поскольку при уменьшении напряжения питания уменьшается чувствительность моста, и возрастает неопределенность в определении состояния равновесия, а это, в свою очередь, приводит к росту аддитивной погрешности результата измерений. Поэтому с целью увеличения чувствительности моста следует повышать напряжение питания. Однако, при этом возрастают токи, сопротивления нагреваются этими токами, и их значения меняются, в результате чего возрастает погрешность измерений. Поэтому повышать напряжение питания можно только до уровня, при котором перегрев сопротивлений плеч не приводит к росту погрешности, вызванной этим перегревом. Кроме того чувствительность моста зависит от соотношения сопротивлений плеч. Максимальной чувствительностью обладает равноплечий мост, то есть мост, у которого значения сопротивлений плеч одинаковы.

Существенные трудности возникают при необходимости измерений малых сопротивлений, значения которых составляют единицы и доли Ом. Подобными сопротивлениями обладают мощные электрические двигатели и генераторы, трансформаторы и другие агрегаты.

Эти трудности вызваны следующими обстоятельствами:

- если измеряемое сопротивление составляет десятые и сотые доли Ом, то для того, чтобы падение напряжения на плече АВ моста достигло единиц вольт, необходимо пропустить через него ток порядка десятков и сотен ампер соответственно, но при этом сопротивление  $R_2$  также должно быть малым, ибо в противном случае на нем будет выделяться недопустимо большая мощность,

- для обеспечения приемлемой чувствительности моста необходимо, чтобы сопротивления  $R_1, R_3$  имели значения одного порядка с значениями сопротивления  $R_x$ ,

- погрешность регулировки и отсчитывания значений сопротивления  $R_1$ , равного десятым и сотым долям Ом, недопустимо велика из-за влияния нестабильного сопротивления контактов и соединительных проводов, значения которых могут даже превышать значение измеряемого сопротивления.



Поэтому для указанной цели одинарный мост непригоден, и для измерения малых сопротивлений применяется двойной мост, схема которого представлена на рис. 17 б).

Большой ток, необходимый для создания значительного напряжения на измеряемом сопротивлении, пропускается по цепи '1, 4, 5, 8'. В этой цепи включено образцовое высокоточное сопротивление  $R_N$ , значение которого сопоставимо со значением измеряемого сопротивления, и в эту же цепь последовательно включается измеряемое сопротивление  $R_x$ . Эти два сопротивления соединены толстой медной шиной с ничтожно малым сопротивлением. Контакты '1, 4, 5, 8' - токовые контакты сопротивлений, контакты '2, 3, 6, 7' - потенциальные контакты (зажимы). О цели разделения контактов на токовые и потенциальные см. разд. 2.8.2.

При достижении равновесия моста

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

Источники погрешностей измерений, выполняемых равновесными мостами:

- ограниченная чувствительность нуль-индикатора, порождает аддитивную погрешность измерений,
- погрешности в изготовлении резисторов моста, в том числе погрешность регулируемого резистора, нестабильность контактов переключателей регулируемого резистора вызывают мультипликативную погрешность измерений.

Основная погрешность равновесных мостов нормируется, как относительная погрешность.

### 3.1.2. Мосты постоянного тока в неравновесном режиме

Мосты постоянного тока, работающие в неравновесном режиме, применяются, как измерительные преобразователи сопротивления (или приращения сопротивления) в постоянный ток или в напряжение.

Принцип действия и назначение неравновесных мостов рассмотрим на двух примерах мостов, сопротивления плеч которых при равновесии одинаковы. Схемы этих мостов приведены на рис. 18. Будем также считать,

что в измерительную диагональ включено большое сопротивление нагрузки (например, сопротивление вольтметра или входное сопротивление усилителя), существенно превышающее сопротивления плеч моста:  $R_H \gg R$ .

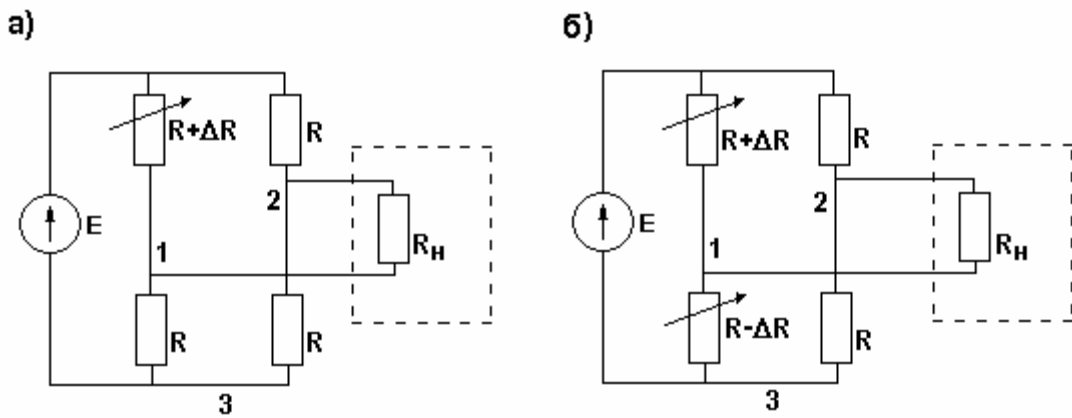


Рис. 18. Мосты постоянного тока в неравновесном режиме

В первом варианте, представленном на рис. 18 а), в одно из плеч моста включено сопротивление, приращение которого  $\Delta R$  необходимо преобразовать в соответствующее изменение напряжения. Очевидно, что при  $\Delta R = 0$  мост уравновешен, и напряжение  $U_{21}$  в его измерительной диагонали между точками 2 и 1 также равно 0. При изменении этого сопротивления напряжение в измерительной диагонали будет изменяться в соответствии с функцией преобразования:

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23} - U_{13}(\Delta R) = \frac{E}{2} - \frac{E \cdot R}{R + R + \Delta R} = E \frac{\Delta R}{4R \left(1 + \frac{\Delta R}{2R}\right)}.$$

Обозначим относительное приращение сопротивления через  $\varepsilon$ , тогда

$$U_{21}(\varepsilon) = E \frac{\varepsilon}{4 \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right)}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta R}{R}. \quad (14)$$

В ряде случаев может представиться возможность дифференциального включения изменяющихся сопротивлений в разные плечи моста, как это показано на рис. 18 б). При таком включении чувствительность моста удваивается, и функция преобразования имеет вид:

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23}(\Delta R) - U_{13}(\Delta R) = \frac{E \cdot R}{2R} - \frac{E \cdot (R - \Delta R)}{2R} = E \frac{\Delta R}{2R}.$$

В этом случае функция преобразования относительного приращения сопротивления в напряжение линейна:

$$U_{21}(\varepsilon) = \frac{E}{2} \cdot \varepsilon. \quad (15)$$

Из выражений для функций преобразования (14) и (15) видно, что:

- неравновесный мост может применяться в качестве измерительного преобразователя приращения сопротивления в напряжение,
- в общем случае функция преобразования не является линейной,
- погрешность преобразования порождается нестабильностью напряжения питания моста, а также погрешностью изготовления и нестабильностью сопротивлений плеч.

Для тензорезистивных мостов, функция преобразования которых линейна, нормируется относительная погрешность двучленной формулой. Если нелинейность неравновесного моста проявляется значительно, то для такого моста нормируется основная приведенная погрешность.

## 3.2. Мосты переменного тока

### 3.2.1. Условия равновесия мостов переменного тока

Мосты переменного тока предназначены для измерения комплексных сопротивлений элементов электрических цепей. Поэтому напряжение питания этих мостов – переменное, а плечи моста суть комплексные сопротивления, как это показано на рис. 19 а). На рис. 19 б) и в) показаны схемы мостов частного вида, предназначенных для измерения емкости конденсатора (рис. 19 б) и индуктивности катушки (рис. 19 в).

Условие равновесия мостов переменного тока выводится по аналогии с выводом условия равновесия мостов постоянного тока (разд. 2.1.1) и в конечном итоге выражается равенством

$$Z_x Z_3 = Z_1 Z_2, \quad (16)$$

где  $Z_x$  – измеряемое комплексное сопротивление (импеданс),  $Z_1, Z_2, Z_3$  - комплексные сопротивления – плечи моста.

Применяя экспоненциальное представление комплексных чисел, перепишем это условие в виде:

$$|Z_x| e^{j\varphi_x} \cdot |Z_3| e^{j\varphi_3} = |Z_1| e^{j\varphi_1} \cdot |Z_2| e^{j\varphi_2}.$$

По признаку равенства комплексных чисел, этому равенству соответствует система двух равенств

$$\begin{cases} |Z_x| \cdot |Z_3| = |Z_1| \cdot |Z_2| \\ \varphi_x + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 \end{cases} \quad (17)$$

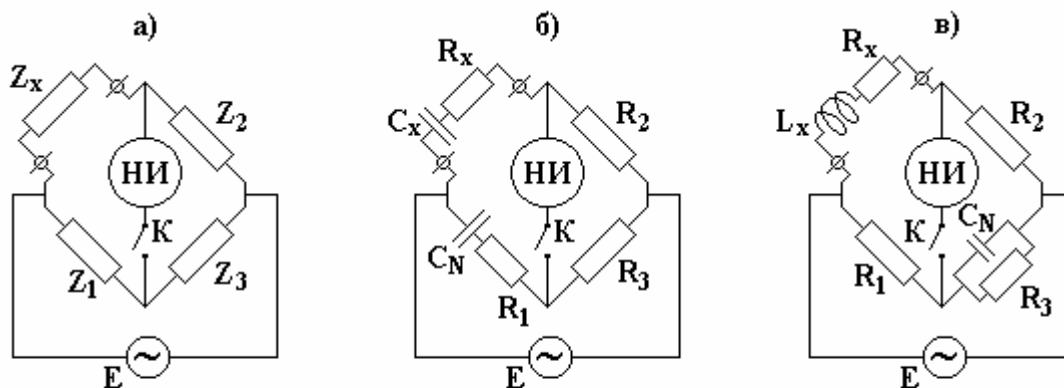


Рис. 19. Мосты переменного тока

Это означает, что уравновешивать мост переменного тока необходимо по двум компонентам: по модулю и фазе. Для контроля состояния равновесия моста необходимо применять фазочувствительный нуль-индикатор, который позволяет фиксировать не только изменения амплитуды тока в измерительной диагонали, но и инверсию фазы этого тока, происходящую при переходе через положение равновесия.

### 3.2.2. Мост переменного тока для измерения емкости конденсатора

При измерении емкости конденсатора необходимо иметь в виду, что любой конденсатор не является идеальным, его сопротивление переменному току является комплексным из-за потерь активной мощности, возникающей в силу несовершенства изоляции, находящейся между пластинами. В связи с этим, а также в соответствии с общей процедурой подготовки и проведения измерений необходимо вначале сформировать математическую модель объекта измерений, в данном случае – конденсатора, как объекта, обладающего комплексным сопротивлением переменному току.

Такая математическая модель в электротехнике называется схемой замещения. В зависимости от размера потерь активной мощности на практике используется одна из двух схем замещения: для конденсаторов с малы-

ми потерями – схема рис. 20 а), для конденсатора с большими потерями – схема рис. 20 б).

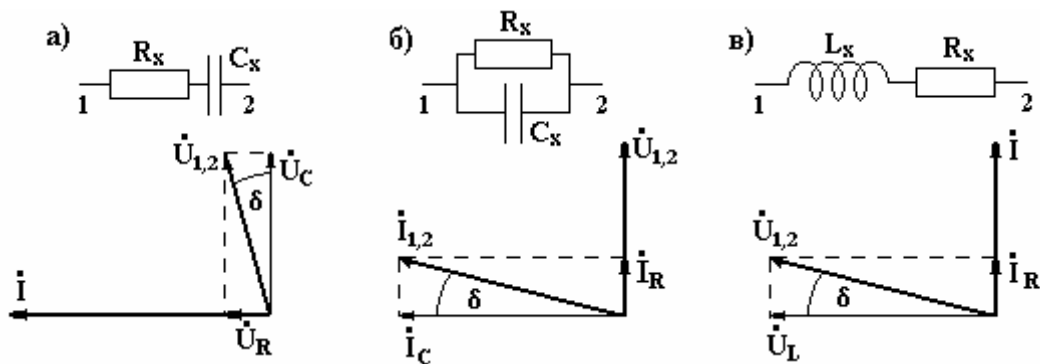


Рис. 20. Схемы замещения реального конденсатора и индуктивности

Сопротивление  $R_x$  в этих схемах называется *сопротивлением потерь*. В разных схемах замещения реального конденсатора сопротивление потерь и значение емкости будут различаться. В качестве показателя активных потерь конденсатора, не зависящего от схемы замещения, используется тангенс угла  $\delta$ . Этот угол есть отличие от  $90^\circ$  угла сдвига фазы между векторами тока и напряжения, вносимого реальным конденсатором,

Пример схемы моста, предназначенного для измерения параметров схемы замещения конденсатора с малыми потерями, приведен на рис. 19 б). В этой схеме в одно из плеч моста включен конденсатор  $C_N$ , емкость которого известна с высокой точностью. Погрешность, с которой известна емкость  $C_N$ , и его потери пренебрежимо малы.

Для вывода условий равновесия моста воспользуемся формулой (16):

$$\left( R_x + \frac{I}{j\omega C_x} \right) \cdot R_3 = \left( R_1 + \frac{I}{j\omega C_N} \right) \cdot R_2,$$

откуда, по признаку равенства комплексных чисел, следует:

$$R_x R_3 = R_2 R_1, \quad \frac{R_3}{C_x} = \frac{R_2}{C_N},$$

и, наконец, при достижении равновесия результаты измерений вычисляются по формулам

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}, \quad C_x = C_N \frac{R_3}{R_2}. \quad (12)$$

Привлекательным свойством такого моста является возможность его уравнивания по обеим составляющим с помощью активных сопротивлений. В качестве одного из регулируемых сопротивлений следует, бесспорно, выбрать  $R_1$ , а в качестве другого –  $R_2$  или  $R_3$ .

Источники погрешностей измерений с помощью равновесных мостов переменного тока приведены ниже в следующем пункте.

### 3.2.3. Мост переменного тока для измерения индуктивности катушки

Математической моделью катушки, как объекта, обладающего комплексным сопротивлением переменному электрическому току, является схема замещения, приведенная на рис. 20 в). Сопротивлением потерь здесь является активное сопротивление провода, которым намотана катушка.

Пример схемы моста для измерения параметров схемы замещения катушки индуктивности приведен на рис. 19 в).

Для вывода условий равновесия моста воспользуемся формулой (16):

$$(R_x + j\omega L_x) \cdot \left( \frac{R_3}{1 + j\omega R_3 C_N} \right) = R_1 \cdot R_2.$$

После приведения к общему знаменателю получим:

$$R_3 \cdot (R_x + j\omega L_x) = R_1 \cdot R_2 \cdot (1 + j\omega R_3 C_N),$$

откуда, по признаку равенства комплексных чисел, следует:

$$R_x R_3 = R_2 R_1, \quad \omega \cdot L_x = \omega \cdot R_1 R_2 C_N,$$

и, наконец, при достижении равновесия результаты измерений вычисляются по формулам

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}, \quad L_x = R_1 R_2 C_N. \quad (18)$$

Привлекательным свойством такого моста является возможность его уравнивания по обеим составляющим с помощью активных сопротивлений. В качестве одного из регулируемых сопротивлений следует, бесспорно, выбрать  $R_1$ , а в качестве другого –  $R_2$ .

Источники погрешностей измерений, выполняемых равновесными мостами переменного тока:

- ограниченная чувствительность нуль-индикатора, порождает аддитивную погрешность измерений,

- погрешности в изготовлении резисторов моста, в том числе погрешность регулируемого резистора, погрешность изготовления конденсатора  $C_N$ , отличие от нуля его сопротивления потерь, нестабильность контактов переключателей регулируемого резистора вызывают мультипликативную погрешность измерений.

## 4. Цифровые средства измерений

### 4.1. Цифроаналоговые преобразователи

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

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

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

Современные ЦАП с управлением от ЭВМ (процессора) преобразуют в аналоговую величину (напряжение, силу тока, сопротивление, емкость и т.д.) двоичные числа. Упрощенная схема преобразователя кода в напряжение представлена на рис. 21. Напряжение на выходе этого ЦАП равно

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

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

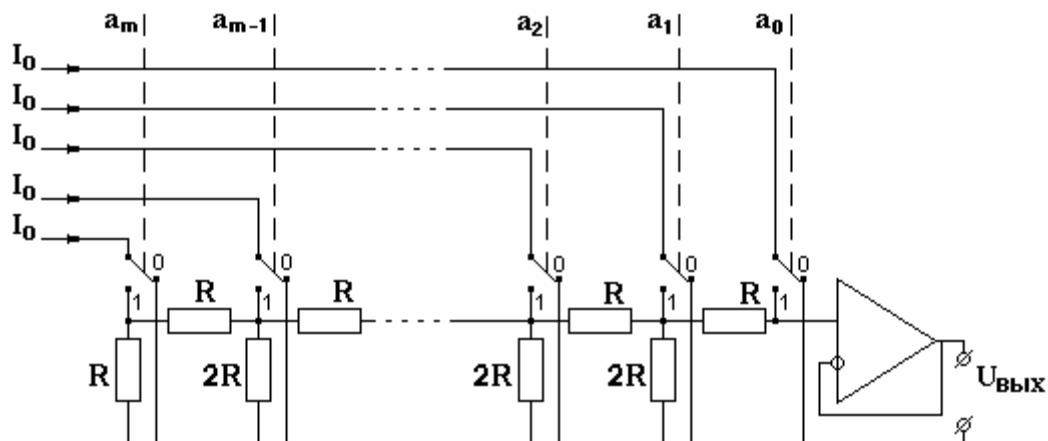


Рис. 21. К принципу действия цифроаналогового преобразователя

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

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

Конструктивно ЦАП может быть оформлен в виде одной микросхемы, которая в минимальном составе может не содержать средств стабилизации питания и тока  $I_0$ . Такой ЦАП не дает возможности нормировать метрологические характеристики, а потому подобные микросхемы не могут выполнять функции средства измерений. ЦАП получает право считаться средством измерений, если он содержит в своем составе такой обязательный элемент, как стабилизированный источник опорного напряжения и стабилизаторы токов  $I_0$ . Помимо этого в каждом ЦАП, предназначенном для совместной работы с компьютером (процессором) должно быть предусмотрено устройство интерфейсного сопряжения с компьютером и устройство гальванического разделения по цифровому входу, как это схематически представлено на рис. 22.



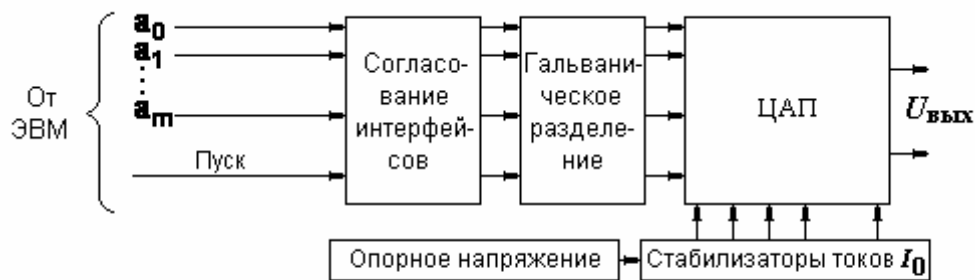


Рис. 22. Состав ЦАП, сопрягаемого с компьютером

Источниками погрешности ЦАП являются: неточность изготовления сопротивлений, нестабильность тока  $I_0$  и нестабильность напряжения питания. Кроме того при переключениях ключей возникают переходные процессы, и на время затухания этих процессов требуется задержка между моментом подачи входного кода и моментом считывания значения выходного сигнала.

В редких случаях для контроля работы ЦАП может быть предусмотрена индикация входных кодов.

Применение ЦАП:

- при построении аналого-цифровых преобразователей;
- при построении калибраторов постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления, силы тока, емкости, индуктивности и др.;
- при построении систем регулирования и моделирования;
- в качестве элементов настройки и регулировки;
- в технике воспроизведения цифровой записи звука и изображения.

Некоторые ЦАП могут применяться в качестве умножающего устройства для перемножения значения силы тока  $I_0$  на входную кодовую комбинацию.

## 4.2. Аналого - цифровые преобразователи

### 4.2.1. АЦП поразрядного уравнивания

АЦП поразрядного уравнивания, принцип действия которого поясняется рис. 23, является довольно популярным. При запуске АЦП компаратор начинает сравнивать входное напряжение  $U_x$  с напряжением, посту-

пающим с выхода ЦАП, которое в начальный момент равно 0. При равенстве единице всех коэффициентов  $a_1, a_2, \dots, a_m$  выходное напряжение ЦАП равно  $U_{max}$ . Компаратор вырабатывает сигнал "больше", по которому устройство управления устанавливает значение коэффициента  $a_0 = 1$ , тем самым устанавливая старший разряд ЦАП в '1', и на выходе ЦАП появляется напряжение  $U_{комп}$ , равное половине  $U_{max}$ . После этого компаратор вновь сравнивает это новое входное напряжение с напряжением, поступающим с выхода ЦАП. Если входное напряжение вновь оказывается больше напряжения с ЦАП, то компаратор вновь вырабатывает сигнал "больше", и устройство управления устанавливает коэффициент  $a_1 = 1$ , тем самым включается следующий разряд ЦАП, и напряжение  $U_{комп} = \frac{1}{2}U_{max} + \frac{1}{4}U_{max}$ . В противном случае, если измеряемое напряжение оказывается меньше, чем напряжение ЦАП, то устройство управления устанавливает  $a_0 = 0, a_1 = 1$ , и тогда  $U_{комп} = \frac{1}{4}U_{max}$ . Такие операции повторяются до тех пор, пока не будут опрошены все разряды ЦАП. По окончании процедуры во всех линиях, идущих от устройства управления к ЦАП, формируются коэффициенты  $a_0, a_1, \dots, a_m$  в виде наличия или отсутствия напряжения в каждой из них. Полученные коэффициенты, то есть двоичный код переписывается в выходной регистр и далее, в соответствии с протоколом обмена - в компьютер (процессор).

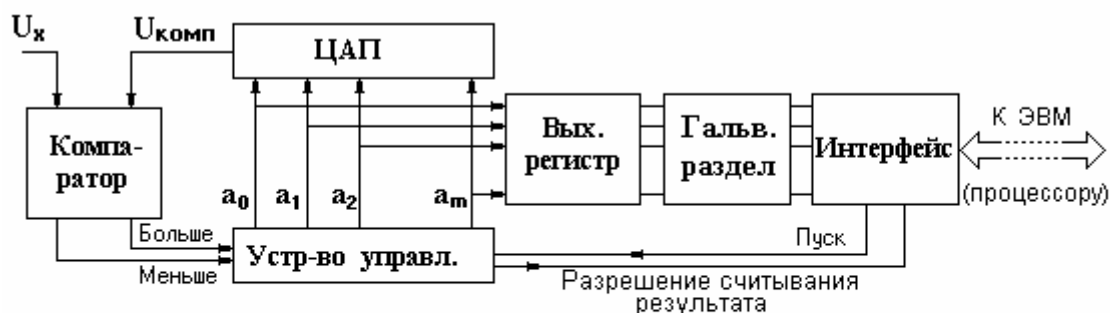


Рис. 23. К принципу действия аналого-цифрового преобразователя поразрядного уравнивания

Основная погрешность таких АЦП определяется:

- конечной чувствительностью компаратора, погрешностями изготовления сопротивлений в ЦАП и ограниченным количеством разрядов - аддитивная составляющая погрешности,
- погрешностью рабочего тока ЦАП – мультипликативная составляющая погрешности.

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

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

#### **4.2.2. Интегрирующие АЦП**

Интегрирующие АЦП предназначены для преобразования в код медленно меняющегося напряжения с подавлением помех от сети питания. С этой целью в таких АЦП интегрирование выполняется на интервале времени, равном или кратном периоду напряжения в сети электроснабжения. В Европе и Азии период этого напряжения равен 20 мс. В обеих Америках период напряжения равен 1/60 с.

##### **4.2.2.1. АЦП двойного интегрирования**

Первым действием АЦП двойного интегрирования является интегрирование входного напряжения в течение целого количества периодов помехи. На вход интегратора подается измеряемое напряжение (см. рис.24), возмущенное помехой. Если запуск АЦП состоялся в момент времени  $t_1$ , то момент окончания интегрирования есть  $t_2 = t_1 + n \cdot T$ , где  $T$  – период напряжения помехи.

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



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

#### 4.2.2.2. Сигма – дельта АЦП

Упрощенная эквивалентная структурная схема АЦП, построенного по принципу сигма-дельта модуляции, представлена на рис. 25. Сокращенно эти АЦП обозначаются, как  $\Sigma\Delta$  АЦП.

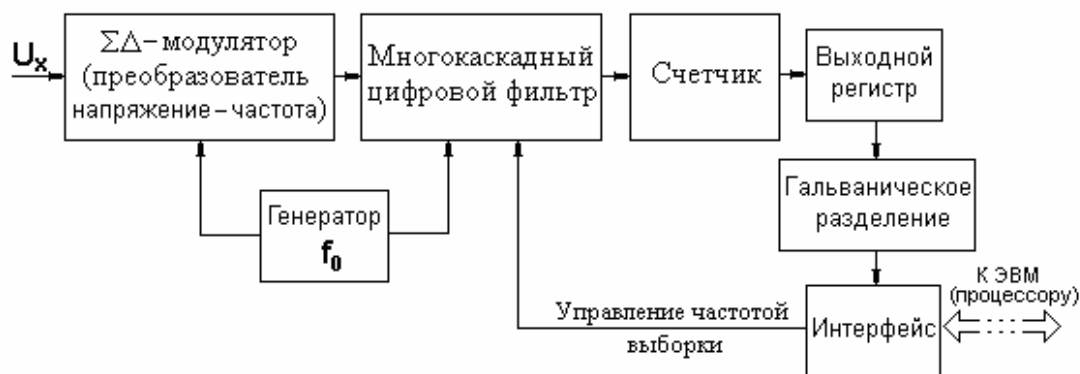


Рис. 25. Типичная структура  $\Sigma\Delta$  АЦП

Первым элементом  $\Sigma\Delta$  АЦП является  $\Sigma\Delta$  – модулятор, который, по сути дела, есть преобразователь входного напряжения в среднюю частоту выходных импульсов, интервал времени между которыми непостоянный, но меньше, чем период тактовой частоты  $f_0$  быть не может. Генератор тактовой частоты, которая выбирается в диапазоне 4.0 – 100.0 МГц, инициирует работу  $\Sigma\Delta$  – модулятора. Средняя частота нерегулярного выходного потока импульсов с высокой степенью линейности пропорциональна входному напряжению  $f_{cp} = KU_x$ . Эти импульсы поступают на вход многокаскадного цифрового фильтра, который в большинстве  $\Sigma\Delta$  АЦП выполняет подсчет поступивших импульсов за время, равное  $n$  периодам частоты  $f_0$ , благодаря чему в АЦП реализуется интегрирование в течение времени  $T_{инт} = n / f_0$ .

Современные  $\Sigma\Delta$  АЦП позволяют выполнять от двух – трех до 60 000 измерений в секунду. Основная инструментальная погреш-

ность таких АЦП достигает сотых и нескольких тысячных долей процента. Незначительное неудобство  $\Sigma\Delta$  АЦП заключается в том, что при ступенчатом изменении входного напряжения, происходящем в многоканальных измерительных системах при переключении каналов, в АЦП возникает переходный процесс, порожденный цепочкой фильтров. В результате первые несколько измерений после переключения выполняются со значительной погрешностью. Количество таких измерений в зависимости от режима работы АЦП может составлять от 3 до 8. Это следует иметь в виду при использовании  $\Sigma\Delta$  АЦП после мультиплексора в многоканальных измерительных системах.

#### 4.2.3. Связь ЦАП и АЦП с компьютером

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

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

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

Сравнительные характеристики интерфейсов приведены ниже в таблице 1.

Внутренние интерфейсы компьютера имеют характеристики:

- **PCI** – от 4 до 20 входов в промышленных компьютерах, скорость обмена 132 Мбайта/с,
- **PCMCIA** – до 3 входов в портативных компьютерах, скорость обмена – до 1.0 Мбайта/с.

Таблица 1

**Сравнительные характеристики интерфейсов для автономных АЦП**

Тип интерфейса	<b>RS 232</b>	<b>RS 485</b>	<b>USB</b>
Скорость обмена	30 бит/с -115Кбит/с	До 10 Мбит/с	До 12 Мбит/с
Кол-во устройств	1	31	127

Кол-во проводов	9	9	4
Расстояние	17 м	1200 м	5 м

В последнее время широкое распространение получили беспроводные интерфейсы, такие, как **Bluetooth**, **Wi-Fi**, **ZigBee** и другие. При работе с такими интерфейсами гальваническая развязка между выходным регистром и устройством интерфейсного сопряжения не требуется.

### 4.3. Цифровые измерительные приборы

Цифровые измерительные приборы отличаются от измерительных преобразователей тем, что выходные данные приборов должны быть представлены человеку - оператору в удобной для него форме. Поэтому для построения цифровых измерительных приборов используются АЦП, снабженные средствами ручного управления и визуального представления результатов измерений, как это показано на рис. 26.

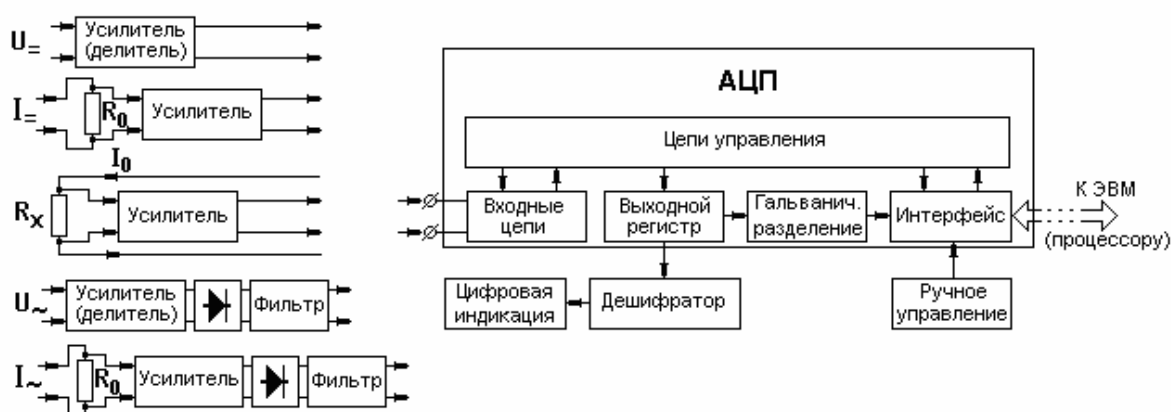


Рис. 26. Варианты цифровых измерительных приборов

Цифровые приборы некоторых типов снабжены устройствами интерфейсного сопряжения с компьютером, которые передают в компьютер результаты измерений, а также служебную информацию о позиции, в которой находятся средства ручного управления. Чаще всего для связи приборов с компьютером применяется приборный интерфейс IEEE 488.

На рисунке 26 представлены возможные варианты цифровых измерительных приборов.

На базе АЦП других разновидностей – поразрядного уравнивания, интегрирующих могут быть созданы вольтметры и амперметры постоянного и переменного тока, а также омметры. Для этого к АЦП присоединяются входные преобразователи, показанные в левой части рис. 28. Обычно в одном корпусе с АЦП помещаются несколько преобразователей, каждый из которых присоединяется к АЦП с помощью переключателя, управляемого вручную или от компьютера. Подобные приборы называются *мультиметрами*. Наиболее точные мультиметры, предназначенные для измерения постоянного напряжения, силы постоянного тока и сопротивления создаются на базе интегрирующих АЦП.

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

В большинстве случаев при нормировании характеристик погрешности цифровых приборов учитываются обе составляющие погрешности: мультипликативная и аддитивная. Поэтому для цифровых приборов нормированию подлежит основная *относительная* погрешность, для чего применяется *двучленной формулой* (4).

Метрологические характеристики, нормируемые для цифровых приборов:

- диапазон измерения,
- пределы допускаемой основной относительной погрешности, нормируются двучленной формулой (4) путем задания коэффициентов  $c$  и  $d$ ,
- входное сопротивление (импеданс), нормируется только для электроизмерительных приборов,
- количество разрядов, представляемых на индикацию,
- цена единицы младшего разряда индикации результатов измерений,
- вид, число разрядов и цена единицы младшего разряда выходного кода, нормируется в случаях наличия связи с компьютером или печатающим устройством,
- пределы допускаемой дополнительной погрешности,



- максимальная частота измерений (представляется в  $1/c$ ) или длительность цикла одного преобразования (представляется в  $c$ ),
- погрешность датирования отсчетов,
- максимальная скорость обмена информацией с внешними устройствами, нормируется в случаях, когда такая связь предусмотрена.

Класс точности цифровых приборов в соответствии с ГОСТ 8.401 обозначается двумя цифрами, равными коэффициентам двучленной формулы, разделенными косой чертой:  $c/d$ .

Точно так же нормируются метрологические характеристики измерительных каналов ИИС, которые содержат аналоговые инерционные преобразователи и заканчиваются аналого-цифровым преобразованием. Для них нормирование динамических характеристик аналоговой части является обязательным. Для цифровых приборов и измерительных каналов ИИС обычно достаточно нормировать частные динамические характеристики, такие, как время реакции или границы частотной полосы.

#### **4.4. Помехи и борьба с ними**

На качество работы высокочувствительных электронных приборов, в том числе цифровых, существенное влияние оказывают *поперечные* помехи (помехи *нормального вида*  $U_{mn}$ ) и *продольные* помехи (помехи *общего вида*, *синфазные помехи*  $U_{nd}$ ). Эти помехи показаны на рис. 27, на котором через ВП и НП обозначены высокопотенциальный и низкопотенциальный зажимы прибора.

Поперечные помехи – это помехи, которые складываются с сигналом. Они возникают вследствие действия внешних электромагнитных полей за счет взаимной индуктивности и паразитной емкости, которые всегда имеют место.

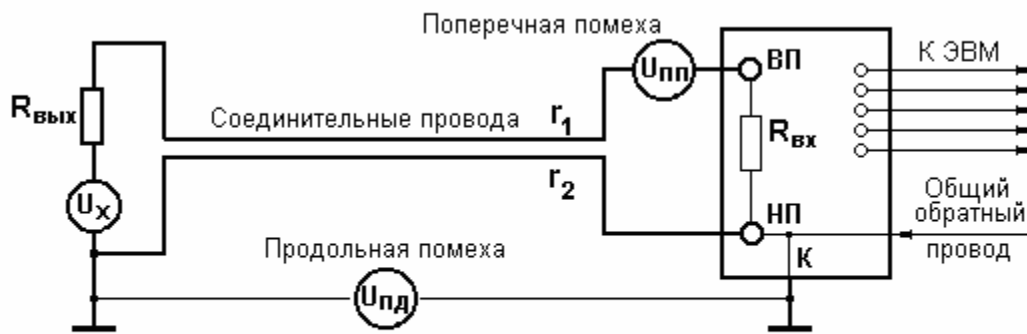


Рис. 27. Происхождение продольной и поперечной помех

Причинами возникновения продольных помех являются:

- высокое сопротивление контуров заземления,
- блуждающие токи в контурах заземления и в среде, находящейся между точками заземления,
- удаленность друг от друга точек заземления корпуса датчика (или иного измерительного блока) и корпуса прибора; это заземление делается, в соответствии с требованиями техники безопасности.

К продольным помехам относятся также помехи, которые возникают в общем проводе электронной схемы. Чаще всего такие помехи возникают в интерфейсных сопряжениях, когда для всех проводов интерфейса общим проводом является всего один обратный провод, как это показано на рис. 27.

В конечном итоге продольные помехи преобразуются в поперечную помеху за счет различия сопротивлений в контуре информационной цепи: в верхней части цепи сопротивление больше, чем в нижней на сумму выходного сопротивления источника сигнала  $R_{\text{вых}}$  и входного сопротивления приемника  $R_{\text{вх}}$ .

Средствами борьбы с поперечными помехами являются:

- скручивание двух информационных проводов, за счет чего уменьшается площадь витка, который образован этими проводами, такие провода называются *витой парой*,
- экранирование входной цепи, экран не имеет гальванической связи с входной цепью и с корпусом, экран заземляется в одной точке с точкой заземления источника,

- фильтрация сигналов, в частном случае - интегрирование,
- пропускание информационных проводов сквозь одно отверстие в корпусе прибора.

Средства борьбы с продольными помехами:

- гальваническое разделение входных цепей приемника информации от цепи заземления корпуса, благодаря чему практически разрывается цепь, через которую продольная помеха попадает на вход прибора (преобразователя),

- гальваническое разделение выходных цифровых цепей с помощью оптоэлектронных пар, благодаря чему обратные токи всех линий интерфейса, циркулирующие в единственном общем обратном проводе, не создают падения напряжения на общем проводе электронной схемы прибора (преобразователя),

- гальваническое разделение цепи питания 220 В от внутренних электронных цепей с помощью трансформатора.

Перечисленные средства борьбы с помехами показаны на рис. 28.

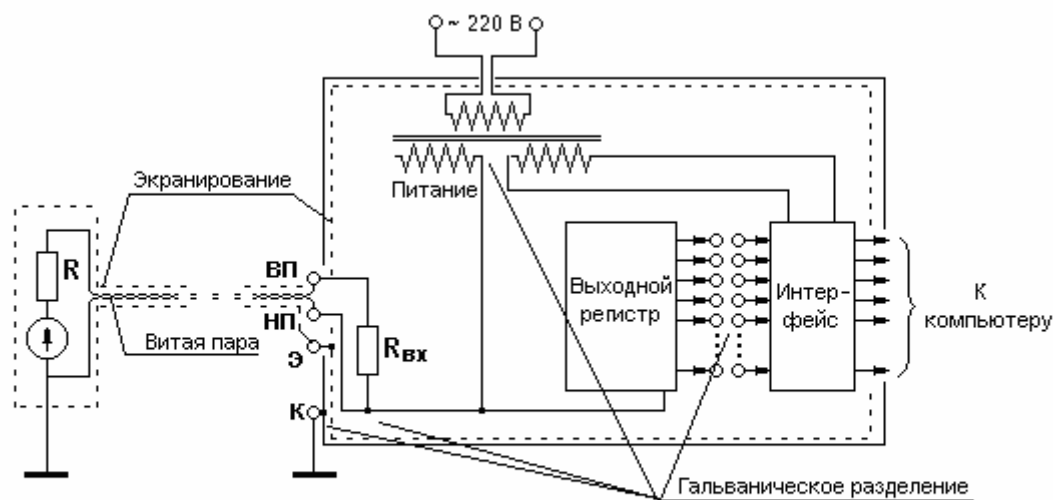


Рис. 28. Средства борьбы с помехами

На этом рисунке обозначено: ВП и НП – высокопотенциальный и низкопотенциальный зажимы, Э – зажим плавающего экрана, К – зажим корпуса, предназначенный для заземления в целях обеспечения безопасности персонала. Между выходным регистром и устройством интерфейсного сопряжения включено устройство оптического гальванического разделения на оптопарах: на стороне источника – светодиод, на стороне приемника -

фотодиод или фототриод. В одной микросхеме может быть размещено до десяти таких оптопар.

Экран и общий провод схемы могут быть заземлены только в одной точке. Если общий провод заземлен у источника (как на рисунке 30), то его нельзя землить у входа в устройство. Наоборот, если общий провод у источника не заземлен, можно соединить клеммы НП и К. Точно так же поступают с заземлением экрана. Его землят либо у источника, либо на входных зажимах принимающего устройства (прибора, преобразователя).

На рисунке не показано еще одно существенное средство борьбы с продольными помехами, которое состоит в гальваническом разделении линии, по которой передается сигнал измерительной информации от источника (например, датчика). Устройство такого гальванического разделения должно быть расположено непосредственно на входе принимающей части канала. В качестве этого устройства обычно применяется трансформатор с двумя прерывателями: на входе перед первичной обмоткой и на выходе после вторичной обмотки. Эти два прерывателя работают синхронно и обеспечивают преобразование постоянного напряжения в переменное (на первичной обмотке трансформатора) и переменного напряжения в постоянное (на вторичной обмотке трансформатора). Оптоэлектронная развязка здесь неприменима из-за того, что она не обеспечивает достаточной точности передачи, в то время как трансформаторная развязка может обеспечить точность до  $(0.01 \div 0.02) \%$ . В качестве устройства трансформаторной гальванической развязки линий передачи сигнала измерительной информации можно использовать гальванически развязанные преобразователи DC/DC, которые выпускаются серийно.

Гальванически развязанные отдельные части измерительного канала могут заземляться независимо друг от друга.

В заключение отметим, что гальваническое разделение высокочастотных сигналов ухудшается с ростом частоты сигнала. Это происходит потому, что с увеличением частоты сигнала измерительной информации увеличивается проводимость между изолированными частями устройств гальванического разделения из-за паразитной емкости, которая может достигать 100 пФ.

## 5. Измерительные преобразователи неэлектрических величин

### 5.1 Средства и методы измерения температуры

Будут рассмотрены основные первичные преобразователи (датчики, сенсоры) температуры, применяемые в промышленности. Эти датчики делятся на две группы: *генераторные* и *параметрические*. Генераторные датчики основаны на применении термоэлектрического эффекта, открытого в 1823 году Зеебеком. Генераторные датчики температуры называются термоэлектрическими датчиками, они не требуют питания, поскольку являются источниками термоэдс, которая возникает вследствие разности работы выхода электронов из разных металлов.

Принцип действия параметрических датчиков температуры заключается в использовании зависимости от температуры сопротивления, которое оказывают металлы электрическому току. Такие датчики температуры называются термопреобразователями сопротивления, и их практическое применение невозможно без источника тока.

#### 5.1.1. Термоэлектрические датчики температуры

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

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

$$E(t^o) = f(t^o) - f(t_0^o),$$

в идеальном случае холодные концы термопары должны находиться при температуре тающего льда, то есть при  $t_0^o = 0^o C$ , как это показано на рис. 29 а. Однако, такая температура в промышленных условиях не может воспроизводиться постоянно. Поэтому в реальных ситуациях применяют один из двух способов компенсации температуры холодных спаев термоэлектрического датчика температуры, показанных на рис. 29 б, в.

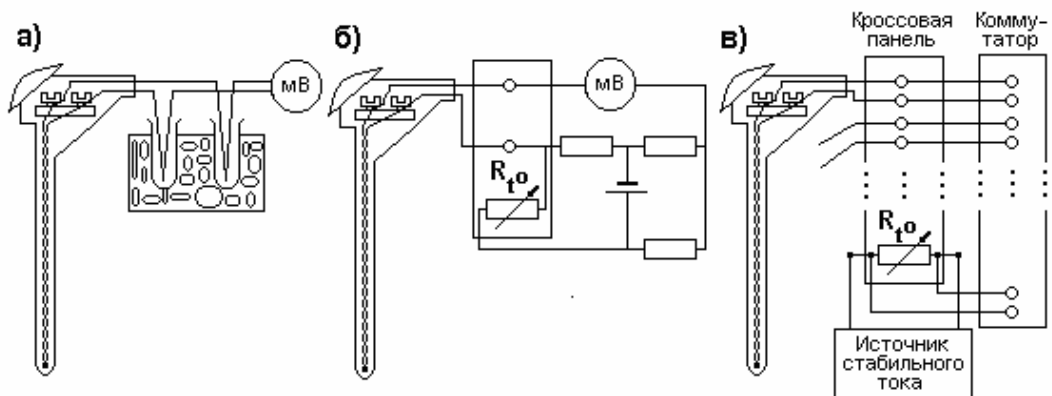


Рис. 29. Схемы включения термопар

Первый из этих способов заключается в следующем. Холодные концы приходят на зажимы, расположенные при одинаковой температуре. Отсутствие градиента температуры между зажимами обеспечивается благодаря заключению этих зажимов в закрытый ящик или за счет подкладывания массивной медной плиты под плату с зажимами. Зажимы изолируются от плиты. В ящик или на плиту устанавливается медный термометр сопротивления  $R_{t_0}$ , включенный в мост. Этот мост уравнивается при температуре термометра сопротивления, равной нулю. Если температура места подсоединения холодных спаев отличается от нуля, мост выходит из равновесия, и в его измерительной диагонали возникает напряжение, которое компенсирует отличие температуры холодных спаев от нуля.

Второй прием применяется в случаях, когда с помощью одного прибора или ИИС выполняются измерения температуры в нескольких точках объекта. В этих случаях холодные концы термопар подводятся к одной кроссовой панели, снабженной системой выравнивания температуры во всех точках панели. На этой кроссовой панели устанавливается медный термометр сопротивления  $R_{t_0}$ , через который протекает стабильный ток

$I_0$ . Все каналы измерения температуры опрашиваются коммутатором, в том числе в каждом цикле опроса опрашивается также канал измерения температуры кроссовой панели, и стало быть, холодных концов всех термопар. Результат этого измерения используется микропроцессором или компьютером для того, чтобы вычислить и ввести поправку на температуру холодных спаев во все результаты измерений.

Материалы, из которых изготавливаются промышленные термопары: платина (термопары ТПП), сплавы платины с родием (термопары ТПР), хромель и алюмель (термопары ТХА), хромель и копель (термопары ТХК), нихросил и нисил (термопары НН). Для высокотемпературных термопар применяются вольфрам и рений. Функции преобразования (градуировочные характеристики) стандартных термопар приведены в ГОСТ 3044. Конструктивное исполнение (диаметр, длина погружаемой части, крепежные размеры и т. д.) всех термопар кроме НН приведены в ГОСТ 6616. Термопары НН обладают повышенной стабильностью характеристик. Они появились примерно 50 лет назад в Австралии и изготавливаются из двух сплавов нихросил (сплав никеля, хрома и кремния) и нисил (сплав никеля и кремния) в виде кабеля диаметром от двух до восьми миллиметров. Этот кабель представляет собой гибкую металлическую трубку с размещенными в ней одной или двумя парами термоэлектродов. Пространство вокруг термоэлектродов заполнено уплотненной изоляцией, например, окисью алюминия. Для получения рабочей термопары заготовка (то есть описанный кабель) отрезается, оголившиеся концы термоэлектродов свариваются и на них надевается защитная крышка. Другие концы термоэлектродов выводятся на специальную плату и могут быть протянуты вплоть до кроссовой панели уже вне кабеля.

В табл. 2 представлены примерные характеристики наиболее распространенных промышленных термоэлектронных датчиков температуры.

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

прибором или системой используются *удлинительные термоэлектроды*. Эти электроды должны удовлетворять двум условиям.

Таблица 2

**Характеристики термоэлектронных датчиков температуры**

Тип датчика	Пределы измерений °С	Выходное напряжение мВ	Пост. врем. с	Абсолютная погрешность °С
ТПП. Платина – платина-родий (10% родия)	-20 – 1300. Кратковременно – до 1600.	Минус 0,02 – 13	40.0 60.0 210.0	1 – 3
ТПР. Платина-родий (6% родия) Платина-родий (30% родия)	300 – 1600. Кратковременно – до 1800.	0 – 11	40.0 60.0 210.0	1 – 5
ТХА. Хромель – алюмель	Минус 50 – 1000. Кратковременно – до 1300.	Минус 1.86 – 41	40.0 60.0 210.0	3 – 10
ТХК. Хромель – копель	Минус 50 – 600. Кратковременно – до 800.	Минус 3 – 49	40.0 60.0 210.0	2 – 6
НН. Нихросил – нисил	Минус 50 – 1200.	Минус 2 – 50	-	2 – 7
Вольфрам 5% – рений 20 %	0 – 2200. Кратковременно – до 2500.	0 – 34	40.0 60.0 210.0	5 – 10

Первое условие: места присоединения удлинительных электродов к основным термоэлектродам (обычно в головке термопары, см. рис. 29) должны иметь одинаковую температуру.



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

Для платиновых термопар применяются удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП (медь 99,4 %, никель 0,6 %), для термопары ТХА – из меди и константана, для ТХК – основные термоэлектроды, выполненные в виде гибких проводов. Для нихросил-нисиловых термопар удлинительными проводами являются провода из этих же материалов.

Из табл. 2 следует, что промышленные термопары, заключенные в массивные оболочки, предназначены для измерения практически постоянной или очень медленно изменяющейся температуры, их тепловая инерция довольно велика. Исключением являются нихросил-нисиловые термопары, тепловая инерция у них гораздо меньше, их постоянная времени может меняться в широких пределах, поэтому в таблице она не указана.

Однако в ряде случаев в народном хозяйстве, а также при научных исследованиях возникает задача измерения быстро изменяющихся температур, спектр которых распространяется до частот 50–80 кГц. Для измерения таких температур применяются сверхминиатюрные термопары, в том числе открытые. Эти термопары изготавливаются из проволоки диаметром 10–20 мкм, диаметр горячего спая достигает 0,2 мм. Постоянная времени подобных термопар составляет 0,003–0,01 с. Схемы включения подобных термопар аналогичны схемам, представленным на рис. 29.

Основные источники погрешностей измерения температуры с помощью термопар:

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

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

### **5.1.2. Термопреобразователи сопротивления провололочные**

Термопреобразователи сопротивления суть параметрические датчики температуры, поскольку от температуры зависит параметр резистора, а

именно, его сопротивление постоянному току. Общие технические требования, методы испытаний и градуировки промышленных термопреобразователей сопротивления приводятся в ГОСТ 6651. Наиболее популярными являются два вида термопреобразователей сопротивления – платиновый и медный. Их основные характеристики приведены в таблице 3. Выпускаются также никелевые термопреобразователи сопротивления.

Таблица 3

**Характеристики промышленных термометров сопротивления**

Тип термометра	Класс точности	Пределы измерения °C	Абсолютная погрешность °C	Сопротивление при $t^{\circ} = 0$ Ом	Температура собств. нагрева	Пост. времени с
ТСП платиновый	A	-220 ÷ +850	$0.15 + 0.002   t^{\circ}  $	1 Ом 10 Ом 50 Ом 100 Ом	< 0,2°C	9 80 240
	B	-220 ÷ +1100	$0.3 + 0.005   t^{\circ}  $			
ТСМ медный	A	(-50 ÷ 120)	$0.15 + 0.002   t^{\circ}  $	10 Ом 50 Ом 100 Ом	< 0,4°C	9 80 240
	B	(-200 ÷ 200)	$0.25 + 0.0035   t^{\circ}  $			

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

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

Понятно, что при этом нельзя допускать перегрева термосопротивления, ибо этот перегрев будет вызывать погрешность результата измерений. Допустимый перегрев указан в таблице 3, и верхнее значение допустимой силы тока может быть получено из формулы:  $I \leq 2d\sqrt{d\Delta t^{\circ}}$ , где  $\Delta t^{\circ}$  – температура перегрева, d – диаметр провода (мм), из которого изготовлен термопреобразователь сопротивления.

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

Первый из них заключается в том, что термопреобразователь сопротивления включается в мост, который уравнивается при температуре термосопротивления, равной нулю, и при других температурах работает в неравновесном режиме. Схема такого моста приведена на рис. 30. Здесь учтено удаление датчика от остальной части схемы на значительное расстояние, и поэтому применяется трехпроводное включение датчика, такое, чтобы сопротивления линий связи  $R_{Л1}$ ,  $R_{Л2}$  влияли на результат измерения в минимальной степени.

В самом деле, сопротивление  $R_{Л3}$  на результат измерения практически не влияет вообще, поскольку включено последовательно с источником питания. Сопротивления двух других линий  $R_{Л1}$ ,  $R_{Л2}$ , включены в противоположные плечи моста. Условие равновесия моста в этом случае записывается в виде

$$(R_{\text{т}0} + R_{Л1}) \cdot R_3 = (R_4 + R_{Л2}) \cdot R_2,$$

откуда получим:

$$R_{\text{т}0} \cdot R_3 + R_{Л1} \cdot R_3 = R_4 \cdot R_2 + R_{Л2} \cdot R_2.$$

Если обеспечить  $R_2 = R_3$ , что достигается легко, и  $R_{Л1} = R_{Л2}$ , то влияние линий л1 и л2 исключается полностью. Обеспечить второе из этих условий удастся не всегда. Поэтому в эти линии включаются последовательно два стабильных резистора, сопротивления которых равно примерно 10 Ом. Один из этих резисторов делается регулируемым. При включенном датчике и при равенстве нулю его температуры путем регулировки одного из этих резисторов добиваются равновесия моста. Сопротивления 10 Ом достаточно, чтобы замаскировать возможную разность сопротивлений

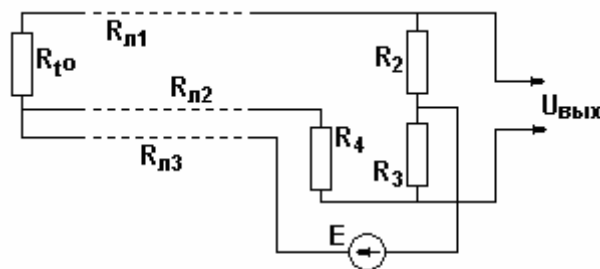


Рис. 30. Схема включения в мост удаленного термосопротивления

проводов в линиях, вызванную неоднородностью проволоки и материала, из которых она изготовлена.

Другой способ достижения нулевого выходного сигнала при нулевой температуре реализуется численным методом, для чего в составе средства измерений должен быть предусмотрен микропроцессор или компьютер. В этом случае удаленный термопреобразователь подсоединяется к прибору или системе по четырехпроводной схеме, показанной на рис. 31. В этой схеме при условии применения усилителя с очень большим входным сопротивлением размером от 1.0 до 10.0 МОм и более влияние соединительных проводов и контактов устраняется практически полностью, поскольку их сопротивление пренебрежимо мало по сравнению с входным сопротивлением усилителя.

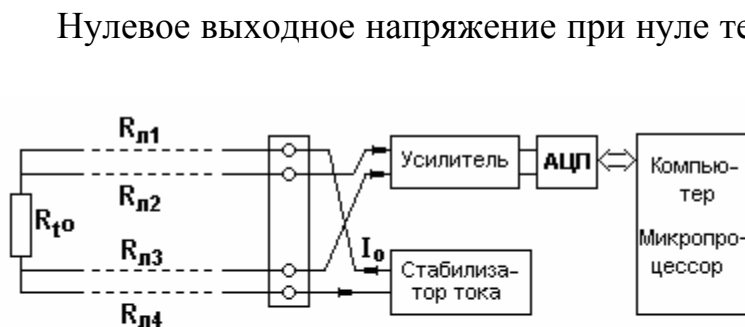


Рис. 31. Четырехпроводная схема включения удаленного термометра сопротивления

читанием из каждого результата падения напряжения на сопротивлении  $R_{t^0}$ , которым обладает термопреобразователь при  $t^0 = 0^0 C$ .

### 5.1.3. Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления

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

Зависимость сопротивления полупроводниковых терморезисторов от температуры удовлетворительно описывается формулой

$$R_{t^0} = A \cdot e^{B/t^0},$$

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

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

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

## 5.2. Измерение деформаций

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

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

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

При увеличении длины проволоки в пределах ее упругой деформации на  $\Delta l$  ее диаметр уменьшается на  $\Delta d$ , причем относительные величины  $\Delta l/l$  и  $\Delta d/d$  связаны прямо пропорционально:  $\Delta d/d = -0.4 \Delta l/l$ . Кроме того при деформации проводника изменяется его удельное сопротивление  $\rho$ . Для большинства проволочных и фольговых тензорезисторов относительное изменение удельного сопротивления незначительно.

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

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

Удельная проводимость проволоки слабо зависит от деформации. Учитывая это, а также то, что два последних слагаемых в правой части ли-

нейно зависят от относительной деформации  $\varepsilon = \Delta l / l$ , получим, что относительное изменение сопротивления тензорезистора пропорционально его деформации:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot 0.4 \frac{\Delta l}{l} = K_T \frac{\Delta l}{l} = K_T \cdot \varepsilon,$$

где  $K_T$  – коэффициент тензочувствительности. Из полученной формулы следует, что его значение равно 1,8, однако из-за незначительного влияния первого слагаемого (относительного изменения удельного сопротивления) фактическое значение коэффициента тензочувствительности применяемых материалов лежит в пределах  $1.8 \leq K_T \leq 3$ , поскольку у них различаются зависимости удельного сопротивления от деформации.

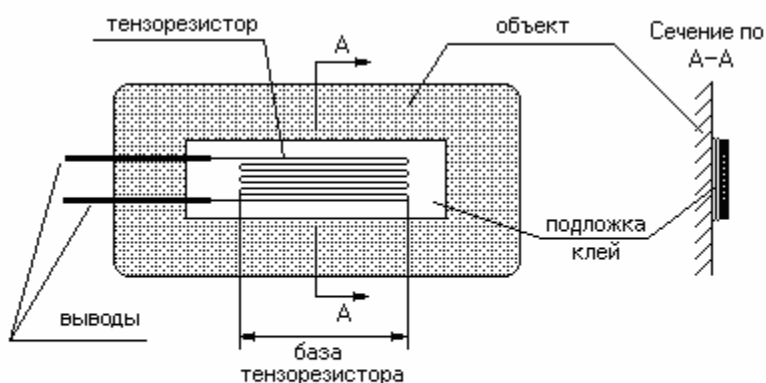


Рис. 32. Конструкция тензорезистора и его крепление на объекте

Проволочные тензорезисторы изготавливаются из тонкой проволоки толщиной  $10 \div 20$  мкм и наклеиваются на тонкую бумажную подложку (рис. 32). К объекту тензорезистор на подложке приклеивается высококачественным неэластичным клеем с тем, чтобы деформация объ-

екта передавалась на тензорезистор полностью. Ориентируется тензорезистор строго по тому направлению, в котором необходимо измерить деформацию. База тензорезистора может иметь размеры от 5 мм до 20 мм. Сопротивление недеформированного тензорезистора от 40 Ом до 800 Ом. Свойства материалов, из которых делаются проволочные тензорезисторы, представлены в таблице 4.

Таблица 4

**Характеристики некоторых материалов тензорезисторов**

Материал	Коэффициент тензочувствительности	Температурный диапазон °С	Критическая температура

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

Фольговые тензорезисторы изготавливаются из фольги, прокатанной из тех же материалов и обладают такими же характеристиками. Они изготавливаются фотоспособом. На фольгу наносится фоточувствительный слой, на этот слой проектируется изображение тензорезистора, затем незащищенные участки вытравляются. В результате конфигурация фольговых тензорезисторов может быть достаточно сложной, а их база – довольно мелкой: до 1.0 мм.

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

Пределы измерения относительных деформаций с помощью проволочных и фольговых тензорезисторов сверху ограничиваются пределами упругих деформаций металлов, то есть 1%. При коэффициенте тензочувствительности  $K_T = 2.0$  и начальном сопротивлении недеформированного тензорезистора, равном 100 Ом пределы изменения сопротивления при полной деформации составит всего 2 Ома, и каждое значение этого изменения необходимо измерять с относительной погрешностью (1 ÷ 2)%, что в абсолютном выражении составит величины (0.02 ÷ 0.04) Ом. По отношению к полному сопротивлению тензорезистора в относительных единицах точность измерения сопротивления окажется уже (0.02 ÷ 0.04)%.

В связи с этим остро встает вопрос о точном определении коэффициента тензочувствительности и собственного сопротивления тензорезистора при его выпуске из производства. И если точное измерение сопротивления труда не составляет, то для точного измерения коэффициента тензочувствительности необходимо приклеить тензорезистор к образцовому объекту (например, к образцовой балке) так же хорошо, как и затем к объекту. Поэтому испытанный объект к дальнейшему применению пригоден не будет. Указанная причина заставляет выполнять метрологические испытания тен-

зорезисторов выборочно на отдельных представителях партии тензорезисторов, изготовленных при одинаковых технологических условиях. Это единственное средство измерений, которое подвергается выборочным метрологическим испытаниям с разрушением.

Понятно, что по результатам таких выборочных испытаний необходимо приписать всем тензорезисторам партии полученное значение коэффициента  $K_T$  и характеристики разброса значений индивидуальных коэффициентов внутри партии. Эта операция выполняется статистическими методами, описанными в Лабораторном практикуме [6].

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

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

В зависимости от доступности поверхностей объекта схемы включения тензорезисторов именуется "четверть моста", "половина моста" и "целый мост". Эти схемы представлены на рис. 33 а), 33 б), 33 в) соответственно. На этих схемах принято, что сопротивления всех плеч моста, в том числе, сопротивления недеформированных тензорезисторов равны  $R$ . Напряжение питания моста  $E_0$ . Выходное напряжение, вызванное деформацией тензорезисторов, возникает в измерительной диагонали и обозначено через  $U_D$ .

Схема "четверть моста" применяется в тех случаях, когда доступной является только одна сторона объекта, например, внешняя поверхность крыла самолета при его испытаниях на прочность, внутренняя поверхность корпуса судна, наружная поверхность котла.

Тогда в заданное место на поверхность объекта наклеивается только один тензорезистор  $TP_1$  (рис. 33 г), сопротивление которого при показанной относительной деформации  $\varepsilon$  увеличивается, то есть



$R_T = R + \Delta R = R \cdot (1 + K_T \cdot \varepsilon)$ . Считая входное сопротивление усилителя  $R_{ex} \gg R$ , получим выражение для напряжения в диагонали данного неравновесного моста, вызванное деформацией:

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

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

В тех случаях, когда объект деформируется строго в одном направлении, для компенсации погрешности от температуры перпендикулярно к

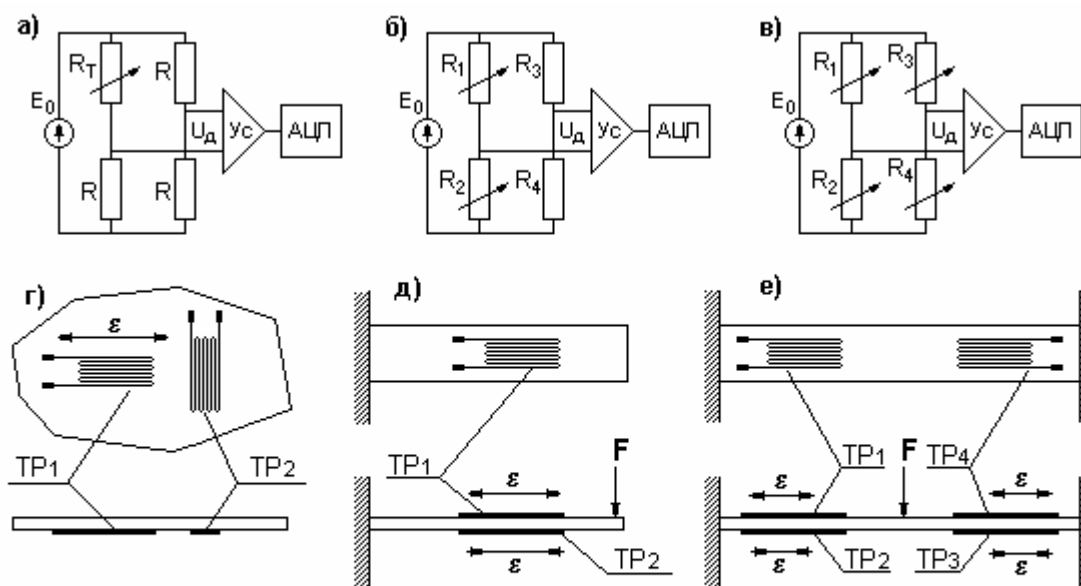


Рис. 35. Схемы включения тензорезисторов

тензорезистору  $TP_1$  наклеивают компенсирующий тензорезистор  $TP_2$ , как это показано на рис. 33 г). Этот тензорезистор включают в мост по схеме "половина моста", показанной на рис. 33 б), но поскольку он практически не воспринимает деформацию объекта, выражение для выходного напряжения остается прежним, действительным для схемы "четверть моста".

Если объект подвергается изгибу, и обе его поверхности доступны, то тензорезисторы приклеивают на обе противоположные поверхности так, чтобы тензорезисторы испытывали деформации, равные по величине, но противоположные по направлению (рис. 33 д). Тогда при относительной деформации  $\varepsilon$ , вызванной силой  $F$ , сопротивление тензорезистора  $TP_1$  будет увеличиваться  $R_1 = R \cdot (1 + K_T \cdot \varepsilon)$ , а сопротивление тензорезистора  $TP_2$  будет уменьшаться  $R_2 = R \cdot (1 - K_T \cdot \varepsilon)$ . Тогда зависимость выходного напряжения моста от деформации будет линейной, а чувствительность схемы к деформации повысится в два раза:

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

Еще большего повышения чувствительности можно добиться, если объект предоставляет возможность использовать тензорезисторы во всех четырех плечах моста (рис. 33 в) и 33 е):

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

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

- разбросом коэффициентов тензочувствительности тензорезисторов,
- нагреванием тензорезисторов протекающим через них током,
- различием коэффициентов теплового расширения материалов тензорезистора и объекта, из-за чего тензорезистор испытывает деформацию даже при недеформированном объекте,

- термоЭДС, возникающая в месте соединения проволоки тензорезистора с подводящими медными проводами,

- эластичностью клея,

- неверной ориентацией тензорезистора по направлению деформации,

- нестабильностью напряжения питания моста,

- дрейфом нуля усилителя постоянного тока и его тепловыми шумами.

Некоторые из перечисленных погрешностей удастся скорректировать. О коррекции некоторых температурных погрешностей речь шла выше. Эта коррекция достигается приклеиванием на объект дополнительного тензо-

резистора перпендикулярно основному. Погрешности от нагревания собственным током можно уменьшить, уменьшая этот ток, но при этом снижается чувствительность моста. Компромисс здесь достигается при импульсном питании моста. Моменты измерения выходного напряжения моста синхронизируются с моментами подачи импульсов питания. За счет этого увеличивают амплитудное значение напряжения питания и тем самым увеличивается чувствительность, но при этом уменьшается действующее значение этого напряжения, и тензорезисторы нагреваются гораздо меньше. В то же время при таком питании для усиления напряжения в измерительной диагонали моста применяется усилитель переменного напряжения, у которого дрейф отсутствует. Если к тому же на вход усилителя поставить фильтр, не пропускающий напряжение на частотах ниже частоты питания моста, то таким образом могут быть отфильтрованы помехи. Частота питающих импульсов выбирается в пределах (10 ÷ 30) кГц.

#### Полупроводниковые тензорезисторы (пьезорезисторы).

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

Технология изготовления полупроводниковых тензорезисторов, которые являются единым целым с подложкой, обеспечивает либо коррекцию, либо полное отсутствие некоторых погрешностей, таких как погрешность

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

### 5.3. Тензорезистивные датчики

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

Датчик силы. При измерении силы с помощью тензорезистивных датчиков выполняется цепочка взаимнооднозначных преобразований, показанная на рис. 34. Применение полупроводниковой микротехнологии позволяет в корпусе датчика разместить измерительный мост, а в некоторых случаях и усилитель и даже АЦП.

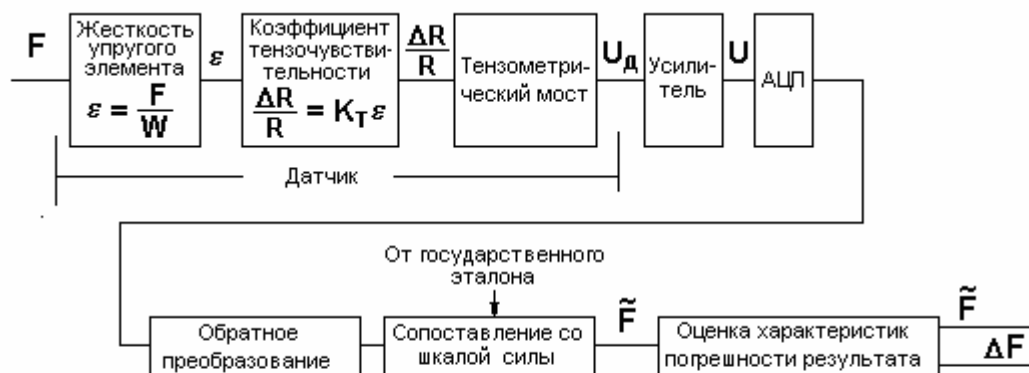


Рис. 34. Измерительные преобразования при измерении силы с помощью тензорезистивного датчика

На основе тензорезисторов создаются датчики силы с пределами измерений от долей грамма до десятков тонн. Пределы измерений определяются жесткостью  $W$  упругого элемента, который преобразует измеряемую

силу в деформацию этого элемента. Последующие преобразования очевидны.

На рис. 35 приведены два примера датчиков силы, в которых используются не рассмотренные ранее комбинации упругих элементов с тензорезисторами. В любом датчике силы на конструктивном элементе, воспринимающем силу, должна быть предусмотрена выпуклость, которая фиксирует точку приложения силы. В датчиках, предназначенных для применения в весоизмерительных системах, важно обеспечить независимость результата измерения от расположения взвешиваемого изделия (продукта)

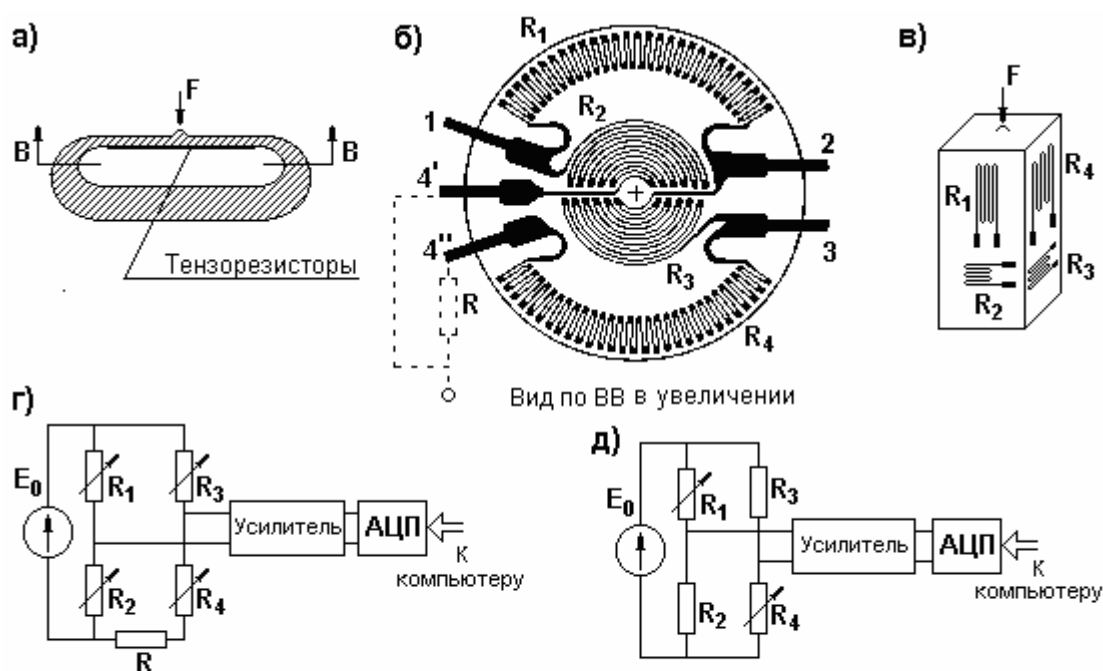


Рис. 35. Примеры тензорезистивных датчиков силы

на платформе, где это изделие размещается. Указанная независимость может достигаться иными методами: установкой под платформой нескольких датчиков и последующей математической обработкой результатов. На первом примере (рис. 35 а) показан в разрезе круглый датчик, упругим элементом которого является верхняя мембрана, на которой с внутренней стороны наклеен фольговый или полупроводниковый тензорезистивный элемент, показанный на рис. 35 б). Этот элемент представляет собой полный мост с возможностью подключения к нему внешнего сопротивления  $R$ , предназначенного для уравнивания моста при отсутствии деформа-

ции. При воздействии на датчик силы  $F$  тензорезисторы  $R_1$  и  $R_4$  сжимаются, а тензорезисторы  $R_2$  и  $R_3$  растягиваются. Эти тензорезисторы включаются в мост так, как показано на рис. 33 в) и 35 г). Относительная деформация  $\varepsilon$  преобразуется в напряжение измерительной диагонали моста по формуле

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

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

Вторая конструкция упругого элемента, представленная на рис. 35 в, требует иной схемы включения тензорезисторов в мост. Этот упругий элемент под действием измеряемой силы претерпевает только сжатие. В направлении деформации сжатия на упругом элементе установлены тензорезисторы  $R_1$  и  $R_4$ , которые включены в мост, как показано на рис. 35 д). Тензорезисторы  $R_2$  и  $R_3$  установлены перпендикулярно основным тензорезисторам и применяются для коррекции температурных погрешностей, как это было указано выше, в разд. 5.2. Положим, что в отсутствии воздействия измеряемой силы сопротивления всех тензорезисторов равны, а входное сопротивление усилителя значительно больше этих сопротивлений. Тогда напряжение в измерительной диагонали такого моста равно

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

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

Наиболее точным средством измерения силы, построенным на основе тензорезистивных датчиков, являются электронные весы фирмы "Сарториус" со встроенным микропроцессором. В этих весах тензорезисторы используются в качестве первого звена цепи отрицательной обратной связи, с помощью которой взвешиваемый груз компенсируется силой, создаваемой магнитоэлектрическим устройством. Погрешность весов не пре-

вышает 0.001%. При метрологических испытаниях и применении в микропроцессор вводится значение плотности окружающего воздуха с целью исключения погрешности, вызываемой силой выталкивания взвешиваемого предмета воздухом в соответствии с известным законом Архимеда. Среди весов, выпускаемых фирмой "Сарториус", отметим весы SC2 (предел измерения 2.1 г, разрешающая способность 0.1 мкг) и весы MC5 (предел измерения 5.1 г, разрешающая способность 1 мкг).

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

Датчики ускорения. В этих датчиках измеряемое ускорение преобразуется в силу за счет использования силы инерции, действующей на тело с точно известной массой  $m$ :  $F = m \cdot \ddot{x}$ , где  $\ddot{x}$  - ускорение датчика. Цепочка измерительных преобразований, выполняемых с участием тензорезистивных датчиков, представлена на рис. 36.



Рис. 36. Измерительные преобразования при измерении ускорения с помощью тензорезистивного датчика

Некоторые из возможных вариантов установки на упругий элемент тела с массой  $m$  и размещения на нем тензорезисторов показаны на рис. 37. Наибольшей чувствительностью из приведенных вариантов будет обладать датчик, у которого тело с массой  $m$  прикреплено на конце упругого элемента в виде консольной балки. Рабочие тензорезисторы обозначены

ны здесь, как  $R_1, R_2$ , а тензо-резисторы  $R_3, R_4$  установлены для компенсации температурных погрешностей, и их сопротивление не зависит от ускорения. Схема включения тензорезисторов в мост – по схеме рис. 33 б), формула для напряжения в диагонали – для схемы "половина моста".

Менее чувствительным будет датчик ускорения, у которого тело массы  $m$  и тензорезисторы установлены на гибкий элемент в соответствии с рис. 37 б). Тензорезисторы включаются в схему "целого моста" в соответ-

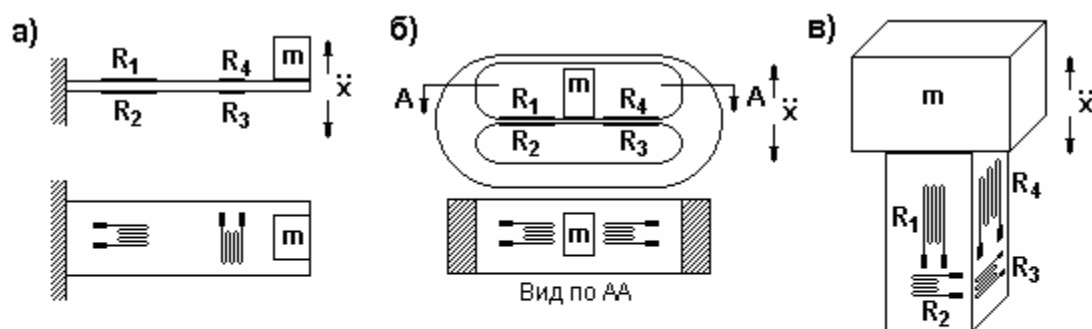


Рис. 37. Примеры взаимного расположения основных элементов тензорезистивных датчиков ускорения

ствии с рис. 37 в). И наконец, наименьшей чувствительностью будет обладать датчик ускорения, гибкий элемент которого работает на сжатие и растяжение (рис. 37 г). Тензорезисторы такого датчика включаются по схеме рис. 35 г).

Повышения чувствительности тензорезистивных датчиков ускорения можно добиться, используя импульсное питание моста, синхронизированное с моментами измерения.

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



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

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

Государственный эталон постоянного ускорения реализуется на центрифуге, скорость вращения которой и расстояние от центра вращения до датчика известны с высокой точностью. На чувствительный элемент датчика в этом случае действует постоянное центробежное ускорение. В качестве государственного эталона переменных ускорений используется двойная центрифуга.



Рис. 38. Измерительные преобразования при измерении давления с помощью тензорезистивного датчика

Датчики давления. В тензорезистивных датчиках давления жидкости или газа измеряемое давление преобразуется в силу с помощью поршня или мембраны, площадь которых известна с высокой точностью. Цепочка измерительных преобразований, выполняемых при измерениях давления с участием тензорезистивных датчиков, показана на рис. 38.

Датчики давления подразделяются на датчики абсолютного давления, датчики избыточного давления (по сравнению с атмосферным) и датчики

разности давлений. Внутренняя камера всех этих датчиков герметично делится упругой или мягкой мембраной на две полости, как показано на рис. 39.

В полости 2 датчика абсолютного давления (рис. 39 а) создается вакуум. На этом рисунке представлен вариант, когда упругим элементом является мембрана, на которой с помощью полупроводниковой технологии сформированы тензорезисторы ТР в соответствии с рис. 39 а). Эти тензорезисторы расположены на той стороне мембраны, которая находится в полости 2 и не подвергается воздействию среды, которая может быть агрессивной. Площадь и жесткость этой мембраны должны быть известны с высокой точностью ибо в этом случае мембрана выполняет два преобразования: преобразование давления в силу через площадь мембраны и преобразование силы в деформацию тензорезисторов.

В датчике избыточного давления упругим элементом может служить такая же мембрана, тензорезисторы которой защищены от атмосферы лаковыми покрытиями. Но на рис. 39 б) представлен вариант, когда от воздействия агрессивных компонентов той и другой среды мембрана с тензорезисторами, обладающая известной жесткостью, защищена герметичными плоскими мембранами, жесткость которых равна нулю. Эти мембраны выполняют преобразование давления в силу, которая затем преобразуется упругой мембраной с тензорезисторами.

Еще один вариант защиты от агрессивных сред представлен на рис. 39 в). С помощью такого датчика измеряется разность давлений в потоке жидкости или газа на участке трубопровода, где находится диафрагма, сужающая поток. Разность давлений до и после диафрагмы возникает из-за сопротивления, которое оказывает диафрагма потоку, и эта разность пропорциональна квадрату скорости потока или расхода движущейся среды. Среда может быть агрессивной, и здесь защита от нее является обязательной. В качестве средства защиты на этом рисунке представлены поршни, которые одновременно являются преобразователями давления в силу. Сила, которую они воспринимают, передается на мембрану посредством штоков.

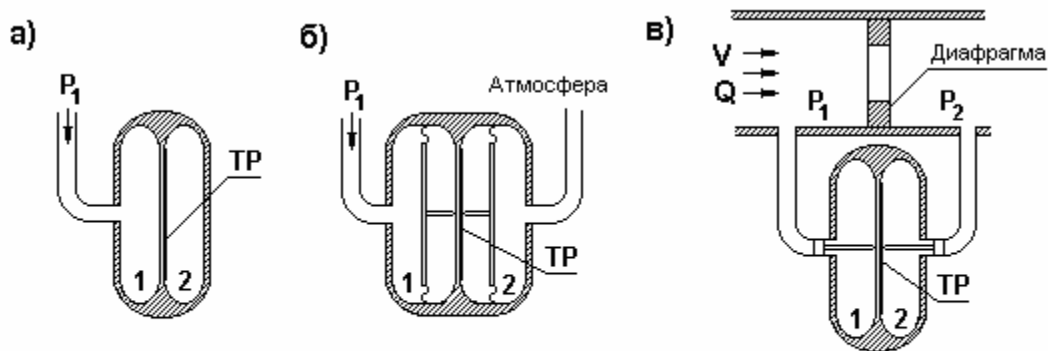


Рис. 39. Примеры схем тензорезистивных датчиков абсолютного давления а), избыточного давления б) и разности давлений в)

Во всех трех случаях через ТР обозначены фольговые или полупроводниковые тензорезисторы, сформированные на мембранах в соответствии с рис. 33 в.

Тензорезистивные датчики давления всех трех видов находят широкое применение на таких объектах, как электростанции, котельные, испытательные стенды энергоагрегатов. Отечественной промышленностью выпускается широкая номенклатура тензорезистивных датчиков давления типов САПФИР-22 и МЕТРАН-22. Диапазоны измеряемых давлений и разности давлений этих датчиков от десятков кПа до 400 МПа и выше. Погрешность датчиков 0.5% и 0.25%. В корпусе датчиков смонтированы тензомосты и вторичные преобразователи. Выходным сигналом этих датчиков является постоянный ток силой (0 ÷ 5) мА, (0 ÷ 20) мА и (4 ÷ 20) мА. Выходные сигналы зарубежных тензорезистивных датчиков давления промышленного применения изменяются в тех же пределах.

Погрешность лучших тензорезистивных датчиков давления фирм Fluke и Motorola (США), Rosemount и Druck (Германия), Метран (Россия, г. Челябинск), завод "Манометр" (г. Москва) и других достигает 0.05%. На основе подобных датчиков фирмы выпускают семейство калибраторов давления с той же погрешностью. В этих датчиках преобразование давления в силу и силы в деформацию осуществляется с помощью упругих элементов типа мембран (рис. 37 б). В датчиках применяются фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

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

#### 5.4. Пьезоэлектрические датчики

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

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

$$q = K_n \cdot F,$$

где  $K_n$  - коэффициент пьезочувствительности материала.

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

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

На рис. 40 представлены схемы, иллюстрирующие продольный (рис. 40 а) и поперечный (рис. 40 б, в) пьезоэффекты, и обозначены знаки возникающих зарядов. Для эффективного использования поперечного пьезоэффекта две пластины пьезоматериалов соединяют параллельно (рис. 40 б), прокладывают между ними проводящую прокладку и закрепляют их, как консольную балку. Образующийся заряд возникает на зажимах, как показано на рисунке. При действии силы  $F$  верхняя пластина растягивает-

ся, а нижняя сжимается, и заряд возникает на боковых относительно действующих напряжений сторонах пластин. В такой конструкции чувствительность преобразования  $F \rightarrow q$  существенно выше.

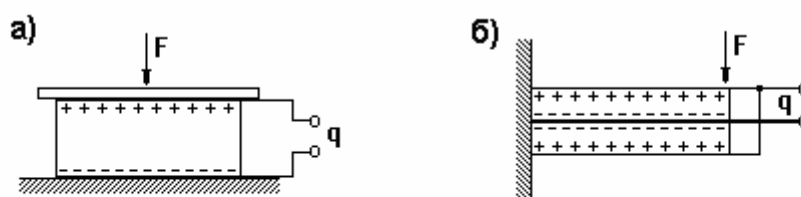


Рис. 40. Продольный а) и поперечный б) пьезоэффекты

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

Затрудняет применение кварца трудоемкость обработки и очень высокое удельное сопротивление, достигающее  $(10^{15} - 10^{16}) \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Поверхностное сопротивление кварца гораздо меньше, поэтому для предотвращения утечки заряда приходится применять хорошую изоляцию, а также тщательно обрабатывать поверхности и герметизировать датчики. Во избежание утечек заряда изоляция между проводами в соединительном кабеле должна быть очень высокой, а емкость между ними минимальной.

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

Пьезокерамики изготавливаются из сегнетоэлектриков, которые не являются кристаллическими веществами и их домены расположены хаотично. Сегнетоэлектрики сильно измельчают, а затем спекают с вяжущим веществом в сильном электростатическом поле. Характеристики некоторых пьезоэлектрических материалов приведены в таблице 5.

Допустимое механическое напряжение для всех материалов

$$(80 \div 90)10^6 \text{ Н/м}^2.$$

Таблица 5

**Сравнительные характеристики пьезоэлектрических материалов**

Материал	Коэффициент пьезочувствительности $K_{II} [Кл / Н]$		$\epsilon$	Точка Кюри °С
	продольной	поперечной		
Кристалл кварца	$2,31 \cdot 10^{-12}$	$2,31 \cdot 10^{-12}$	4,5	530
Титанат бария	$78 \cdot 10^{-12}$	$78 \cdot 10^{-12}$	1700	150
Цирконато-титанат свинца (ЦТС)	$(100 - 300)10^{-12}$	$(30 - 160)10^{-12}$	1300	до 400

Из сказанного ясно, что на основе подобных материалов, обладающих пьезоэффектом, могут быть созданы пьезоэлектрические датчики силы, ускорения и давления. От подобных тензорезистивных датчиков пьезоэлектрические отличаются повышенной температурной стойкостью и по

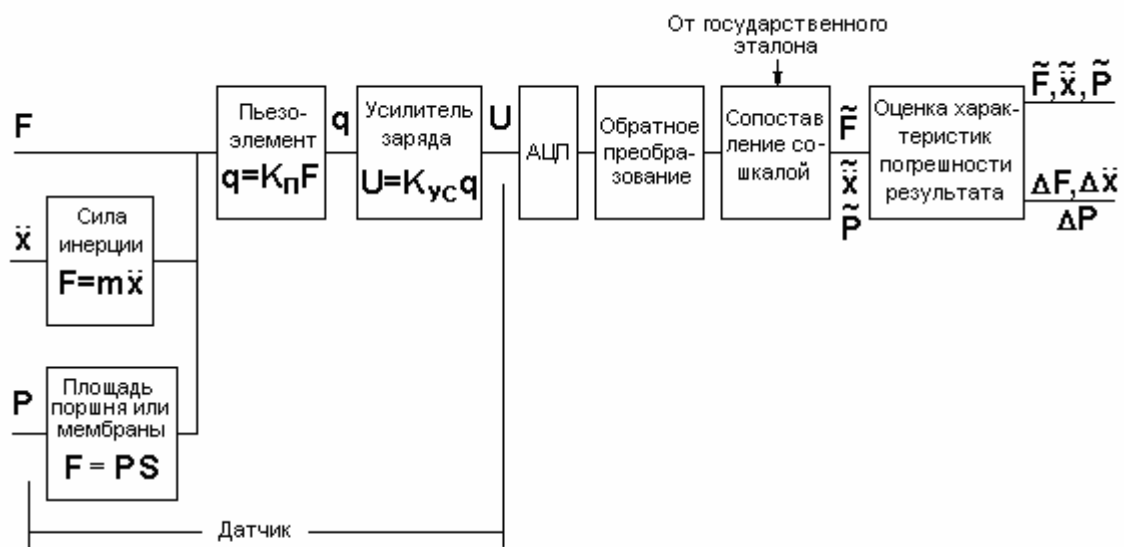


Рис. 41. Измерительные преобразования при измерении силы, ускорения и давления с помощью пьезоэлектрических датчиков

вышенной надежностью. Однако при невысоких температурах применения в связи с успехами в микротехнологии тензорезистивные датчики успешно конкурируют с пьезоэлектрическими.

На рис. 41 показаны цепочки преобразований, которые выполняются с участием перечисленных датчиков. На этом рисунке усилитель заряда

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

Усилитель заряда – общий для всех типов пьезоэлектрических датчиков. Он представляет собой усилитель напряжения с большим коэффициентом усиления порядка  $10^5 \div 10^6$ , охваченный глубокой отрицательной емкостной обратной связью. В связи с этим усилитель является, по сути, конденсатором, на выходе которого развивается напряжение  $U_{\text{вых}} \approx q / C_{\text{ос}}$ , где  $C_{\text{ос}} = (50 \div 100)$  пФ - емкость конденсатора, стоящего в цепи обратной связи. Упрощенная схема такого усилителя представлена на рис. 42. Параллельно с конденсатором обратной связи включается активное сопротивление  $R_{\text{ос}} \approx 10^{10}$  Ом. Современная элементная база позволяет достичь чувствительности усилителя заряда до 1 В/пКл.

Рассмотрим характерные конструктивные особенности пьезоэлектрических датчиков.

Схемы воздействия силы на пьезоэлемент датчика представлены на рис. 43. Для того, чтобы обеспечить наилучшую изоляцию, в датчике силы, работающем по принципу, показанному на рис. 43 а), используется изоляция, которая обеспечивается самим пьезоэлементом. Для этого применяется составной пьезоэлемент, состоящий из двух пластин, между которыми проложена проводящая прокладка

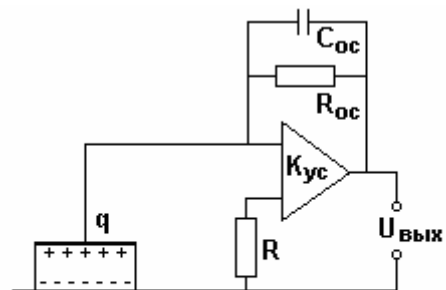


Рис. 42. Усилитель заряда

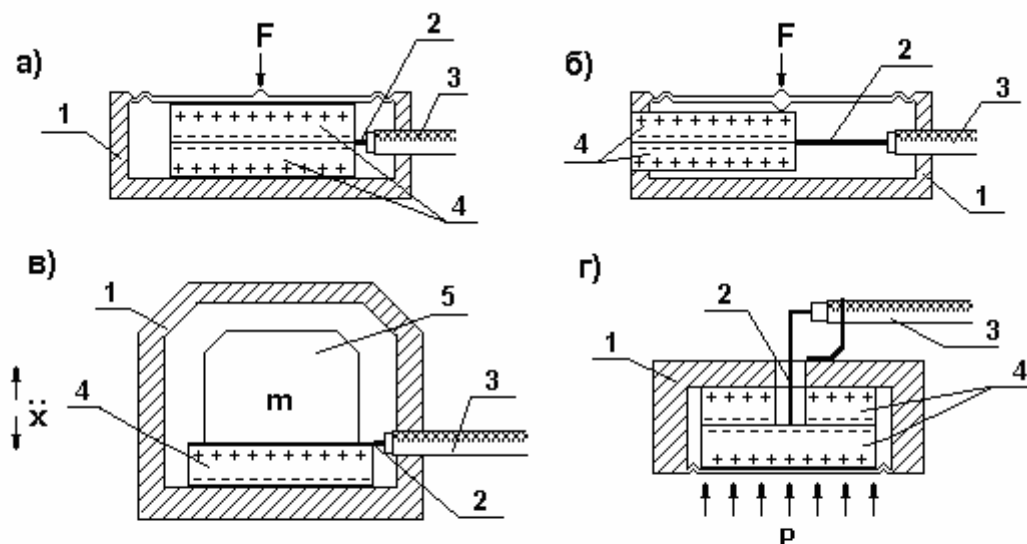


Рис. 43. Взаимное расположение элементов пьезоэлектрических датчиков силы а) и б), ускорения в) и давления г)

(см. рис. 43 а). Используется продольный пьезоэффект, пластины пьезоэлементов 4 соединяются и располагаются так, чтобы заряды, возникающие под действием измеряемой силы, были направлены навстречу друг другу. Электрическое соединение пластин – параллельное. Поскольку верхняя и нижняя пластины вынуждены контактировать корпусом датчика 1, отвод заряда с них осуществляется с помощью коаксиального кабеля, центральный провод которого 2 присоединен к внутренним сторонам пластин пьезоэлементов, а внешняя оболочка 3 соединяется с корпусом. Далее следует усилитель заряда и все последующие преобразователи. Точно так же обеспечивается наилучшая изоляция и в случае использования поперечного пьезоэффекта в соответствии с рис. 43 б). Подобная схема размещения пьезоэлементов показана на рис. 43 г) и является типичной также для датчиков давления. Для датчика ускорения, в котором тело 5 с массой  $m$  не контактирует с корпусом, эта схема не используется.

С развитием полупроводниковой микротехнологии тензорезистивные датчики давления и ускорения становятся все более серьезными конкурентами пьезоэлектрических датчиков тех же измеряемых величин. Единственной позицией, которую прочно занимают пьезоэлектрические датчики, является измерение очень высоких импульсных давлений при высоких температурах. Примером таких измерений могут служить измерения дав-



ления взрыва в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания: дизельных и бензиновых. В этой области наилучшими характеристиками обладают пьезоэлектрические датчики с водяным охлаждением фирмы "Kistler" (Германия). Точность датчиков фирмы "Kistler" составляет 0.2% на пределах измерения до 20.0 МПа и выше. Частотная полоса – до 80.0 кГц. Фирмой выпускаются одноосные, двухосные и трехосные пьезоэлектрические датчики ускорения. Высокочувствительные миниатюрные пьезоэлектрические датчики ускорения с выходным сигналом в виде заряда или напряжения выпускает также фирма Bruel & Kjaer (Дания) с частотным диапазоном до 50 кГц. Масса датчиков – от 3 г до 12 г. Пьезоэлектрические датчики для сейсмических измерений, в частности, с целью раннего прогнозирования землетрясений выпускает фирма PCB Piezotronics.

Погрешность лучших современных пьезоэлектрических датчиков ускорения достигает  $(0,2 \div 0,5) \%$ .

### 5.5. Емкостные датчики

Емкостные датчики преобразуют измеряемую величину в изменение емкости конденсатора и являются параметрическими датчиками. Большинство емкостных датчиков представляют собой конденсатор с плоскопараллельными пластинами или коаксиальными цилиндрическими электродами. Емкость подобных датчиков равна

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d},$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала между пластинами,  $S$  – площадь пластин (электродов),  $d$  – расстояние между пластинами (электродами).

Из формулы видно, что емкостный датчик может выполнять преобразование путем воздействия измеряемой величины на значение диэлектрической проницаемости, на площади пластин (электродов) и на расстояние между пластинами (электродами).

Преобразование воздействием на диэлектрическую проницаемость выполняют такие емкостные датчики, как датчики уровня  $h_x$  негорючих жидкостей и датчики толщины  $\delta$  изоляционного материала, в том числе,

изоляционных покрытий. Принцип действия этих датчиков поясняется рис. 44 а) и 44 б).

Одна из конструкций датчика уровня представляет собой цилиндрический конденсатор, электродами которого являются полый цилиндр и отделенный от него изолятором внутренний стержень длиной  $h$  (рис. 44 а). При погружении в жидкость с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  на глубину  $h_x$ , емкость получившегося конденсатора будет линейно зависеть от  $h_x$ :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(R_1 / R_2)} [h_x \varepsilon + (h - h_x)] = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(R_1 / R_2)} [h + h_x(\varepsilon - 1)].$$

В подобных датчиках основная часть погрешности возникает из-за проводимости жидкости, вследствие чего при изменении уровня изменяются активные потери образованного таким образом конденсатора.

Принцип действия емкостного датчика толщины ленты диэлектрического материала, в том числе, бумаги в процессе изготовления показан на рис. 44 б). Лента толщиной  $\delta$  при изготовлении проходит между параллельными обкладками плоского конденсатора, расположенными на расстоянии  $d$  друг от друга. Относительная диэлектрическая проницаемость ленты равна  $\varepsilon$ , диэлектрическая проницаемость воздуха –  $\varepsilon_0$ . Площадь обкладок конденсатора  $S$ . Тогда емкость конденсатора зависит от измеряемой толщины следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{(d - \delta) + \delta / \varepsilon} = \frac{\varepsilon_0 S}{d - \delta(1 - 1 / \varepsilon)}.$$

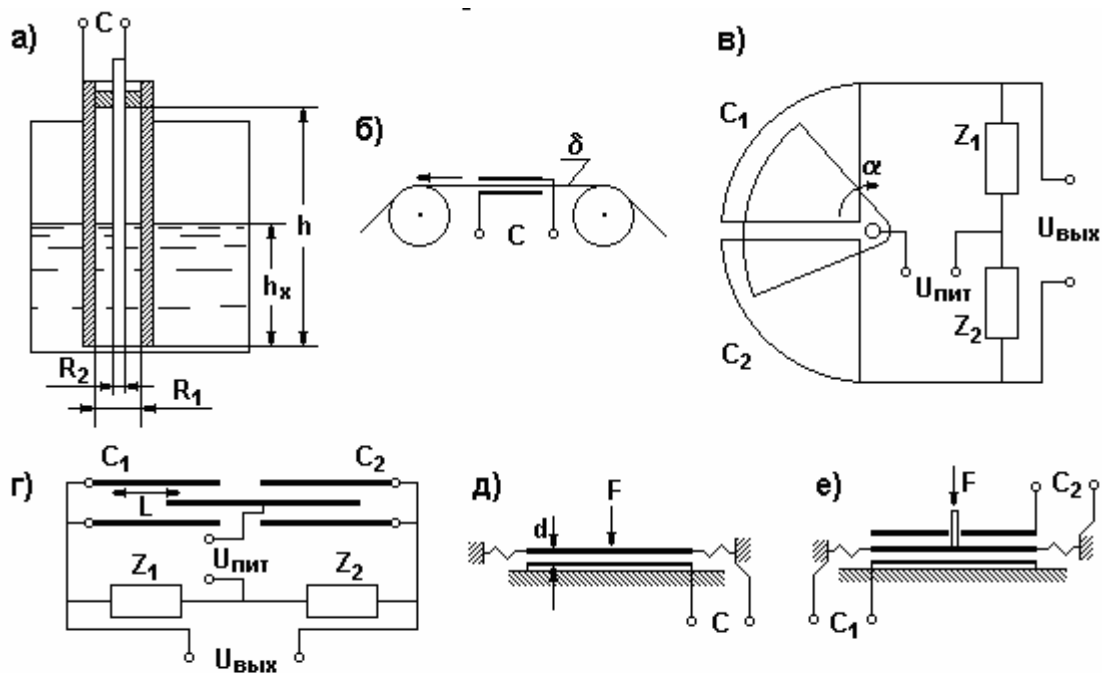


Рис. 44. Схемы емкостных датчиков

Емкостные датчики с изменяющейся площадью  $S$  обкладок (электродов) применяются при измерении, например, угла поворота  $\alpha$  (рис 44 в) или перемещений  $L$  в несколько десятков миллиметров (рис. 44 г). Эти датчики удобно включить в мост переменного тока, как показано на рисунках.

Наибольшее распространение получили емкостные датчики, в которых измеряемая величина преобразуется в малое перемещение обкладок конденсатора по направлению друг к другу. Такие датчики могут быть выполнены в двух вариантах, показанных на рис. 44 д) и 44 е). Расстояние  $d$  между обкладками датчиков, выполненных в соответствии с обычной дискретной технологией, составляет десятые доли миллиметра. То же расстояние у емкостных датчиков, изготовленных способами полупроводниковых микротехнологий, может быть уменьшено до тысячных долей миллиметра. Такое малое расстояние между обкладками конденсатора способствует увеличению емкости датчиков и тем самым - снижению влияния паразитных емкостей соединительных проводов, но при этом повышает чувствительность таких датчиков к температуре окружающей среды. Это происходит из-за того, что тепловое линейное расширение материалов, из которых они изготовлены, оказывается соизмеримым с величиной зазоров

между обкладками, и при разработке емкостных датчиков следует предусматривать конструктивные и иные меры уменьшения указанного влияния теплового расширения, а также средства надежного крепления неподвижных и подвижных обкладок во избежание малейших люфтов.

Кроме того нежелательным свойством одинарных емкостных датчиков (рис. 44 д) с малым зазором является возникновение силы притяжения между пластинами конденсатора, которая ранее в приборах электростатической системы была полезной. В дифференциальном преобразователе, представленном на рис. 44 е), эта сила может быть снижена до нуля.

Отрицательное влияние на емкостные датчики с малым зазором оказывает даже малейшее увлажнение и засорение обкладок. Поэтому их необходимо тщательно обрабатывать и герметизировать.

Начальная емкость емкостных датчиков с малым зазором  $C_0 = (10 \div 300)$  пФ.

На основе подобных емкостных датчиков могут быть созданы датчики силы, ускорения и давления. Средства для первоначального преобразования этих величин в малое перемещение – те же, что использовались выше в тензорезистивных датчиках.

Для создания датчика силы измеряемая сила преобразуется в малое перемещение с помощью упругого элемента, жесткость которого будет определять пределы измерения силы.

Чтобы преобразовать ускорение в малое перемещение используется сила инерции, действующей на тело с массой  $m$  и упругий элемент, преобразующий эту силу в перемещение. Значение массы и жесткость упругого элемента будут определять диапазон измеряемых ускорений и собственную частоту колебаний подвижной системы датчика.

Давление в малое перемещение преобразуется вначале в силу – через площадь мембраны  $S$ , а затем сила преобразуется в малое перемещение с помощью упругого элемента. Цепочки измерительных преобразований, выполняемых при применении емкостных датчиков, представлены на рис. 45. Ведущие фирмы мира применяют емкостные чувствительные элементы для создания датчиков ускорения и малых перемещений. Наиболее чувствительные емкостные датчики создаются с применением полупроводниковых микротехнологий.

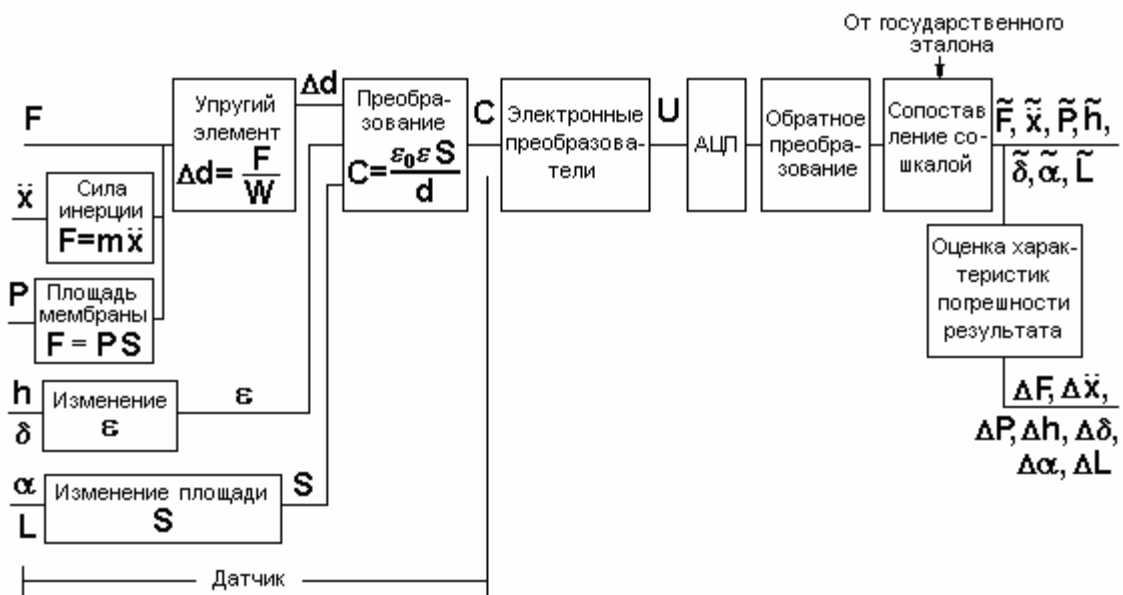


Рис. 45. Цепочки измерительных преобразований, выполняемых с участием емкостных датчиков

Так, фирма "Analog Devices" (США), известная своей микроэлектронной продукцией, выпускает малогабаритные емкостные датчики ускорения на кристалле кремния размером  $3.05 \times 3.05 \times 1.0$  мм с параметрами: зазор между обкладками конденсатора 1.3 мкм, емкость 0.1 пФ, максимальное изменение емкости 0.01 пФ, несущая частота 1 МГц, инерционная масса 0.1 мкг. Основная погрешность датчика не превышает 0,5%.

### 5.6. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики входят в класс электромагнитных преобразователей и являются параметрическими датчиками. Эти датчики выполняют преобразование измеряемой величины в изменение индуктивности за счет изменения параметров магнитной цепи катушки индуктивности.

Индуктивность катушки, намотанной медным проводом и содержащей  $w$  витков, в общем случае равна

$$L = \frac{w^2}{Z_M} = \frac{w^2}{R_M + jX_M},$$

где  $Z_M = R_M + jX_M$  – комплексное магнитное сопротивление цепи, по которой замыкается магнитное поле катушки.

Магнитные цепи большинства индуктивных датчиков устроены таким образом, чтобы потери в этих цепях были минимальны. Кроме того магнитные цепи этих датчиков состоят, в основном, из магнитомягкого материала, имеющего высокую магнитную проницаемость  $\mu$ , и одного или двух воздушных зазоров, магнитное сопротивление которых настолько велико, что оно, в основном, определяет магнитное сопротивление всей цепи. При зазоре, образованном двумя плоскими параллельными поверхностями, расстояние между которыми равно  $d$ , а площадь равна  $S$ , его магнитное сопротивление, а по вышесказанному, и магнитное сопротивление всей цепи равно

$$R_d = d / (\mu_0 \cdot S),$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха.

В результате начальная индуктивность реальных индуктивных датчиков с воздушными зазорами, площадь которых одинакова и равна  $S$ , а суммарная длина воздушного зазора равна  $d$ , выражается приближенной формулой

$$L = \frac{\mu_0 S}{d} w^2.$$

Приближенный характер формулы вызван влиянием полей рассеяния на краях воздушного зазора.

Из этой формулы видно, что на значение индуктивности катушки влияют только такие измеряемые величины, которые могут быть преобразованы в изменение площади  $S$  или величины зазора  $d$ , или, иными словами, в изменение магнитного сопротивления магнитной цепи датчика.

На первый взгляд, преимущество следовало бы отдать преобразованию измеряемой величины в изменении площади. Тогда преобразование было бы линейным. Но из-за краевых эффектов, вызванных рассеянием магнитного потока, линейность достигнута быть не может. Кроме того возникают конструктивные сложности организации подобного преобразования. Поэтому в большинстве индуктивных датчиков используется зависимость индуктивности либо от изменяемой величины зазора, либо от из-

менения магнитного сопротивления всей цепи в целом за счет перемещения сердечника внутри катушки вдоль ее оси.

Существенным достоинством индуктивных датчиков, которое оправдывает их промышленное применение, является значительная мощность выходного сигнала, которая существенно превышает мощность выходных сигналов емкостного, пьезоэлектрического и тензорезистивного датчиков.

## 5.7. Гальваномагнитные датчики

Гальваномагнитные датчики предназначены для преобразования индукции магнитного поля в напряжение или сопротивление.

Гальваномагнитные датчики основаны на физическом воздействии магнитного поля и носителей зарядов, которые движутся в полупроводниках, находящихся в этом магнитном поле. Практическое применение получили датчики, изготовленные из материалов, в которых используются два эффекта: Холла и Гаусса. Эффект Холла позволяет преобразовать магнитную индукцию в напряжение. Датчики, в которых применяется этот эффект называются *датчиками Холла*.

Эффект Гаусса заключается в изменении электрического сопротивления материала под действием магнитного поля, и поэтому датчики, использующие этот эффект, называются *магниторезисторами*.

### 5.7.1. Гальваномагнитные датчики Холла

Эффект Холла возникает в тонкой полупроводниковой пластинке или пленке, по которой идет ток. Если эта пластина или пленка находится в магнитном поле, направленном перпендикулярно ее поверхности, то носители зарядов отклоняются из-за действия силы Лоренца, равной  $F = e \cdot v \cdot B$ , где  $e$  - заряд носителя, движущегося со скоростью  $v$  перпендикулярно магнитному потоку, индукция которого равна  $B$ . Сила Лоренца действует перпендикулярно направлению движения носителей заряда и перпендикулярно направлению магнитного поля. В результате на одной боковой стороне пластины количество носителей зарядов увеличивается, а на другой - уменьшается, и между ними возникает разность потенциалов (ЭДС Холла).

Для того, чтобы плотность тока была равномерной по ширине пластины, электроды, подводящие ток, припаиваются или привариваются по всей ширине пластины. Электроды, с помощью которых с боковых сторон снимается ЭДС Холла (холловы электроды), привариваются к серединам сторон так, чтобы при отсутствии магнитного поля они оказались на эквипотенциальной линии. Диаметр контактной площадки этих электродов с пластиной обозначим через  $a$ . Остальные размеры:  $l$  – длина пластины,  $b$  – ширина пластины,  $d$  – толщина пластины (см. рис. 46, на котором магнитное поле направлено от читателя). Если  $l/b = 2$  и  $a/l < 0.1$ , то ЭДС Холла равна

$$E_{\text{хл}} = \frac{R_{\text{хл}}}{d} IB \cdot \cos\alpha,$$

где  $R_{\text{хл}}$  – постоянная Холла, зависящая от свойств материала пластины (пленки),  $d$  – толщина материала,  $I$  – сила тока,  $B$  – магнитная индукция,  $\alpha$  – угол между вектором магнитного поля и магнитной осью пластины, близко совпадающей с нормалью к ее плоскости.

Из этого выражения видно, что при постоянном токе через полупроводниковую пластину или пленку и при  $\alpha = 0$  ЭДС Холла определяется значением магнитной индукции  $B$ , для измерения которой и применяется этот датчик. Кроме того из этого же выражения следует, что датчик Холла может применяться и для перемножения двух величин: тока и магнитной индукции (или величины, которая может быть преобразована в нее).

Основные полупроводниковые материалы, из которых изготавливаются серийные датчики Холла, это арсенид индия InAs, антимонид индия InSb или арсенид галлия GaAs. Делаются также датчики Холла из германия и кремния. Датчики выполняются в виде тонких пластин или пленок на подложках из слюды, ультрафарфора или стекла. Толщина  $d$  этих пленок составляет от 10 мкм до 200 мкм.

Размеры  $l$  и  $b$  поверхностей датчиков составляют единицы миллиметров.

С помощью датчиков Холла обычно измеряется индукция магнитного поля в труднодоступных местах, подход к которым возможен с одной стороны. Поэтому все четыре проводника подходят к датчику также с одной стороны, как это показано на рис. 46.



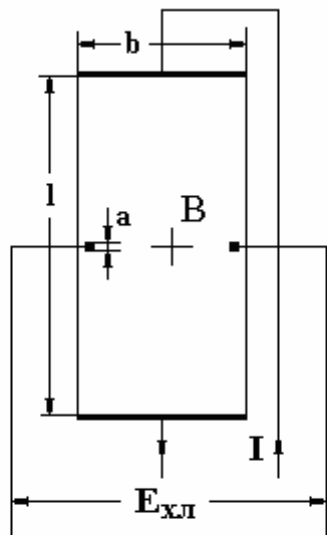


Рис. 46. Схема и размеры датчика Холла

Входное сопротивление датчика Холла – это сопротивление между токовыми электродами, оно может составлять от 0.5 Ом до нескольких кОм. Выходное сопротивление датчиков Холла – это сопротивление между холловыми электродами. У серийно выпускаемых датчиков значения этих сопротивлений близки. Вследствие того, что в условиях применения датчиков Холла в полупроводнике возникает и эффект Гаусса, входное и выходное сопротивление с ростом магнитной индукции увеличиваются.

#### Основные характеристики датчиков Холла.

Основными характеристиками датчиков Холла, как любого средства измерений, являются метрологические характеристики, и первыми среди них – характеристики погрешности. Из-за большого количества причин, порождающих погрешности, они будут рассмотрены подробно в следующем пункте. Здесь будут представлены характеристики чувствительности и динамические характеристики датчиков Холла, а также варианты использования этих датчиков для измерения мощности и силы электрического тока.

*Гальваномагнитная чувствительность* при  $\alpha = 0$  определяется выражением

$$S_{BI} = R_{хл} / d ,$$

и для различных типов датчиков составляет (0.3 ÷ 10) В/(А·Тл).

*Чувствительность датчиков Холла к магнитной индукции* определяется при номинальном значении тока  $I_{ном} = const$ , как  $S_B = R_{хл} I_{ном} / d$ . Для серийно выпускаемых датчиков Холла значение этой чувствительности лежит в пределах (0.03 – 1) В/Тл. Значение силы номинального тока у различных датчиков различно. Ограничение силы тока определяется температурой перегрева датчика. Для высокоомных датчиков допустимая сила

тока не превышает 50 мА, для низкоомных – 200 мА. В сильных полях появляется нелинейность, которая для лучших датчиков составляет (0.1 – 1.0)%.

*Чувствительность к току* определяется при постоянном значении магнитной индукции, как  $S_I = R_{хл} B / d$ . При индукции 1 Тл чувствительность датчиков Холла к току лежит в пределах (0.3 – 50)В/А.

*Остаточное напряжение* датчика Холла действует между холловыми электродами при прохождении по датчику электрического тока, но при отсутствии магнитного поля. Причиной возникновения остаточного напряжения является неточное расположение холловых электродов на эквипотенциальной линии. Причиной возникновения остаточного напряжения является также термоЭДС, которая при градиенте температуры между холловыми электродами в 0.1 °С может достигать от 10 мкВ до 100 мкВ. Для уменьшения температурного градиента датчик Холла располагают либо на теплопроводной подложке, либо на подложке с помощью теплопроводной, но электроизолирующей пасты.

*Динамические характеристики* датчиков Холла определяются временем установления ЭДС Холла при ступенчатом изменении индукции магнитного поля или силы тока. Для обычно используемых материалов это время лежит в пределах  $(10^{-11} \div 10^{-13})$  с, поэтому датчик Холла может быть использован и для измерения индукции переменного магнитного поля, а также для перемножения переменных тока и индукции. В частности, если частота переменного тока и магнитной индукции совпадают и равна  $\omega$ , то ЭДС Холла

$$E_{хл} = \frac{R_{хл}}{d} BI \cos\varphi + \frac{R_{хл}}{d} BI \cos(2\omega t + \varphi).$$

Постоянная составляющая этого выражения может быть отделена от переменной составляющей путем фильтрации, и тогда с помощью датчика Холла может быть построен ваттметр для измерения активной и реактивной мощности электрического тока. Ток в нагрузке должен быть преобразован в индукцию магнитного поля, как это показано на рис. 47, а напряжение на нагрузке – в ток через датчик Холла. Сила тока нагрузки, как правило, велика и составляет от десятков до десятков и сотен тысяч ампер. Удобным способом преобразования сильных токов в индукцию является

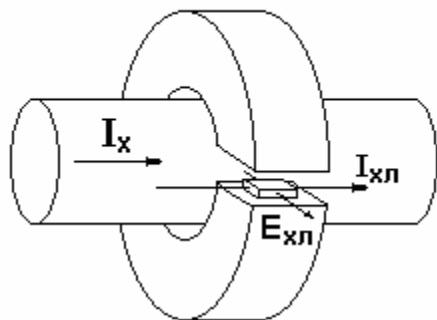


Рис. 47. К принципу измерения силы постоянного тока с помощью датчика Холла

последующим применением датчика Холла применяется, например, фирмой АВВ для измерения и регистрации больших постоянных токов (см. рис. 47).

Кроме того этот прием позволяет обеспечить гальваническую развязку средства измерений от мощной электрической цепи, что способствует эффективной борьбе с помехами (см. разд. 4.4) и обеспечивает безопасность персонала.

### 5.7.2. Источники погрешности датчиков Холла

1. Нестабильность тока, пропускаемого через датчик. Метод уменьшения этой погрешности – стабилизация тока.

2. Собственное магнитное поле, создаваемое витком с током (см. рис. 46). Направление этого поля совпадает или противоположно направлению полю, индукция которого измеряется. Индукция собственного поля датчика в отсутствии близко расположенных ферромагнитных тел обычно не превышает  $10^{-6} \div 10^{-4}$  Тл. Но на практике приходится измерять индукцию магнитного поля в довольно узких зазорах электрических машин и аппаратов. В этой ситуации, когда ферромагнитные детали объекта расположены в непосредственной близости от датчика, индукция собственного магнитного поля достигает  $5 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3}$  Тл, что приводит к существенной погрешности измерения.

концентрация магнитного потока, окружающего проводник с током, с помощью магнитопровода, который охватывает этот проводник, как это схематически показано на рис. 47 и как это делается в токовых клещах. В зазор магнитопровода, индукция в котором пропорциональна силе тока, вводится датчик Холла, и через него пропускается ток, пропорциональный напряжению. Подобное преобразование тока в индукцию магнитного поля с

Метод уменьшения этой погрешности - проведение обратного провода тока точно под серединой датчика Холла, так, чтобы виток, образуемый проводами, подводящими ток к датчику, имел минимальную площадь, как это показано на рис. 48 а).

3. Погрешность нуля (аддитивная составляющая) вызвана неточностью присоединения холловых электродов к эквипотенциальной линии датчика. Для хотя бы частичного устранения этой причины можно использовать регулируемый делитель напряжения, представленный на рис. 48 б). Этот делитель составлен из высокоомных сопротивлений, центральное сопротивление этого делителя – регулируемое.

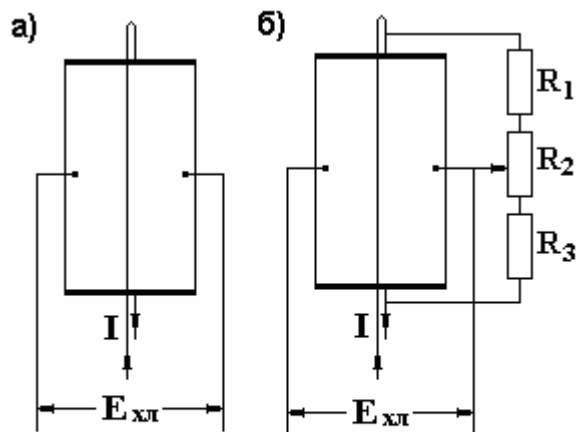


Рис. 48. Способы уменьшения погрешности датчиков Холла

4. Температурные погрешности возникают из-за нескольких причин. Первая из них – нагревание датчика проходящим через него током. Вторая причина - нагревание датчика от внешних источников тепла. Третья причина – термоЭДС в цепи холловых электродов.

Четвертая причина - изменение температуры датчика вследствие эффекта Пельтье, возникающего в цепи тока.

В силу действия этих причин изменяется температура датчика, а вместе с ней изменяется и градиент температуры между точками присоединения холловых электродов. Метод борьбы с температурными погрешностями с помощью теплопроводящих паст изложен выше в разд. 5.7.1. Он сводится к уменьшению градиента температуры практически до нуля.

5. Нелинейность датчика в сильном поле. Метод коррекции - линеаризация при известной функции прямого или обратного преобразования.

Основная погрешность большинства серийно выпускаемых и применяемых датчиков Холла не превышает (0.5 ÷ 1.0)%. Использование сложных методов коррекции погрешностей и термостатирование датчика при его применении позволяет достичь погрешности 0.2%.

### 5.7.3. Магниторезистивные датчики

Магниторезистивные датчики или *магниторезисторы* представляют собой разновидность гальваноманитных датчиков, в которых под действием магнитного поля изменяется сопротивление электрическому току. В этом проявляется эффект Гаусса. Под действием магнитного поля траектории носителей заряда искривляются, скорость их движения в направлении электрического поля замедляется, и следовательно, увеличивается сопротивление. Уравнение преобразования индукции магнитного поля в сопротивление терморезистора выглядит следующим образом:

$$R_B = R_{B=0} \cdot \left(1 + A \cdot |uB|^m\right),$$

где  $R_{B=0}$  – сопротивление магниторезистора при отсутствии магнитного поля,  $A$  – магниторезистивный коэффициент, зависящий от материала и формы магниторезистора,  $u$  – подвижность носителей заряда,  $B$  – индукция магнитного поля,  $m$  – показатель степени, равный 2 в слабых полях, когда  $uB < 1$ , и равный 1, когда  $uB > 1$ .

Функция преобразования магнитной индукции в сопротивление четная, поэтому сопротивление магниторезистора увеличивается как в постоянном, так и в переменном магнитном поле. Максимальная чувствительность достигается, когда магнитная ось магниторезистора направлена по направлению внешнего поля или против него. Кроме того чувствительность магниторезистора зависит от его формы, а именно, от отношения длины резистора к площади его поперечного сечения: чем больше это отношение, тем больше коэффициент  $A$ , и тем больше чувствительность.

Лучшие материалы для изготовления магниторезисторов: антимонид индия InSb, арсенид индия InAs и сплавы антимонида индия с антимонидом никеля NiSb.

Основными характеристиками магниторезисторов являются: начальное сопротивление  $R_{B=0}$  и чувствительность  $S_B = dR / dB$ . Ток питания магниторезисторов разных типов лежит в пределах от 1 мА до 100 мА в зависимости от его начального сопротивления, которое может принимать значения от сотых долей Ом до десятков кОм. Рабочий диапазон температуры применения магниторезистора  $(-273 \div +327)^\circ\text{C}$ .

Частотные характеристики магниторезисторов простираются до 10 МГц.

Применение магниторезисторов пока ограничивается вследствие технологических трудностей обеспечения повторяемости их метрологических характеристик. Поэтому их основным применением является использование в релейном режиме с целью, например, фиксации наличия или отсутствия магнитного поля или превышения индукцией магнитного поля некоторого заданного уровня.

### 5.8. Датчики скорости вращения

Наиболее распространенными датчиками скорости вращения являются аналоговые датчики – *тахогенераторы* и дискретные датчики - преобразователи скорости вращения в частоту импульсов.

Тахогенератор – это коллекторный генератор постоянного тока, статор которого изготовлен из хорошо стабилизированных постоянных магнитов, обеспечивающих погрешность воспроизведения индукции магнитного поля в зазоре до 0.05%. В этом поле вращается ротор с обмоткой, скорость которого равна измеряемой скорости вращения. В обмотке ротора возбуждается постоянное напряжение, пропорциональное скорости его вращения. Это напряжение через коллектор подается на выходные зажимы. В результате в условиях эксплуатации предельно достижимая погрешность тахогенератора может достигать значения 0.2%.

Принцип работы простейших дискретных датчиков скорости вращения заключается в счете числа оборотов  $N$  в единицу времени. Для измерения больших скоростей с удовлетворительной точностью этого достаточно. Однако для измерения малых скоростей с повышенной точностью применяются датчики, у которых частота импульсов на выходе - есть величина, кратная числу оборотов в минуту, а именно  $f_{имп} = K \cdot N$ . Преобразование частоты в код выполняется с помощью соответствующего АЦП.

Ввиду многообразия дискретных датчиков скорости вращения приведем лишь отдельные примеры оптических и магниторезистивных датчиков, представленные на рис. 49.

В простейшем оптическом датчике скорости вращения (см. рис. 49 а) используется диск 1 с  $K$  отверстиями или прорезями. Этот диск монтирует-

ся на вал, скорость вращения которого требуется измерить. По одну сторону диска устанавливается источник света 2, по другую – приемник света 3, в качестве которого может быть использован фотодиод или фототриод. При вращении вала, а вместе с ним и диска свет, попадающий на приемник, прерывается  $K$  раз за один оборот, и частота следования импульсов от фотоприемника будет равна  $f_{имп} = K \cdot N$ , где  $N$  – измеряемая скорость вращения. Эти импульсы от фотоприемника воспринимаются электронной схемой, усиливаются и формируются в виде потока однородных импульсов напряжения или тока.

При невозможности установить на вал подобный диск в датчике скорости вращения может использоваться отраженный свет, как, например, показано на рис. 49 б). На поверхность вала с помощью специальной краски или иного материала параллельно оси вращения с равномерным шагом наносятся  $K$  полос 1. Луч света от источника 2 направляется на поверхность вала, а фотоприемник воспринимает отраженный свет. Если вал

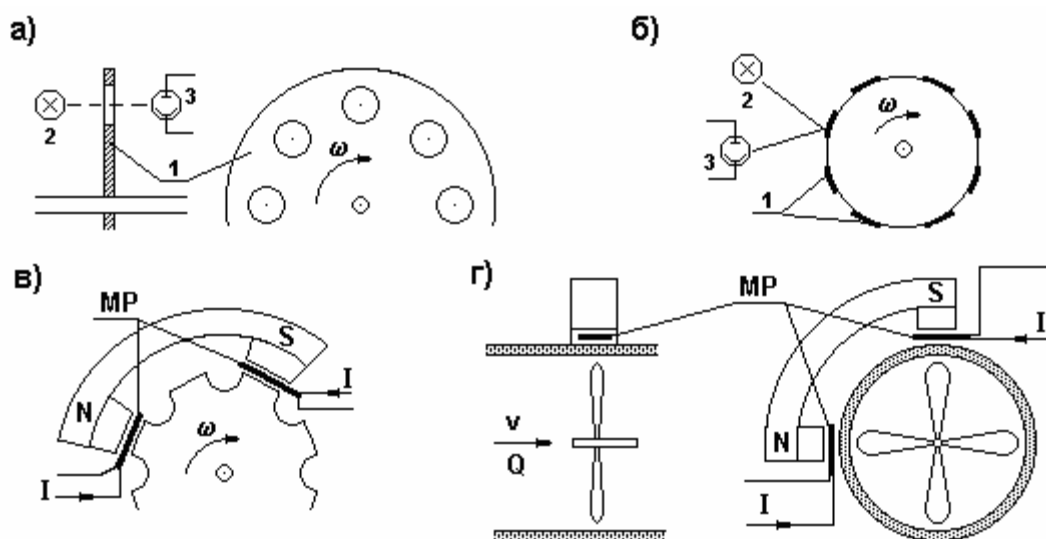


Рис. 49. Примеры датчиков скорости вращения

темный, наносят светлые полосы, если вал отшлифован и хорошо отражает свет, полосы – темные. И в этом случае частота импульсов света, воспринимаемых фотоприемником, также равна  $f_{имп} = K \cdot N$ , где  $N$  - измеряемая скорость вращения.

Для применения магниторезистивного датчика скорости вращения на вал устанавливается зубчатое колесо с  $K$  зубцами или используется имеющаяся на объекте шестерня из магнитного материала. На некотором расстоянии от этого зубчатого колеса монтируется магнит с полюсными наконечниками так, чтобы расстояние по дуге между ними было кратно шагу зубчатого колеса, как это показано на рис. 49 в). На полюсных наконечниках магнита устанавливаются магниторезисторы, сопротивление которых увеличивается при совпадении зубцов колеса с полюсами магнита. За один оборот колеса или шестерни количество таких совпадений будет равно  $K$ . При питании магниторезисторов постоянным током  $I$  на них за один оборот колеса возникнет  $K$  импульсов напряжения, которые затем могут быть усилены, и из них сформируются импульсы одинаковой формы. Частота импульсов равна  $f_{имп} = K \cdot N$ , где  $N$  – скорость вращения зубчатого колеса или шестерни.

Аналогичным образом может быть измерена скорость вращения турбинного расходомера, расположенного в трубе (или в специальной вставке) из немагнитного материала. Такой метод можно применять для измерения скорости движения  $v$  по трубе или расхода  $Q$  горючих жидкостей и газов. Для его реализации в немагнитную вставку или в трубу из немагнитного материала монтируется крыльчатка из магнитомягкого материала с  $2K$  лопастями. На наружной поверхности трубы устанавливается магнит с полюсными наконечниками и магниторезисторы МР, как показано на рис. 49 г). При движении по трубе жидкости или газа крыльчатка вращается со скоростью, пропорциональной скорости движения среды. Сопротивление тензорезисторов будет изменяться с той же частотой, то есть  $f_{имп} = K \cdot N$ , где  $N$  – скорость вращения крыльчатки.

Для измерения экстремально малых скоростей могут быть полезными угловые индуктосины с малым шагом обмоток.

Для применения в многоканальных измерительных информационных системах наиболее удобными датчиками скорости являются тахогенераторы, поскольку их выходной сигнал есть постоянное напряжение, зависящее от измеряемой скорости. Этот сигнал того же вида, что и сигналы в других каналах системы.



## 5.9. Метрологические характеристики датчиков

Все датчики являются представителями наиболее обширной группы измерительных преобразователей. В настоящее время большинство датчиков – это аналоговые измерительные преобразователи, хотя с развитием микроэлектроники количество датчиков с дискретным (цифровым) выходным сигналом неуклонно возрастает. Это происходит в результате объединения чувствительных элементов датчиков с микроэлектронными преобразователями и АЦП. Характеристики преобразования датчиков стремятся сделать линейными, но это удается далеко не всегда.

1\*. Для линейных датчиков нормируются следующие метрологические характеристики:

- диапазон изменения входного сигнала измерительной информации,
- коэффициент преобразования, представляется своим номинальным значением,
  - для датчиков электрических величин - входное сопротивление или импеданс с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него,
  - выходное сопротивление или импеданс с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него,
  - пределы основной относительной погрешности в виде двучленной формулы (27), нормируются посредством указания значений коэффициентов  $c$  и  $d$ ; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется раздельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих,
    - для некоторых датчиков, например датчиков температуры нормируется абсолютная погрешность,
    - пределы допускаемой дополнительной погрешности (по каждой из влияющих величин раздельно),
    - одна из полных динамических характеристик, соответствующих назначению преобразователя, в обоснованных случаях допускается нормировать частные динамические характеристики с указанием номинальных значений и пределов допускаемых отклонений от них.

В соответствии с ГОСТ 8.009 случайная составляющая считается существенной, если ее среднеквадратическое значение составляет не менее 10% от общей погрешности.

**2\***. Для преобразователей с незначительной нелинейностью, которая рассматривается, как причина *погрешности от нелинейности*, в соответствии с материалами, приведенными выше, мультипликативная погрешность выделена быть не может. Поэтому для таких преобразователей основная погрешность нормируется пределом допускаемой основной приведенной погрешности, как для аналоговых приборов. Все остальные метрологические характеристики те же, что и у линейных аналоговых преобразователей. Заметим только, что в этом случае из-за нелинейности преобразователей нормируются частные динамические характеристики, чаще всего время реакции.

**3\***. Для преобразователей с существенной нелинейностью нормируются те же характеристики, что и в предыдущем случае, за исключением коэффициента преобразования и полных динамических характеристик, которые не применимы к нелинейным преобразователям.

Вместо коэффициента преобразования указывается номинальная функция преобразования в виде функциональной зависимости, графика или таблицы. Отклонения реальных функций преобразования от номинальной учитываются в составе основной погрешности, нормируемой, как в предыдущем случае, в форме приведенной погрешности.

В качестве динамической характеристики нормируется, как правило, частная динамическая характеристика – время реакции.

## **БИБЛИОГРАФИЯ**

1. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е.С.Левшина, П.В.Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
2. Солопченко Г.Н. Электроника и информационно-измерительная техника. Часть 2. Информационно-измерительная техника. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010, 212 с.
3. Авдеев Б.Я., Основы метрологии и электрические измерения/ Б.Я.Авдеев [и др.]; под общ. ред. Е.М.Душина. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
4. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений / С.А.Спектор. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
5. Харт Х. Введение в измерительную технику / Х.Харт – М.: Мир, 1999. – 391 с.
6. Тартаковский Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учеб. для вузов / Д.Ф.Тартаковский, А.С.Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.
7. Измерительная информационная техника и метрология: лабораторный практикум В 5 ч. / В.А.Андрианов [и др.]; под общ. ред. Г.Н.Солопченко: – СПб.: Изд-во СПбГПУ. 2003.