

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра метрологии и стандартизации

В.Т.Ревин

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Учебное пособие
для студентов специальности 54 01 01
«Метрология, стандартизация и сертификация»

В 5-ти частях

Часть 1

Минск 2002

УДК 621. 317.7 + 389.1 (075.8)

ББК 30. 10 я 73

Р 32

Рецензент: науч. сотрудник ИМАФ НАН Беларуси, канд. физ.-мат. наук
А.В.Исаевич

Ревин В.Т.

Р 32 Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учеб. пособие для студентов специальности 54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация». В 5 ч. Ч. 1/В.Т.Ревин. - Мн.: БГУИР, 2002. – 70 с.: ил.
ISBN 985-444-373-6 (ч. 1).

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности "Метрология, стандартизация и сертификация". Материал изложен с учетом требований программ дисциплин, по которым осуществляется подготовка инженеров-метрологов в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, и охватывает ряд вопросов, касающихся преобразования неэлектрических и электрических величин.

В пособии рассматриваются основные термины и определения в области преобразования измерительной информации, классификация методов преобразования и преобразователей неэлектрических и электрических величин, конкретные типы параметрических и генераторных измерительных преобразователей, используемых для преобразования неэлектрических величин в электрические. Приводятся основные характеристики измерительных преобразователей, определяющие область их применения, функции преобразования, чувствительность, и оценивается погрешность преобразования.

УДК 621. 317.7 + 389.1 (075.8)

ББКЗО. 10 я 73

ISBN 985-444-373-6 (ч.1)

ISBN 985-444-372-8

© В.Т.Ревин, 2002

© БГУИР, 2002

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1 Измерительные преобразователи

- 1.1 Основные термины и определения
- 1.2 Генераторные преобразователи
- 1.3 Параметрические преобразователи
- 1.4 Комбинированные преобразователи
- 1.5 Влияющие величины
- 1.6 Измерительные цепи преобразователей
 - 1.6.1 Измерительные цепи генераторных преобразователей
 - 1.6.2 Измерительные цепи параметрических преобразователей
 - 1.6.3 Измерительные цепи с генерированием синусоидальных колебаний

2 Метрологические характеристики измерительных преобразователей

- 2.1 Основные технические характеристики
- 2.2 Погрешности измерительных преобразователей
- 2.3 Методы уменьшения погрешностей преобразования

3 Генераторные измерительные преобразователи

- 3.1 Индукционные измерительные преобразователи
 - 3.1.1 Принцип действия индукционных преобразователей
 - 3.1.2 Преобразователи скорости и вибрации
 - 3.1.3 Тахометрические преобразователи
 - 3.1.4 Импульсные преобразователи
 - 3.1.5 Погрешность индукционных преобразователей
- 3.2 Пьезоэлектрические измерительные преобразователи
 - 3.2.1 Принцип действия пьезоэлектрических преобразователей
 - 3.2.2 Кварц (SiO_2)
 - 3.2.3 Пьезоэлектрическая керамика
 - 3.2.4 Пьезоэлектрические преобразователи силы, давления и ускорения
 - 3.2.5 Пьезорезонансные преобразователи
 - 3.2.6 Погрешности пьезоэлектрических преобразователей
- 3.3 Термоэлектрические измерительные преобразователи
 - 3.3.1 Принцип действия термоэлектрических преобразователей
 - 3.3.2 Схемы включения термоэлектрических преобразователей
 - 3.3.3 Погрешности термоэлектрических преобразователей
- 3.4 Фотоэлектрические преобразователи
 - 3.4.1 Принцип действия фотоэлектрических преобразователей
 - 3.4.2 Область применения фотоэлектрических преобразователей
- 3.5 Гальванические преобразователи

Литература

ВВЕДЕНИЕ

Современный мир насыщен измерениями; знание, не имеющее количественного выражения, теряет ценность. Понятие "наука" все менее ассоциируется со знаниями, не преобразованными в числа.

Поль Валери

Поль Валери, вероятно, не подозревал, насколько актуальным станет его утверждение в наши дни. Современный мир, действительно, все более пронизывается измерениями.

Мы со всей очевидностью понимаем, что без измерений невозможны прогресс в науке и расширение границ познания окружающего мира, пределы которого не достигнуты и не будут достигнуты никогда. В настоящее время измерения играют все более важную роль в промышленности, насыщенной сложнейшей автоматикой и робототехникой. Без них невозможны контроль качества продукции, производство и расходование энергии, борьба с загрязнением окружающей среды и др. Таким образом, измерения становятся существенным фактором экономики и к ним следует относиться с особым и неослабным вниманием.

Основой всех технических систем (в том числе и измерительных) являются "преобразователи", которые образуют фундамент здания под названием "измерение". При создании преобразователей используются достижения различных отраслей науки и техники - механики, физики, электротехники, микроэлектроники, оптики, информатики, вычислительной техники, химии, физической химии, а с недавних пор и биологии.

Многие механические измерительные приборы используют преобразование разнообразных физических величин в механическое перемещение, как, например: ртутный термометр, пружинные весы, пружинный манометр, волосяной гигрометр, фотометрическая скамья для сравнения освещенностей и т. д.

Развитие измерительной техники за последние десятилетия убедительно показало, что наиболее удобным является такое преобразование различных измеряемых величин, результат которого представлен не в виде механического перемещения, а в виде электрической величины. Тогда для всех последующих операций, будь то передача, регистрация, математическая обработка или управление, может быть использована стандартная электрическая аппаратура, обладающая целым рядом существенных преимуществ.

Прогресс в электротехнике и грандиозные успехи электроники привели к тому, что в настоящее время фактически все измерения проводятся «в электрической области». Для измерения неэлектрических величин применяют различные преобразователи, осуществляющие их преобразование в электрический сигнал. Электрический сигнал - это переменная составляющая тока или напряжения, которая несет информацию, связанную с измеряемой величиной. Амплитуда и частота сигнала должны быть непосредственно связаны с амплитудой или частотой измеряемой величины.

Основными преимуществами электрических методов измерительного преобразования разнообразных величин являются следующие:

- возможность высокоточных измерительных преобразований при сравнительно простых и дешевых электронных устройствах;
- высокая чувствительность и простота регулировки электрических сигналов в электронных средствах измерения (СИ), что обеспечивает измерение физических величин в широком диапазоне значений измеряемой величины;
- малая инерционность электрических цепей и устройств, их широкополосность, позволяющие производить преобразование как очень медленных, так и достаточно быстрых процессов;
- возможность бесконтактных и дистанционных измерительных преобразований на значительном расстоянии от оператора и при большом количестве разнородных по физической природе и разнесенных в пространстве объектов с передачей информации по проводным и радиоканалам связи;
- относительная простота преобразования и возможность представления информации в аналоговой или цифровой форме, позволяющая автоматизировать процесс измерения и управлять им. Полученные данные можно использовать для управления контролируемым процессом, для дальнейшей обработки и автоматической регистрации результатов, т.е. возможно решение комплексных задач измерения, контроля и управления путем создания различных систем, в том числе с использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ);
- возможность комплектования измерительных и управляемых ими автоматических устройств из блоков однотипной электрической аппаратуры, что имеет важнейшее значение как для научного, так и для промышленного оборудования;
- сведение к минимуму количества механических, гидравлических и т.п. элементов повышает надежность и технологичность изготовления СИ;
- минимальные габариты и вес при большой плотности элементов;
- широкие возможности для унификации, стандартизации и агрегатирования СИ.

В пособии подробно рассматриваются основные понятия, относящиеся к измерительным преобразователям, их метрологические характеристики, электрические измерительные цепи, используемые совместно с преобразователями, и дается систематизированный обзор основных типов современных измерительных преобразователей.

1 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

././ Основные термины и определения

Измерительное преобразование представляет собой отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

Применение измерительных преобразований является единственным методом практического построения любых измерительных устройств.

Измерительный преобразователь (ИП) - это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Другими словами, измерительный преобразователь - это техническое устройство, построенное на определенном физическом принципе или эффекте, выполняющее одно частное измерительное преобразование.

В общем случае по виду входных и выходных физических величин ИП можно подразделить на преобразователи неэлектрических величин в неэлектрические, неэлектрических величин в электрические, электрических величин в электрические, электрических величин в неэлектрические.

Если рассмотреть в самом общем виде структурную схему простейшей измерительной системы (рисунок 1.1), то в ней мы можем найти все виды перечисленных ИП.

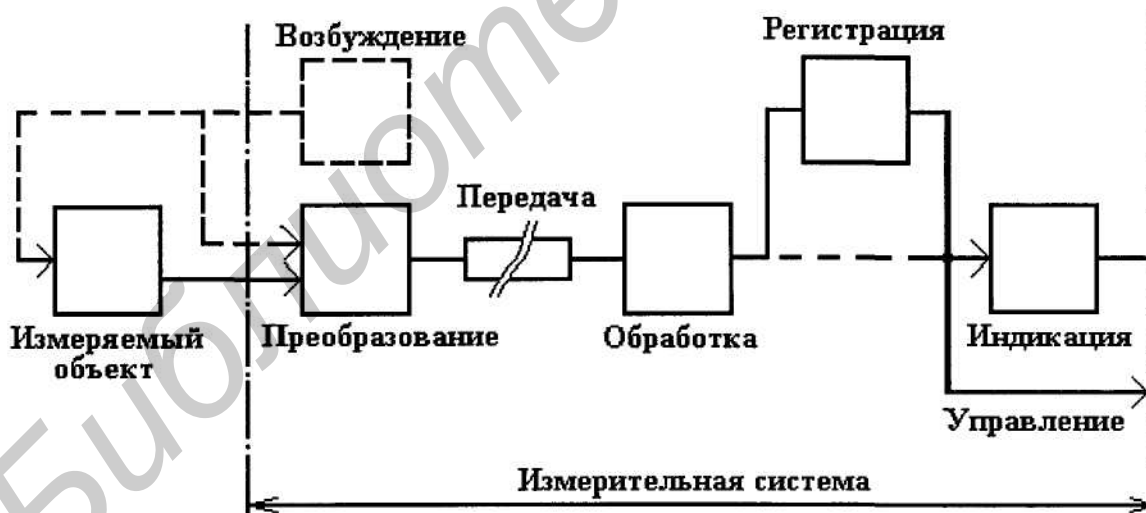


Рисунок 1.1 — Структурная схема простейшей измерительной системы

Преобразователь - первый элемент измерительной системы - является основным источником электрического сигнала, тогда как остальная часть цепи должна обеспечить передачу, обработку и использование сигнала. Электрический сигнал - это переменная составляющая тока или напряжения, которая несет информацию, связанную со значением измеряемой величины; амплитуда и частота сигнала должны быть непосредственно связаны с амплитудой или час-

тотой измеряемой величины¹. Надлежащий выбор преобразователя и правильное построение измерительного канала означают, что в сигнал не вносятся дополнительные погрешности или ограничений сверх тех, которые были ему присущи изначально. Следовательно, от высокого качества преобразователя в первую очередь зависят как более или менее точное соответствие между истинным значением измеряемой величины и значением, полученным при измерениях, так и пределы вносимых в полученную величину погрешностей.

Информация о значении измеряемой величины, которую мы хотим получить от измеряемого объекта, не всегда имеет форму активной информации. В тех случаях, когда измеряемая величина не является активной, необходимо воспользоваться источником возбуждения, который будет оказывать воздействие на измеряемый объект. Тогда отклик объекта (вместе с самим воздействием) будет содержать желаемую информацию. Если же измеряемый объект сам порождает сигнал, уже содержащий необходимую информацию, то во внешнем возбуждении нет надобности.

При преобразовании неэлектрических величин, таких, как жесткость, тепловое сопротивление, смещение и т.д., чаще всего применяются различного рода измерительные преобразователи, и система в целом не остается чисто механической или тепловой измерительной системой. В преобразователе входная величина трансформируется в электрический выходной сигнал, который несет информацию о ее значении. Большим достоинством такого преобразования является тот факт, что оно дает нам возможность в дальнейшем обрабатывать информацию с помощью электроники, а это совсем недорогой и гибкий способ обработки. Например, в таком виде информацию легко передавать на большие расстояния при минимальном мешающем воздействии окружающей среды. Передавая измерительную информацию, мы можем осуществлять преобразования на значительном расстоянии от объекта. Это особенно важно при измерениях в недоступных местах или в агрессивной среде, например, под водой (в океанографии), в атмосфере (в метеорологии) или при измерении параметров большого числа объектов, которые разнесены далеко друг от друга.

Измерительная информация не обязательно бывает представлена в виде аналоговой величины. Иногда, чтобы сделать систему менее чувствительной к возмущениям, информацию "помещают" в частоту сигнала или в длительность импульсов, следующих с постоянной частотой, или передают ее в цифровом виде. Эти методы передачи обладают большой помехоустойчивостью и лучше защищены от шумов.

Как правило, электрический сигнал на выходе преобразователя не пригоден для того, чтобы быть непосредственно представленным наблюдателю. Часто бывает необходимо предварительно подвергнуть его обработке (усилению, фильтрации, коррекции нелинейности преобразователя и др.).

¹ Под сигналом в общем случае подразумевают материальный носитель информации. Различают две основные формы сигналов - непрерывную в виде физического процесса (информация в нем определяется размером какого-либо информативного параметра - тока, амплитуды, частоты и др.) и дискретную кодированную (информация заключена в числе элементов кода, их расположении во времени или в пространстве).

После такой обработки сигнал может быть представлен наблюдателю. Выходной сигнал можно также временно сохранить в памяти и воспользоваться им позднее. В этом случае говорят о регистрации результата преобразования.

Не во всех измерительных системах имеются все шесть подсистем, указанных на рисунке 1.1. Подсистемы не обязательно должны следовать в том порядке, как указано в нашем примере. Часто, например, какая-то обработка сигнала производится до его передачи.

По месту расположения в измерительной цепи различают первичные, промежуточные и передающие преобразователи. Выделяют также масштабные измерительные преобразователи.

Первичный измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора.

Датчик - конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации.

Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерения, принимающего его сигналы.

Промежуточный измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, занимающий место в измерительной цепи после первичного преобразователя.

Передающий измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации.

Масштабный измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера физической величины или измерительного сигнала в заданное число раз. Примеры - делитель напряжения, измерительный трансформатор тока, измерительный усилитель.

Аналоговый измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, преобразующий одну аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал) в другую аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал).

Аналого-цифровой измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код.

Цифроаналоговый измерительный преобразователь - измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования числового кода в аналоговую величину.

Работа измерительных преобразователей протекает в сложных условиях, так как объект измерения - это, как правило, сложный, многогранный процесс, характеризующийся множеством параметров, каждый из которых действует на измерительный преобразователь совместно с остальными параметрами. Нас же интересует только один параметр, который называется *измеряемой величиной*, а все остальные параметры процесса считаются *помехами*. Поэтому у каждого измерительного преобразователя устанавливается его *естественная входная*

величина, которая лучше всего воспринимается им на фоне помех. Подобным образом можно выделить *естественную выходную величину* измерительного преобразователя.

Преобразователи неэлектрических величин в электрические с точки зрения вида сигнала на его выходе могут быть подразделены на генераторные, выдающие заряд, напряжение или ток (выходная величина $E = F(X)$ или $I = F(X)$ и внутреннее сопротивление $Z_{вн} = \text{const}$), и параметрические с выходным сопротивлением, индуктивностью или емкостью, изменяющимися в соответствии с изменением входной величины (ЭДС $E = 0$ и выходная величина в виде изменения R , L или C в функции X).

Различие между генераторными и параметрическими преобразователями обусловлено их эквивалентными электрическими схемами, отражающими фундаментальные отличия в природе используемых в преобразователях физических явлений. Генераторный преобразователь является источником непосредственно выдаваемого электрического сигнала, а измерение изменений параметров параметрического преобразователя производится косвенно, по изменению тока или напряжения в результате его обязательного включения в схему с внешним источником питания. Электрическая схема, непосредственно связанная с параметрическим преобразователем, формирует его сигнал. Таким образом, совокупность параметрического преобразователя и электрической схемы является источником электрического сигнала.

По физическому явлению, положенному в основу работы, и типу входной физической величины генераторные и параметрические преобразователи делятся на ряд разновидностей (рисунок 1.2): генераторные - на пьезоэлектрические, термоэлектрические и т.п.; резистивные - на контактные, реостатные и т.д.; электромагнитные - на индуктивные, трансформаторные и т.д.;

По виду модуляции все ИП делятся на две большие группы: амплитудные и частотные, временные, фазовые. Последние три разновидности имеют очень много общего и поэтому объединены в одну группу.

1.2 Генераторные преобразователи

Принцип действия генераторного преобразователя основан на том или ином физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую форму энергии. Наиболее важные из этих физических эффектов, используемых для построения генераторных преобразователей, приведены в таблице 1.1, а принципы их технической реализации иллюстрируют схемы, приведенные на рисунке 1.3. Преобразователь, реализующий *термоэлектрический эффект* (термопара), содержит два проводника M_1 и M_2 различной химической природы (рисунок 1.3, а). Если температуру θ_1 одного места соединения (спая) проводников сделать отличной от температуры θ_2 другого, то в цепи появится термоЭДС, являющаяся разностью функций температур спаев. ТермоЭДС E будет пропорциональна измеряемой температуре θ_1 при постоянной температуре θ_2 (соответствующий нерабочий спай термопары помещен в среду с постоянной температурой, равной, например, 0°C).

В преобразователе с *пироэлектрическим эффектом* определенные кристаллы, называемые пироэлектриками (например, триглицин сульфата), испы-

тывают спонтанную электрическую поляризацию, зависящую от их температуры. В этом случае на двух противоположных поверхностях преобразователя появляются электрические заряды противоположных знаков, пропорциональные этой поляризации (рисунок 1.3,б).

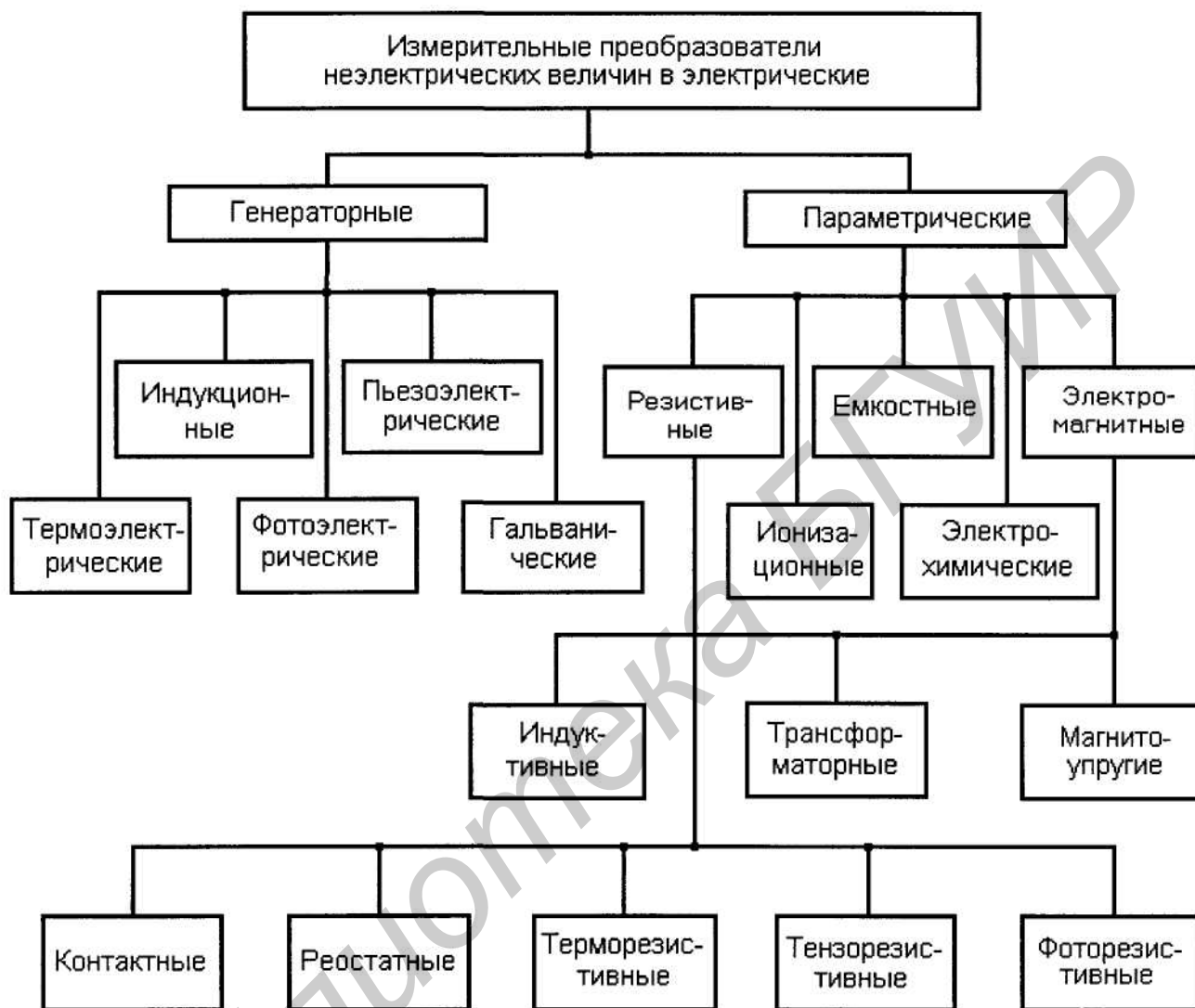


Рисунок 1.2 - Классификация измерительных преобразователей неэлектрических величин в электрические

Поглощенный кристаллом поток излучения приводит к росту его температуры и соответствующему изменению поляризации, которое определяется по изменению напряжения на зажимах конденсатора.

В преобразователе с пьезоэлектрическим эффектом изменение механического напряжения в кристалле пьезоэлектрика, например кварца, приводит к деформации, вызывающей появление на противоположных гранях кристалла одинаковых по величине электрических зарядов противоположного знака (рисунок 1.3,в). Таким образом, измерение силы или приводимых к ней величин (давление, ускорение) осуществляется измерением напряжения между жимами пьезоэлектрика.

Таблица 1.1

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

В преобразователе, использующем явление электромагнитной индукции, при перемещении проводника в постоянном магнитном поле возникает ЭДС, пропорциональная скорости его перемещения и значению магнитного потока (рисунок 1.3,г). При воздействии переменного магнитного поля на неподвижный замкнутый контур в нем индуцируется ЭДС, равная по значению (и противоположная по знаку) скорости изменения магнитного потока. При перемещении источника магнитного поля (например магнита) относительно неподвижного контура в нем также будет возбуждаться ЭДС. Таким образом, измерение ЭДС электромагнитной индукции позволяет определить скорость перемещения объекта, механически связанного с подвижным элементом электромагнитного преобразователя.

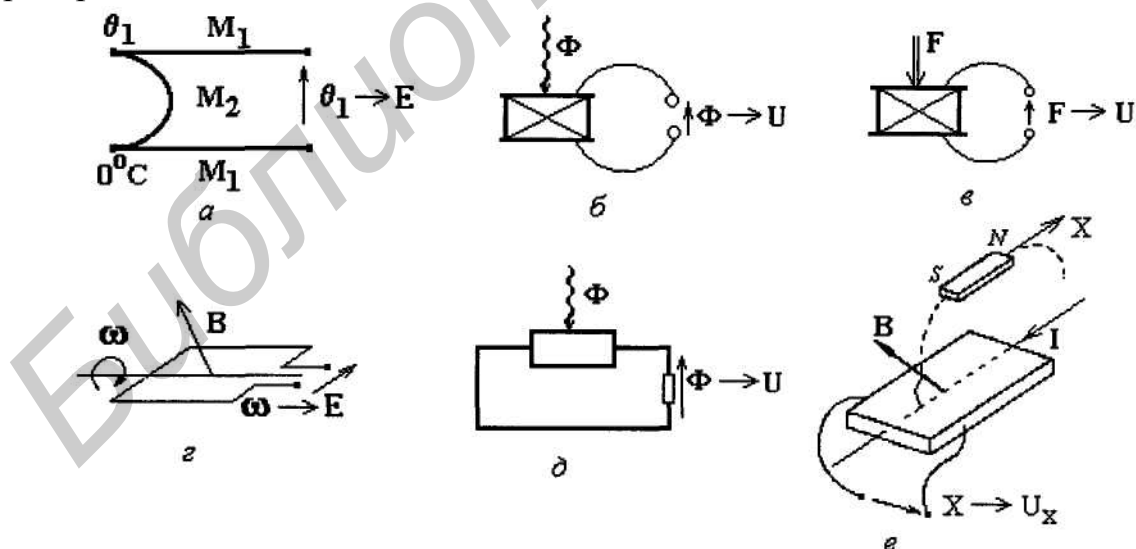


Рисунок 1.3 - Примеры использования физических явлений для построения генераторных преобразователей

Эффекты: *a* - термоэлектрический; *б* - пирозлектрический; *в* — пьезоэлектрический; *г* - электромагнитной индукции; *д* - фотоэлектрический; *е* - Холла

В преобразователях используются и *фотоэлектрические эффекты*, различные по своим проявлениям, но объединенные общей причиной их возникновения - освобождением электрических зарядов в веществе под действием светового или, в более общем случае, электромагнитного излучения, длина волны которого меньше некоторого порогового значения, являющегося характеристикой чувствительного материала (рисунок 1.3,д).

Вакуумный фотоэлемент с внешним фотоэффектом. Освобожденные в нем фотоэлектроны покидают освещенный фотокатод и образуют пропорциональный освещенности ток, текущий к аноду под действием приложенного электрического поля.

Полупроводниковый фотодиод с внутренним фотоэффектом. Электроны и дырки, освобожденные в окрестностях освещенного р-п перехода в полупроводнике, перемещаясь под действием электрического поля, вызывают изменение напряжения на границах полупроводника.

Преобразователь на основе фотоэлектромагнитного эффекта. Приложение магнитного поля, перпендикулярного падающему излучению, вызывает в освещенном полупроводнике появление электрического напряжения в направлении по нормали к полю и падающему излучению².

Фотоэлектрические эффекты являются основой фотометрии и обеспечивают передачу информации, носителем которой является свет.

Преобразователь на основе эффекта Холла. При пропускании электрического тока через образец (пластину) полупроводника, находящийся в однородном магнитном поле (вектор магнитной индукции B составляет угол θ с направлением тока I), в направлении, перпендикулярном полю, возникает ЭДС U_x

$$U_x = K_n I B \sin \theta, \quad (1.1)$$

где K_n зависит от типа проводимости и размеров пластины (рисунок 1.3,е).

Преобразователь Холла используют для измерения перемещений X объектов, а также величин, преобразуемых в перемещения, например давления. Постоянный магнит преобразователя механически связывают с объектом, и при смещении магнита пропорционально изменяется выходное напряжение преобразователя (ток при этом постоянен).

1.3 Параметрические преобразователи

В параметрических преобразователях некоторые параметры выходного комплексного сопротивления могут изменяться под воздействием измеряемой величины. Комплексное сопротивление преобразователя, с одной стороны, обусловлено геометрией и размерами его элементов, а с другой - свойствами мате-

² Речь идет о фотоэлектромагнитном приемнике излучения, который содержит чувствительный полупроводниковый монокристалл, размещенный между наконечниками магнита. Поток оптического излучения, поглощаемый поверхностью кристалла, создает вблизи нее повышенную концентрацию электронно-дырочных пар, диффундирующих внутрь кристалла. Движущиеся электроны и дырки отклоняются магнитным полем в противоположные стороны, и между электродами кристалла устанавливается разность потенциалов, пропорциональная освещенности. Такие фотоэлементы используют обычно для измерения инфракрасного излучения.

риалов: удельным сопротивлением ρ , магнитной проницаемостью μ и диэлектрической постоянной ϵ .

Изменения комплексного сопротивления могут быть, таким образом, вызваны воздействием измеряемой величины либо на геометрию и размеры элементов преобразователя, либо на электрические и магнитные свойства его материала, либо, что реже, на то и на другое одновременно. Геометрические размеры преобразователя и параметры его комплексного сопротивления могут изменяться, если преобразователь содержит подвижный или деформирующийся элемент.

Каждому положению подвижного элемента преобразователя соответствует определенное комплексное сопротивление, и измерение его параметров позволяет узнать положение элемента. На этом принципе работает большое число преобразователей положения и перемещения объектов: потенциметрических, индуктивных с подвижным сердечником, емкостных.

Деформация является результатом действия силы (или величины, с ней связанной, - давления, ускорения) на чувствительный элемент преобразователя. Изменение комплексного сопротивления преобразователя, вызванное деформацией чувствительного элемента, вызывает изменение соответствующего электрического сигнала в специальной измерительной схеме, в которую этот преобразователь включают.

Электрические свойства материала и состояние чувствительного элемента преобразователя зависят от переменных физических величин: температуры, давления, влажности, освещенности и т.д. Если меняется только одна из величин, а остальные поддерживаются постоянными, то можно оценить существующее однозначное соответствие между значениями этой величины и комплексным сопротивлением преобразователя. Это соответствие описывается градуировочной кривой. Зная градуировочную кривую, по результатам измерения комплексного сопротивления можно определить соответствующее значение измеряемой величины.

В таблице 1.2 приведен ряд физических эффектов, связанных с преобразованием неэлектрических величин с помощью параметрических преобразователей. Среди них следует специально отметить резистивные преобразователи.

Полное сопротивление параметрического преобразователя и его изменения можно измерить, включив преобразователь в специальную электрическую цепь, содержащую источник питания и схему формирования сигнала. Наиболее часто используются измерительные схемы следующих видов:

- потенциметрическая схема, содержащая соединенные параллельно источник напряжения и преобразователь-потенциометр;
- мостовая схема, разбаланс которой характеризует изменение комплексного сопротивления преобразователя;
- колебательный контур, включающий в себя полное сопротивление преобразователя (при этом контур является частью генератора колебаний и определяет его частоту);
- операционный усилитель, в котором сопротивление преобразователя является одним из элементов, определяющим коэффициент его усиления.

Таблица 1.2

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

Выбор схемы формирования сигнала является важным этапом в реализации измерений, от которого зависят метрологические характеристики измерительных комплексов в целом - погрешность, чувствительность, линейность, невосприимчивость к влиянию определенных величин.

1.4 Комбинированные преобразователи

При измерениях некоторых неэлектрических величин не всегда удается преобразовать их непосредственно в электрическую величину. В этих случаях осуществляют двойное преобразование исходной (первичной) измеряемой величины в промежуточную неэлектрическую величину, которую преобразуют затем в выходную электрическую величину. Совокупность двух соответствующих измерительных преобразователей образует комбинированный преобразователь (рисунок 1.4).



Комбинированный преобразователь Рисунок 1.4 -

Структурная схема комбинированного преобразователя

Подобные преобразования удобны для измерения механических величин, вызывающих в первичном преобразователе деформацию или перемещение выходного элемента, к которым чувствителен вторичный преобразователь.

Так, например, растягивающее усилие F , действуя на стержень длиной l с поперечным сечением s и модулем Юнга Y , вызывает его деформацию $\Delta l/l$, которую можно измерить по изменению сопротивления резистивного преобразователя R , сочлененного со стержнем через механизм передачи. Зная соотношение для первичного преобразователя, связывающее растягивающее усилие с деформацией

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{Y} \frac{F}{s}, \quad (1.2)$$

и соотношение для вторичного преобразователя, связывающее его входную величину – деформацию – с реакцией на выходе, т.е.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}, \quad (1.3)$$

где K – коэффициент вторичного преобразования, можно вывести окончательную формулу, связывающую растягивающее усилие с изменением сопротивления, для преобразователя в целом:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K F}{Y s}. \quad (1.4)$$

Давление, например, можно измерить с помощью мембраны, служащей первичным преобразователем, деформация которой преобразуется в электрическую величину преобразователем, реагирующим на механическое смещение. Так, мембрана электродинамического микрофона является первичным преобразователем; ее деформация, вызванная воздействием акустического давления, преобразуется в соответствующий электрический сигнал.

Если механические напряжения в первичном преобразователе не превышают предел упругости, то его характеристика будет линейна. Характеристику преобразования комбинированного преобразователя в целом определяют путем его градуировки с помощью образцовых мер преобразуемой величины.

1.5 Влияющие величины

Преобразователь в определенных условиях эксплуатации может подвергаться воздействию не только измеряемой величины, но в других физических величин, именуемых влияющими, к которым чувствителен преобразователь. Вариации этих паразитных воздействий могут привести к изменениям выходного электрического сигнала преобразователя и появлению соответствующей погрешности преобразования.

Основными физическими величинами, влияющими на погрешность преобразователей, являются:

- температура, под действием которой изменяются электрические и механические характеристики преобразователя, а также размеры составляющих его деталей;

- давление, ускорение и вибрации, вызывающие в определенных элементах преобразователей деформации и напряжения, изменяющие их чувствительность;

- влажность, которая может вызвать изменение определенных электрических характеристик элементов, таких, как диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление, вследствие чего возникает опасность нарушения электрической изоляции между отдельными конструктивными элементами преобразователя (либо между преобразователем и окружающей средой);

- постоянное или переменное магнитное поле, индуцирующее в проводниках ЭДС, которая накладывается на полезный сигнал, и изменяющее электрические характеристики некоторых чувствительных элементов, например удельное сопротивление магниторезисторов;

- изменение параметров напряжения питания - его амплитуды и частоты.

Если обозначить величины, влияющие на преобразователь, $g_1, g_2 \dots$, то связь между выходным электрическим сигналом Y и измеряемой величиной X , которая в идеальном случае выражается как

$$Y = F(X), \quad (1.5)$$

преобразуется к виду

$$Y = F(X, g_1, g_2 \dots). \quad (1.6)$$

Для того чтобы в этом случае определить измеряемую величину по выходному сигналу преобразователя, без внесенной влияющими величинами погрешности, необходимо:

- снизить значения влияющих величин соответствующей защитой преобразователя, используя, например, антивибрационное основание, магнитные экраны и др.;

- стабилизировать влияющие величины и градуировать преобразователь для этих условий, используя, например, термостат, источник стабилизированного напряжения питания и др.;

- использовать такую схему, которая позволила бы скомпенсировать влияние паразитных величин, например, мостовую измерительную цепь с двумя одинаковыми преобразователями, один из которых предназначен для измерений, а второй - для компенсации погрешности, вызванной влияющими факторами.

1.6 Измерительные цепи преобразователей

Простейшая измерительная цепь состоит из измерительного преобразователя и устройства обработки сигнала, связанного с устройством отображения результата преобразования, например: термопара с вольтметром, преобразователь напряжения в измерительной мостовой цепи с гальванометром или вольтметром в диагонали мостовой измерительной цепи в качестве индикатора. Градуировка всей измерительной цепи позволяет каждому значению измеряемой

величины однозначно приписать соответствующее показание индикатора.

При измерениях ИП включаются в электрическую измерительную цепь (ИЦ), вид которой определяется методом измерения и типом преобразователя. В зависимости от метода измерения различают цепи прямого и уравнивающего преобразования. ИЦ прямого преобразования более просты, надежны и имеют сравнительно высокое быстродействие. Цепи уравнивающего преобразования сложнее, характеризуются более низким быстродействием, но имеют меньшие погрешности и более широкий рабочий диапазон.

По типу преобразователя различают цепи для генераторных и параметрических преобразователей. Последние, в свою очередь, включают три разновидности: последовательного включения, делительные (потенциометрические) и мостовые.

1.6.1 Измерительные цепи генераторных преобразователей

Генераторный преобразователь характеризуется выходной ЭДС $E(X)$, являющейся функцией входной величины X , и внутренним сопротивлением R_i .

Эти две величины определяют мощность $P_{к.з} = \frac{E^2}{R_i}$, развиваемую преобразователем в режиме короткого замыкания, т.е. расходуемую лишь на внутреннем сопротивлении.

Мощность P_H , отдаваемую генераторным преобразователем последующему преобразователю, имеющему сопротивление R_H , определяется мощностью короткого замыкания $P_{к.з}$ и некоторым безразмерным коэффициентом K_p , характеризующим эффективность использования возможностей генераторного преобразователя. Эффективность преобразования зависит только от соотношения сопротивлений R_i и R_H .

Включение генераторного ИП Π_i в цепь можно представить эквивалентной схемой (рисунок 1.5). Преобразователь Π_i представлен собственной ЭДС - $E(X)$ с внутренним сопротивлением R_i , а ИЦ - преобразователем Π_{i+1} , имеющим входное сопротивление R_H и выполняющим функции нагрузки генераторного измерительного преобразователя (ИП).

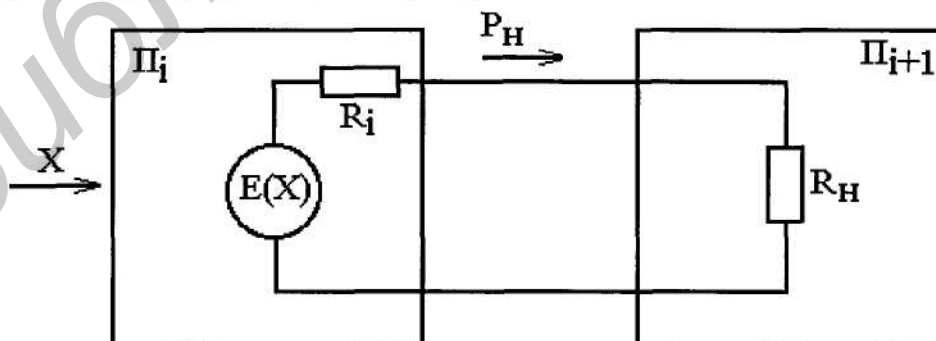


Рисунок 1.5 – Эквивалентная схема включения генераторного измерительного преобразователя в измерительную цепь

Мощность P_H , передаваемая в нагрузку, может быть определена как

$$P_H = \frac{E^2 \cdot R_H}{(R_i + R_H)^2} = \frac{E^2}{R_i} \frac{R_i \cdot R_H}{(R_i + R_H)^2} = K_p P_{к.з}, \quad (1.7)$$

где

$$K_p = \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2} \quad (1.8)$$

является функцией отношения $\alpha = \frac{R_n}{R_i}$ и не зависит от абсолютных значений R_i и R_n .

Изменение K_p в виде функции α при изменении α от 10^{-3} до 10^3 представлено в логарифмическом масштабе на рисунке 1.6 (кривая 1) и имеет максимум $K_p = 1/4$ при $\alpha = 1$, т.е. при $R_n = R_i$.



Рисунок 1.6 – Графики зависимостей эффективности преобразования K_p от отношения мощностей P_n и P_i

В том случае, когда согласуемые сопротивления являются комплексными величинами Z_i и Z_n , под $K_p = P_n/P_{к.з}$ следует понимать отношение полных мощностей. При этом для значений $\alpha = |Z_n|/|Z_i|$, далеких от единицы, кривая 2 практически не отличается от кривой 1, но значение максимума зависит от соотношения аргументов φ_i и φ_n комплексных Z_i и Z_n . При одинаковом характере сопротивлений (оба индуктивные или оба емкостные) и $\varphi_i = \varphi_n$ кривые полностью совпадают. При $\varphi_i = (\varphi_n \pm 90^\circ)$ максимум K_p составляет $1/2$ вместо $1/4$ (для R_n и R_i). При $\varphi_i = -\varphi_n$, т.е. при одном – емкостном, а другом – индуктивном сопротивлениях, кривая имеет вид резонансной кривой.

Поэтому при проектировании преобразователей можно ориентироваться на общее правило, гласящее, что максимальная мощность в нагрузке P_n генераторного преобразователя, а следовательно, и максимум эффективности преобразования K_p достигается при согласовании модулей нагрузки и внутреннего сопротивления преобразователя, т.е. при $\alpha = 1$ или $Z_n = Z_i$.

При этом необходимо обратить внимание на то, что максимальную мощность желательно получить именно в нагрузке (см. рисунок 1.5), поэтому сопротивления подводных проводников должны быть отнесены к R_i , а не к R_n . Следует иметь в виду, что правило согласования отнюдь не требует равенства R_i и R_n с какой-либо высокой степенью точности. Максимум кривой 1 на ри-

сунке 1.6 весьма пологий, поэтому практически согласование обеспечивается при $\alpha = 0,2 \dots 5$ и лишь при $\alpha > 10$ или $\alpha < 0,1$, мощность в нагрузке P_n уменьшается соответственно в α или $1/\alpha$ раз.

В ряде случаев приходится сознательно отступать от условий согласования. Чаще всего это делается ради уменьшения тех или иных погрешностей измерительной аппаратуры. Для термоэлектрического преобразователя, например, условием согласования является равенство сопротивлений $R_{тп} + R_{л} = R_n$, где $R_{тп}$ – сопротивление термопары; $R_{л}$ – сопротивление удлинительных проводов (линии) и R_n – сопротивление нагрузки (милливольтметр). Однако при соблюдении этого условия термометр будет иметь большую погрешность от изменения сопротивления линии $R_{л}$ и термопары $R_{тп}$, (см. 3.3.2), которая может быть сведена к пренебрежимо малому значению при $R_n \gg R_{тп} + R_{л}$.

В подобном же положении оказываются цепи, работающие с гальваническими преобразователями (см. 3.5). Прохождение относительно больших токов (больше 1 мкА) через электролит гальванического преобразователя или нормального элемента вызывает явление поляризации на их электродах и тем самым изменяет результирующую ЭДС. Поэтому входные сопротивления цепей, работающих с такими преобразователями, выбирают исходя из следующего неравенства $R_n > 1000 R_i$.

Пьезоэлектрические преобразователи (см. 3.2) и индукционные преобразователи (см. 3.1) имеют реактивные внутренние сопротивления, что приводит к зависимости выходного сигнала от частоты Ω изменения входной величины X , так как $E(X) = S_{пр} X_m \sin \Omega t$, где $S_{пр}$ – чувствительность преобразователя. При этом для пьезоэлектрических преобразователей характерна частотная погрешность в области низких частот, а для индукционных – в области высоких частот. Уменьшение частотных погрешностей в том и другом случаях достигается при $R_n \gg Z_i$.

1.6.2 Измерительные цепи параметрических преобразователей Так уже отмечалось, параметрические ИП используются в совокупности с тремя видами ИЦ, питание которых может осуществляться как переменным, так и постоянным током. Для простоты, не нарушая общей картины рассуждений, анализ свойств ИЦ вполне можно проводить для цепей постоянного тока, а специфические особенности цепей переменного тока рассматривать при необходимости.

Простейшей ИЦ является цепь последовательного включения, состоящая из параметрического ИП Π_i (рисунок 1.7) с сопротивлением

$$R = R_0 \pm \Delta R(X), \quad (1.9)$$

где R_0 - начальное сопротивление ИП; $\Delta R(X)$ - абсолютное изменение сопротивления под воздействием преобразуемой величины X источника питания E и сопротивления нагрузки R_n , являющегося входным сопротивлением следующего преобразователя: Π_{i+1} .

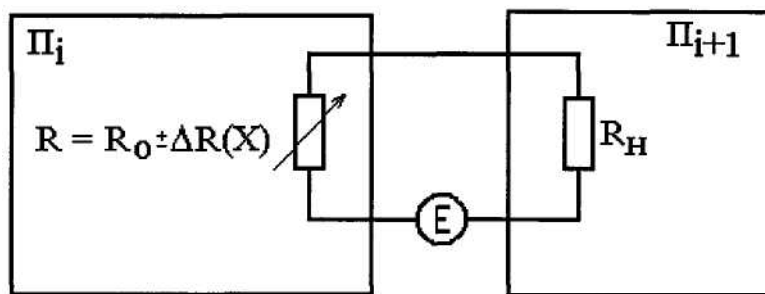


Рисунок 1.7- Эквивалентная схема включения параметрического измерительного преобразователя в измерительную цепь

Мощность сигнала измерительной информации в нагрузке для такой цепи определится как

$$P_n = P_{i \text{ доп}} \frac{S \cdot \alpha^2}{(1 + \alpha)^4}, \quad (1.10)$$

где $P_{i \text{ доп}}$ - допустимая рассеиваемая мощность параметрического ИП;
 $S = \Delta R/R$ - его относительная чувствительность.

Условия согласования по мощности обеспечиваются при $\alpha = \frac{1}{3}$, $R_n = \frac{1}{3} R_0$.

При выполнении условия согласования мощность сигнала, получаемая последующим преобразователем с сопротивлением R_n составляет $P_n = \frac{3}{16} P_{i \text{ доп}}$.

Таким образом, условия согласования параметрических ИП отличаются от условий согласования генераторных. Кроме того, кривая 3 (см. рисунок 1.6) имеет более острый максимум, а следовательно, требования к точности согласования параметрических ИП более жесткие, чем генераторных.

Одним из основных недостатков последовательных ИЦ является нелинейная зависимость между приращением выходного напряжения ΔU_n и переменной частью сопротивления $\Delta R(X)$ параметрического ИП. Погрешность преобразования, возникающая из-за нелинейности, является систематической и может быть уменьшена следующими способами:

- введением градуировочных таблиц;
- нелинейной градуировкой шкалы с учетом нелинейности преобразования;
- уменьшением рабочего участка характеристики путем введения добавочного резистора, т.е. за счет потери чувствительности;
- линеаризацией результирующей характеристики путем создания преобразователя с нелинейной зависимостью $R(X)$, компенсирующей погрешность нелинейности.

Наиболее рациональным считается последний способ.

Еще одним недостатком последовательных ИЦ является то, что при $X = 0$ $U_{\text{вых}} \neq 0$. Этот недостаток устраняется при измерении переменных во времени величин путем введения разделительных конденсаторов.

ИЦ в виде делителя напряжения (рисунок 1.8) обладает более широкими возможностями. В этой цепи параметрический ИП может быть включен как в верхнее R_1 , так и в нижнее R_2 плечо делителя. При этом зависимости $U = f(R_1)$ и $U = f(R_H)$ при $R_H = \infty$ оказываются обратными друг другу. Выбором сопротивления постоянного плеча делителя, равным среднему значению сопротивления ИП, достигается максимум чувствительности. Например, если преобразователь имеет сопротивление $R_2 = R_{02} = \sqrt{AR_2P_9}$, можно показать, что максимальная чувствительность по напряжению будет обеспечена при $R_1 = R_{02}$.

ИЦ делительного типа (см. рисунок 1.8), так же как и последовательная, имеет существенную погрешность нелинейности. Одним из кардинальных способов ее уменьшения является использование дифференциальных ИП. Дифференциальными называются двухплечие преобразователи, у которых приращение параметра одного из плеч под воздействием преобразуемой величины приводит к равному по значению и обратному по знаку изменению параметра второго плеча. Практически все параметрические ИП могут быть изготовлены в виде дифференциальных.

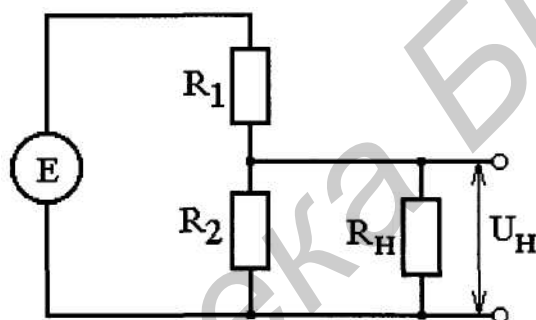


Рисунок 1.8 - Делитель напряжения с использованием параметрического преобразователя

Особенностью включения дифференциальных ИП в схему делителя напряжения (рисунок 1.9) является постоянство суммарного сопротивления плеч.

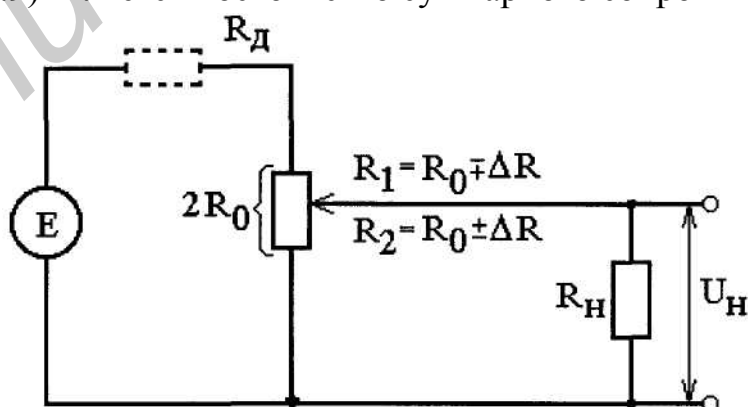


Рисунок 1.9 - Делитель напряжения с использованием дифференциального параметрического преобразователя

В случае реостатных ИП такое включение называется потенциометрическим. Дифференциальное включение позволяет повысить чувствительность схемы и достичь более высокой линейности преобразования. Действительно, в

схеме, приведенной на рисунке 1.8, при $R_1 = R_0$ и $R_2 = R_0 \pm \Delta R$ для $R_n \gg R_0$ получим

$$U'_n = E \frac{R_0 \pm \Delta R}{2R_0 \pm \Delta R} = E \frac{1 \pm S}{2 \pm S};$$

$$S'_n = \frac{\Delta U'_n}{E} = \frac{\Delta R}{4R_0} = \frac{S}{4},$$

(1.11)

для схемы, представленной на рисунке 1.9,

$$U''_n = E \frac{R_0 \pm \Delta R}{2R_0} = \frac{E}{2}(1 \pm S);$$

$$S''_n = \frac{\Delta U''_n}{E} = \frac{\Delta R}{2R_0} = \frac{S}{2}.$$

(1.12)

Таким образом, из выражений (1.11) и (1.12) видно, что для второй схемы при $R_n \gg R_0$ обеспечивается линейная зависимость $U_n = F(\Delta R)$, чувствительность по напряжению оказывается в два раза выше. В случае R_n , сравнимом с R_0 , нелинейность дифференциальной ИЦ уменьшают включением дополнительного резистора $R_d = (0,3 \dots 0,5) R_0$ или выбором в качестве рабочего - начального участка характеристики. Однако и тот и другой путь ведут к уменьшению мощности, поступающей в нагрузку, и, следовательно, к увеличению других составляющих погрешности.

При измерении параметров электрических цепей широко используются равновесные мостовые цепи, тогда как при измерении неэлектрических величин значительно чаще - неравновесные. В отличие от последовательных и делительных ИЦ мостовые обеспечивают равенство нулю выходного напряжения путем балансировки мостовой цепи при нулевом значении преобразуемой неэлектрической величины. Параметрический ИП включается в плечо мостовой цепи, называемое *рабочим* (рисунок 1.10). Отклонение измеряемой величины X от нуля нарушает баланс, и по значению падения напряжения $U_n \neq 0$ на нагрузке R_n в измерительной диагонали моста можно судить о значении неэлектрической величины и ее знаке.

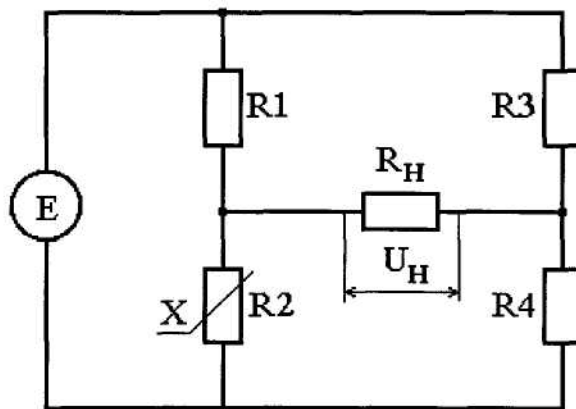


Рисунок 1.10- Мостовая цепь с использованием параметрического преобразователя

Для повышения чувствительности мостовой ИЦ параметрические ИП могут включаться в два и даже во все четыре плеча моста. В зависимости от этого различают неравновесные мостовые цепи с одним, двумя или четырьмя рабочими плечами. Неравновесные мосты подразделяются также на равноплечие (сопротивление всех плеч при балансе равны), последовательно-симметричные (дифференциальный ИП включается в 1- и 2-е или 3- и 4-е плечи); параллельно-симметричные (ИП включается в 1- и 3-е или 2- и 4-е плечи) и несимметричные (сопротивления плеч моста не равны). По виду источника питания различают мосты с источником ЭДС и источником тока, а по роду тока - неравновесные мосты постоянного и переменного тока.

Основным недостатком мостовой ИЦ (см. рисунок 1.10) является нелинейная характеристика преобразования для любых R_H . Значительно лучшие результаты позволяет получить последовательно симметричный мост (рисунок 1.11) с дифференциальным включением параметрического ИП.

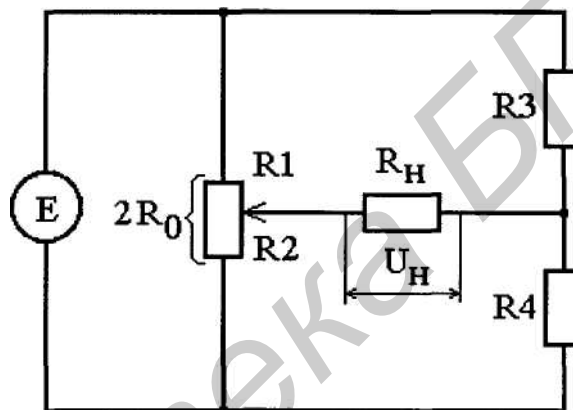


Рисунок 1.11- Мостовая цепь с использованием дифференциального параметрического преобразователя

Для этой цепи при $R_3 = R_4 = R$, напряжение на нагрузке

$$U_H = \frac{E}{2} \frac{1}{1 + (1 - \frac{S^2}{2}) \frac{R_0}{R_H}} \quad (1.13)$$

и зависимость $U_H = F(AR)$ становится линейной при $R_H \gg R_0$ ($R_H = \infty$). А при питании такой ИЦ от источника тока линейность обеспечивается при любых значениях R_H . Однако, если в последовательно-симметричной цепи используется дифференциальный параметрический ИП, в котором линейно с НЭВ изменяется проводимость (например, индуктивные преобразователи с переменным зазором или емкостные с переменной площадью), то функция преобразования будет линейной при любых R_H с питанием от источника ЭДС. При $R_H = 0$ с питанием от источника тока эти мостовые цепи получили наибольшее практическое применение.

Если дифференциальный параметрический ИП включен в мостовую цепь вместо сопротивлений R_1 и R_3 , то образуется параллельно симметричный мост, в котором линейность преобразования обеспечивается только при питании от

источника тока и $R_H = \infty$, поэтому такие ИЦ не получили широкого распространения.

Мосты с двумя рабочими плечами имеют в два раза большую чувствительность, чем с одним плечом, а с четырьмя - еще выше. При этом ИП с одинаковым знаком изменения сопротивления включаются в противоположные плечи моста (например, в 1- и 4-е - одного знака, во 2- и 3-е - противоположно). В таких ИЦ линейность преобразования обеспечивается при $R_H = \infty$ и при питании от источника ЭДС или при любых R_H и питании от источника тока.

Достоинствами мостовых ИЦ по сравнению с последовательными и делительными являются:

- более высокая чувствительность;
- более простые способы обеспечения линейности преобразования;
- более высокая точность преобразования.

Несмотря на свою сложность, неравновесные мостовые ИЦ переменного тока используются при измерениях НЭВ значительно чаще мостов постоянного тока, в том числе с ИП, которые питаются как переменным, так и постоянным током (тензорезистивные, терморезистивные и т.п.). Причина этого - их более широкие возможности, а также большая эффективность усиления сигналов переменного тока по сравнению с постоянным. В частности, в мостовых ИЦ с тесной индуктивной связью смежных плеч можно добиться оптимальных, с точки зрения согласования, соотношений, что вообще невозможно на постоянном токе.

1.6.3 Измерительные цепи с генерированием синусоидальных колебаний

Частота синусоидальных колебаний генератора является вполне определенной и при соответствующих условиях может равняться резонансной частоте контура, состоящего из катушки с индуктивностью L_0 и конденсатора емкостью C_0 , соединенных последовательно или параллельно. На резонансной частоте F_0 сопротивление контура оказывается чисто активным и F_0 определяется выражениями:

- для последовательного колебательного контура

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}; \quad (1.14)$$

- для параллельного колебательного контура

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q_L^2}}, \quad (1.15)$$

где $Q_L = \frac{L_0 \Omega_0}{R_L}$ - добротность катушки индуктивности; R_L - сопротивление катушки, $\Omega_0 = 2\pi F_0$ - угловая частота.

Обычно $Q_L^2 \gg 1$, так что для обоих контуров можно записать:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (1.16)$$

Когда индуктивный или емкостный преобразователь является элементом резонансного контура, изменения его реактивного сопротивления вызывают соответствующие изменения частоты колебаний. В зависимости от типа преобразователя и в предположении, что амплитуда изменений его реактивного сопротивления невелика, для соответствующих изменений частот ΔF справедливы соотношения:

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta L}{2L_0} \text{ или } \frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{\Delta C}{2C_0}; \quad (1.17)$$

$$F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta L}{2L_0} \right) \text{ или } F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_0} \right). \quad (1.18)$$

Если измеряемая величина изменяется относительно значения X_0 по гармоническому закону с амплитудой колебаний, при которой характеристику преобразователя можно считать линейной, а чувствительность - равной S , то $X(t) = X_0 + X_1 \cdot \cos \omega t$, а $\Delta L = S \cdot X_1 \cdot \cos \omega t$ или $\Delta C = S \cdot X_1 \cdot \cos \omega t$. Мгновенное значение частоты генератора при этом

$$F(t) = F_0 (1 - kX_1 \cos \omega t), \quad (1.19)$$

где $k = S/2L_0$ или $k = S/2C_0$ в зависимости от типа преобразователя.

Частота генератора модулируется по закону изменения преобразуемой величины. В общем случае выходное напряжение генератора можно записать в виде $U_x = E \sin \varphi(t)$, где $\varphi(t)$ - мгновенное значение фазы выходного сигнала.

При модуляции в каждый момент времени

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Omega(t) = 2\pi F(t), \quad (1.20)$$

откуда

$$\varphi(t) = \int_0^t \Omega(t) dt = 2\pi \int_0^t F(t) dt, \quad (1.21)$$

т.е.

$$\varphi(t) = 2\pi F_0 \left(t - \frac{kX_1}{\omega} \sin \omega t \right). \quad (1.22)$$

Выходной сигнал генератора описывается, следовательно, выражением

$$U_x = E \sin 2\pi F_0 \left(t - \frac{kX_1}{\omega} \sin \omega t \right), \quad (1.23)$$

или, подставляя коэффициент частотной модуляции $\delta = \frac{k\Omega_0 X_1}{\omega}$, получим

$$U_x = E \sin(\Omega_0 t - \delta \sin \omega t). \quad (1.24)$$

Когда речь идет о передаче информации, исходящей от многих измерительных преобразователей с реактивным сопротивлением, сигнал каждого преобразователя модулирует свою поднесущую частоту. Совокупность промодулированных таким образом сигналов модулирует затем общую несущую частоту (рисунок 1.12).

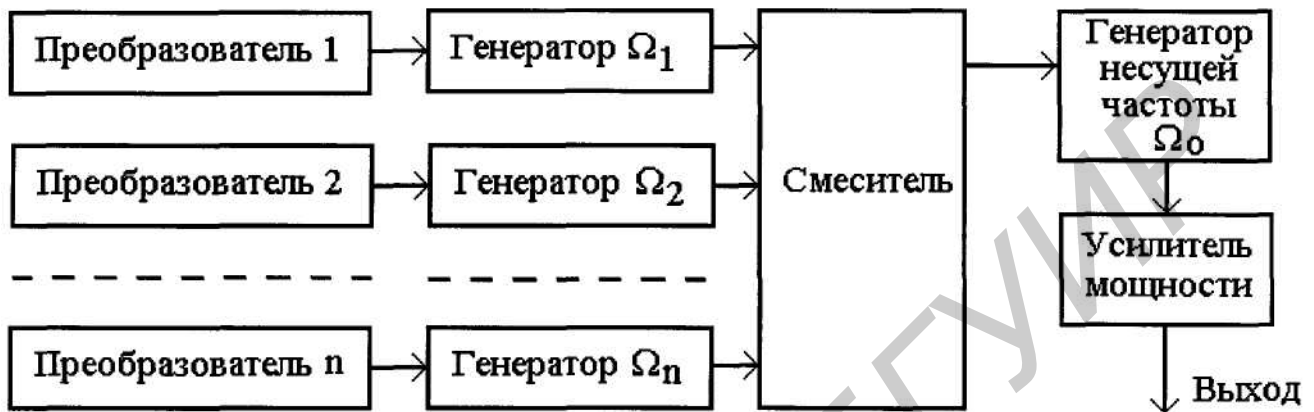


Рисунок 1.12 – Измерительная цепь с модуляцией поднесущей частоты

С одинарными ИП широко используют контурные ИЦ. При этом преобразователь включается в параллельный колебательный контур, питаемый от генератора стабильной частоты ω_0 (рисунок 1.13). В этом случае в качестве выходной величины используется выходное напряжение колебательного контура $U_{\text{ВЫХ}}$.

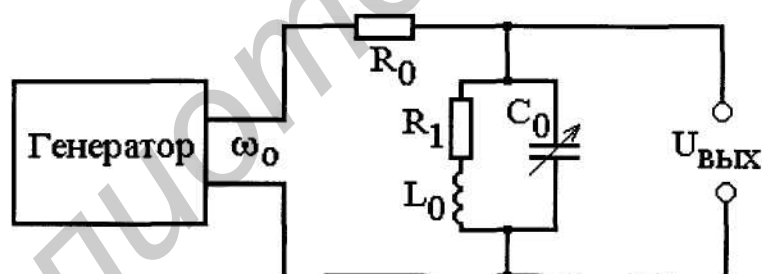


Рисунок 1.13 - Контурная измерительная цепь с емкостным преобразователем

При отсутствии воздействия преобразуемой величины на измерительный преобразователь (например емкостный) колебательный контур настраивается в резонанс. В этом случае выходное напряжение контурной измерительной цепи будет достигать максимального значения (рисунок 1.14). При воздействии преобразуемой величины на преобразователь будет изменяться его выходная величина (емкость). Это приведет к изменению резонансной частоты контура, и, следовательно, к уменьшению выходного напряжения контурной измерительной цепи. Зависимость выходного напряжения от резонансной частоты колебательного контура показана на рисунке 1.14. Рабочим выбирается наиболее линейный участок резонансной кривой.

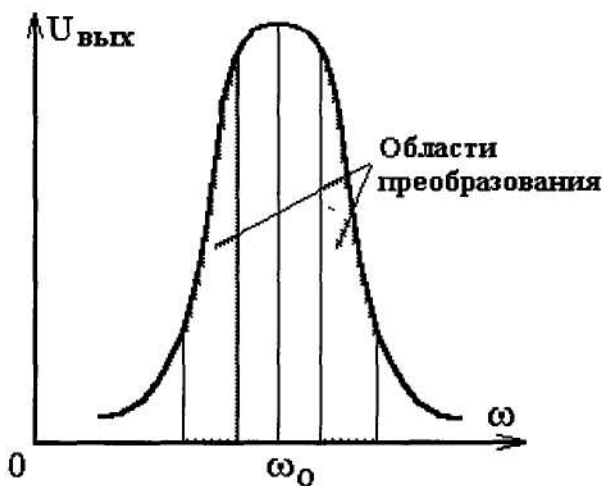


Рисунок 1.14 - Зависимость выходного напряжения от резонансной частоты колебательного контура

На практике к сигналам измерительной информации предъявляются требования, чтобы они имели определенную форму, необходимую для дальнейшего преобразования, обработки и хранения. При необходимости обработки измерительной информации в ЭВМ (рисунок 1.15) в измерительную цепь необходимо вводить устройства, оптимизирующие прием и обработку сигналов. К таким устройствам относятся устройства линейризации характеристик преобразователей, нормирующие усилители, аналоговые и цифровые коммутаторы, программируемые усилители, аналого-цифровые

преобразователи (АЦП). При необходимости передачи сигналов на определенное расстояние (например по кабелю - (рисунок 1.16) в измерительные цепи должны вводиться преобразователи напряжение \rightarrow ток или напряжение \rightarrow частота, каналы телепередачи данных и др³.

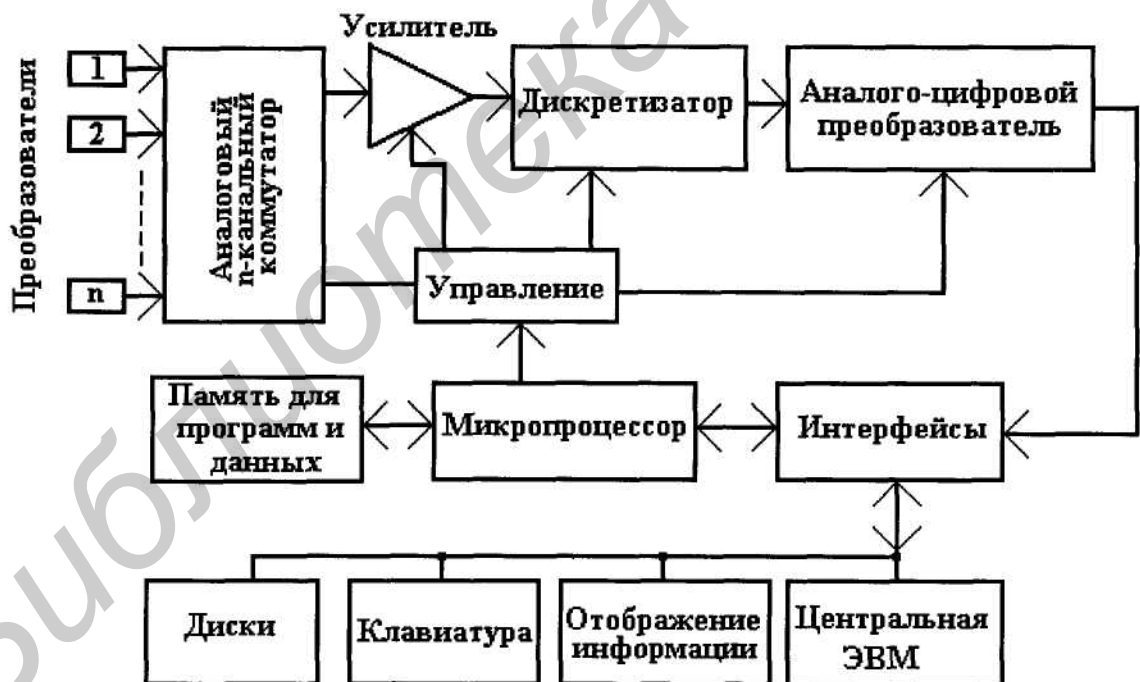


Рисунок 1.15 - Измерительная система, управляемая микропроцессором

Большинство этих вышеперечисленных устройств будут рассматриваться в последующих частях учебного пособия "Преобразование и преобразователи измерительной информации".

³ В литературе совокупность подобных средств принято называть измерительной информационной системой (ИИС), при этом ее измерительные цепи называют измерительными каналами

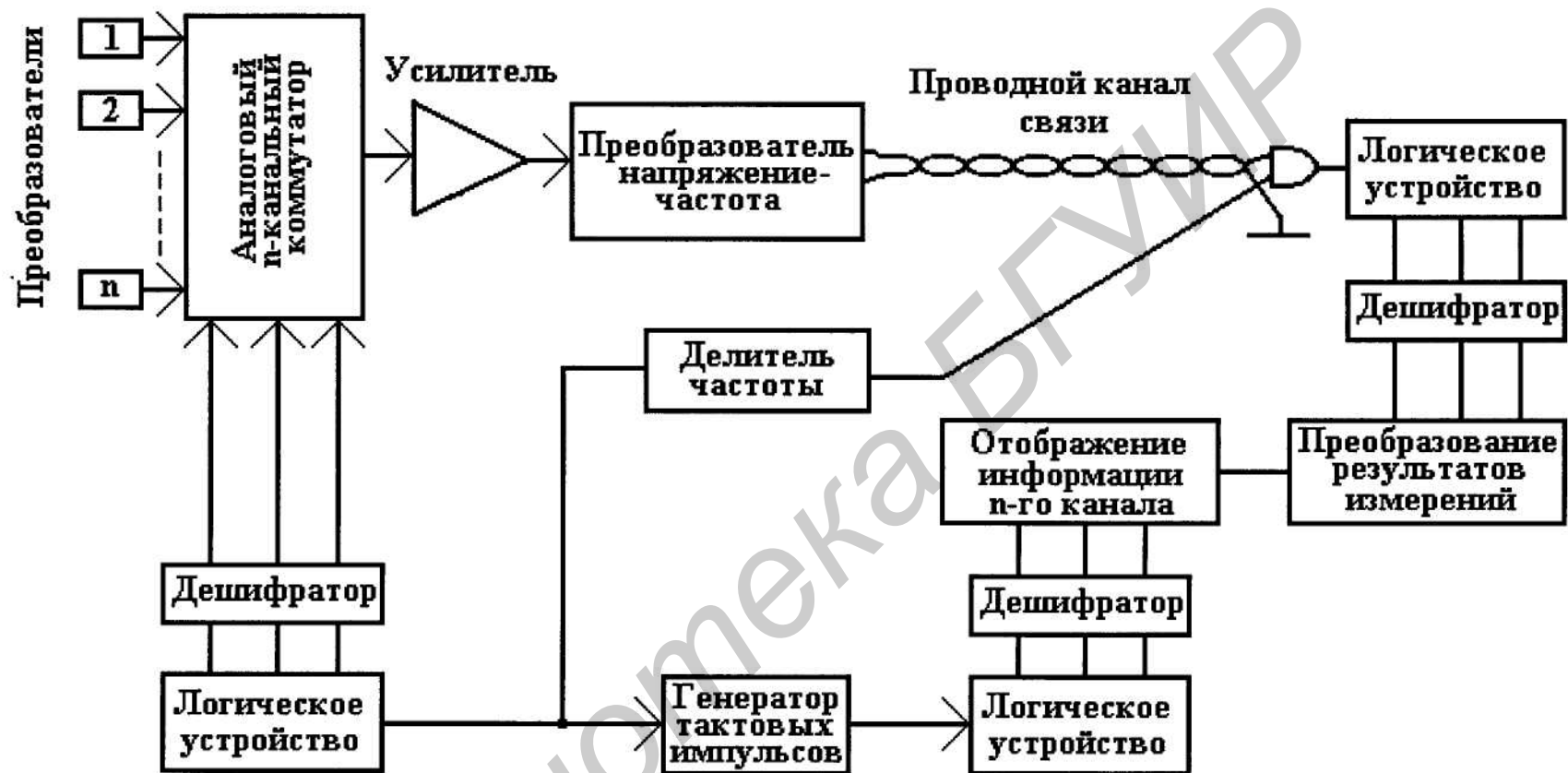


Рисунок 1.16 - Телеизмерительная система с преобразованием напряжения в частоту и передачей сигнала по двухпроводной линии

2 МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

2.1 Основные технические характеристики

Физическая величина X , характеризующая объект измерений (температура, давление, линейное или угловое перемещение и др.), называется измеряемой величиной. Совокупность операций, направленных на установление численного значения физической величины, составляет процесс измерения. Если при измерении используются электронные средства обработки сигнала, необходимо сначала преобразовать измеряемый параметр в эквивалентную электрическую величину, причем как можно точнее. Это значит, что полученная электрическая величина должна содержать всю информацию об измеряемом параметре. Преобразователь - это устройство, которое, подвергая воздействию физической величины, выдает эквивалентный сигнал, обычно электрической природы (заряд, ток, напряжение или комплексное сопротивление), являющийся функцией измеряемой величины:

$$Y = F(X), \quad (2.1)$$

где Y - выходная электрическая величина преобразователя, а X - входная величина (рисунок 2.1).

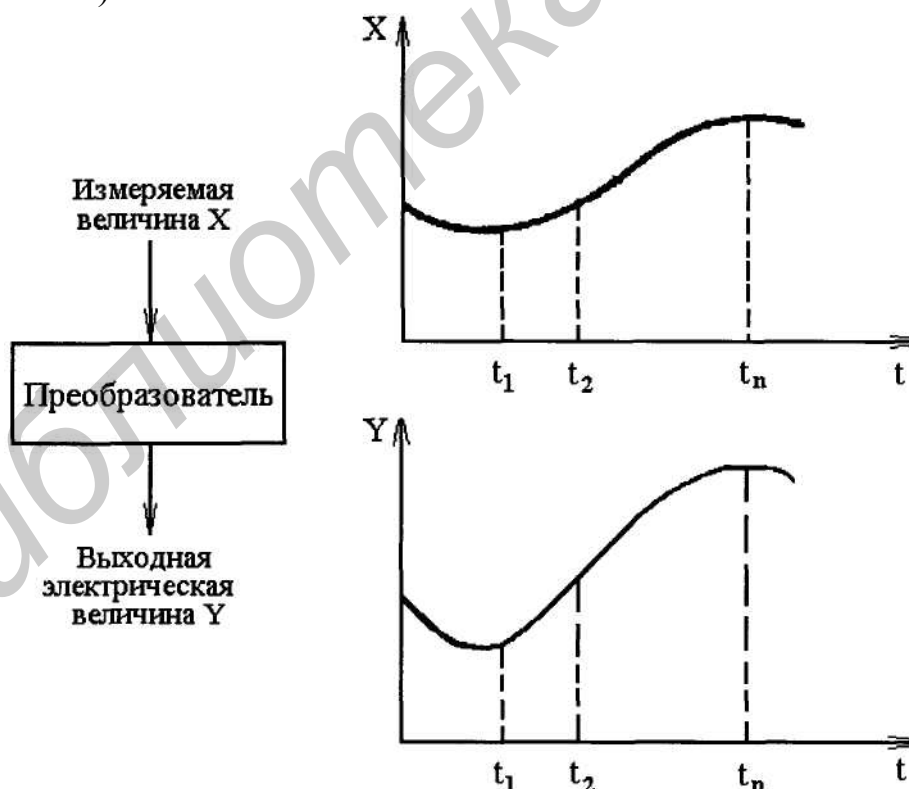


Рисунок 2.1 - Пример изменения во времени измеряемой величины X и соответствующей реакции Y преобразователя

Функция преобразования (ФП) - это функциональная зависимость выходной величины измерительного преобразователя от входной, описываемая ана-

литическим выражением, в виде таблиц или графически. В аналитически задаваемую функцию преобразования обычно входят конструктивные параметры преобразователя (датчика).

Измерив значение выходного сигнала Y преобразователя, можно определить тем самым значение входной величины X (рисунок 2.2). Соотношение $Y = F(X)$ выражает в общей теоретической форме физические законы, положенные в основу работы преобразователей. Для всех преобразователей функция преобразования - соотношение $Y = F(X)$ - в численной форме определяется экспериментально в результате градуировки. В этом случае для ряда точных значений X измеряют соответствующие значения Y , что позволяет построить градуировочную кривую (рисунок 2.2,а). Из этой кривой для всех полученных в результате измерения значений Y можно найти соответствующие значения искомой величины X (рисунок 2.2,б).

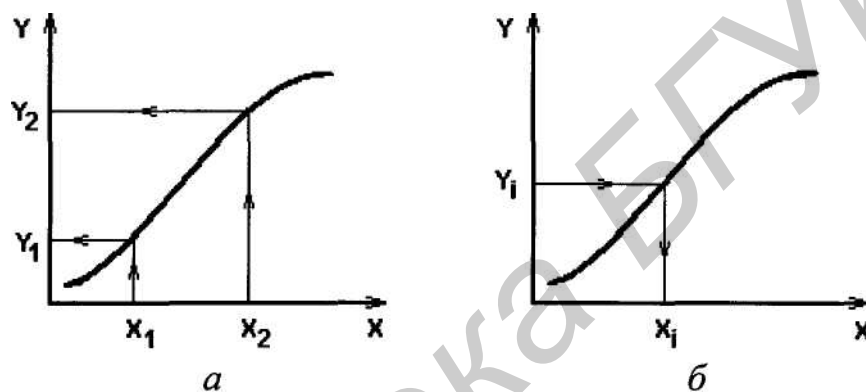


Рисунок 2.2 - Градуировочные характеристики преобразователя:
 а – получение градуировочной кривой по известным значениям измеряемой величины X ; б - использование градуировочной кривой для определения X

Чаще всего стремятся функцию преобразования сделать линейной, т.е. установить прямую пропорциональность между изменением входной величины Y и соответствующим приращением выходной величины X преобразователя.

Для описания линейной функции преобразования $Y = F(X) = Y_0 + S\Delta X$ достаточно двух параметров: начального значения выходной величины Y_0 (нулевого уровня), соответствующего нулевому (или какому-либо другому характерному) значению входной величины X , и показателя относительного наклона характеристики $S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$, называемого чувствительностью преобразователя.

Чувствительность преобразователя - это отношение изменения выходной величины измерительного преобразователя к вызывающему ее изменению входной величины. Как правило, это именованная величина с разнообразными единицами, зависящими от природы входной и выходной величин. Для реостатного преобразователя, например, единица чувствительности - Ом/мм, для термопары - мВ/К, для фотоэлемента - мкА/лм, для двигателя - об/(с·В) или Гц/В, для гальванометра - мм/мкА и т. д.

Важнейшей проблемой при проектировании и использовании преобразователя является обеспечение постоянства чувствительности, которая должна как

можно меньше зависеть от значений X (определяя линейность характеристики преобразования) и частоты их изменений, от времени и от воздействия других физических величин, характеризующих не сам объект, а его окружение (они называются влияющими на результаты измерений величинами).

Однако чувствительность каждого преобразователя постоянна только на определенном участке функции преобразования, который ограничивается с одной стороны пределом преобразования, а с другой - порогом чувствительности.

Предел преобразования данного преобразователя - это максимальное значение входной величины, которое еще может быть им воспринято без искажения и без повреждения преобразователя.

Порог чувствительности - это минимальное изменение значения входной величины, способное вызвать заметное изменение выходной величины преобразователя. Значение порога чувствительности принято определять равным половине полосы неоднозначности функции преобразования при малых значениях входной величины.

При нелинейной функции преобразования чувствительность зависит от значения входной величины.

2.2 Погрешности измерительных преобразователей

Важной характеристикой любого измерительного преобразователя является его основная погрешность, которая может быть обусловлена принципом действия, несовершенством конструкции или технологии его изготовления и проявляется при нормальных значениях влияющих величин или нахождении их в пределах нормальной области. Основная погрешность измерительного преобразователя может иметь несколько составляющих, обусловленных: неточностью образцовых средств измерений, с помощью которых проводилось определение функции преобразования; отличием реальной градуировочной характеристики от номинальной функции преобразования; приближенным (табличным, графическим, аналитическим) выражением функции преобразования; неполным совпадением функции преобразования при возрастании и убывании измеряемой неэлектрической величины (гистерезис функции преобразования); неполной воспроизводимостью характеристик измерительного преобразователя (чаще всего чувствительности).

При градуировке серии однотипных преобразователей оказывается, что их характеристики несколько отличаются друг от друга, занимая некоторую полосу. Поэтому в паспорте измерительного преобразователя приводится некоторая средняя характеристика, называемая *номинальной*. Разности между номинальной (паспортной) и реальной характеристиками преобразователя рассматриваются как его погрешности.

Погрешности измерительных преобразователей в целом аналогичны погрешностям СИ электрических величин. Поэтому кратко напомним общепринятую классификацию, уделяя особое внимание наиболее характерным для ИП видам погрешностей.

По характеру поведения во времени погрешности бывают *систематические, случайные и грубые*. В зависимости от условий эксплуатации - *основные* (для нормальных условий эксплуатации) и *дополнительные* (при выходе вли-

явших величин за пределы нормальных областей). Причиной основной могут быть идеализация принципа действия, неточность градуировки, невоспроизводимость от экземпляра к экземпляру ФП, несовершенство конструктивного исполнения ИП. Дополнительные погрешности определяются в первую очередь тем, насколько при разработке, изготовлении и эксплуатации ИП удалось "подавить" воздействие мешающих факторов на фоне естественной входной величины.

В зависимости от скорости изменения измеряемой величины различают *статические* и *динамические* погрешности. Статические не зависят от скорости изменения, а динамические зависят и равны нулю при равной нулю скорости. Таким образом, динамические погрешности определяются инерционными свойствами ИП.

По характеру зависимости погрешностей от преобразуемой величины X различают *аддитивные* и *мультипликативные*, проявляющиеся в искажении характера функции преобразования.

Аддитивными (погрешности смещения нуля) называются погрешности, значения которых не зависят от преобразуемой физической величины. При их наличии реальная 2 характеристика преобразователя смещена относительно номинальной 1 вверх (вниз) на постоянное значение (рисунок 2.3,а) и выходная величина Y для всех X оказывается больше (меньше) на Δ_0 . Погрешность нуля может быть как систематической, так и случайной. В первом случае ее можно компенсировать путем введения в прибор специальной регулировки для установки нуля. Во втором случае (рисунок 2.3,б) скорректировать её нельзя и ФП смещается случайным образом параллельно самой себе, образуя постоянную полосу погрешностей $\pm \Delta_0(2\Delta_0)$. Примером систематической аддитивной погрешности может служить погрешность из-за неточности установки нуля перед измерением. Примером случайной - погрешность из-за посторонних электрических наводок на линейные цепи.

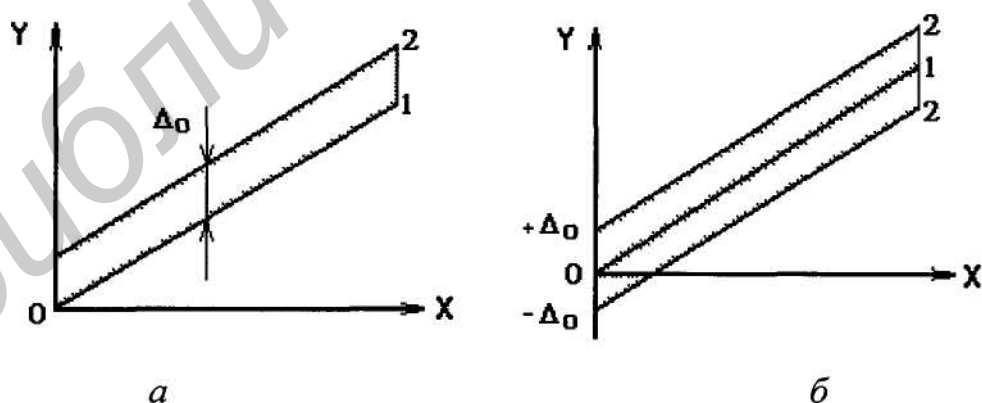


Рисунок 2.3 - Характеристики воздействия аддитивной погрешности на функцию преобразования

Мультипликативными (погрешности чувствительности) называются погрешности, пропорциональные значениям преобразуемой величины. При этом изменяется крутизна функции преобразования (рисунок 2.4), т.е. чувствительность и реальная характеристика преобразователя 2 отличаются от номиналь-

ной 1 на значение $\Delta_s(X)$ (рисунок 2.4,а) или образуют полосу погрешностей $\pm\Delta_s(X)$ при их случайном характере (рисунок 2.4,б). Примером систематической мультипликативной погрешности может служить изменение коэффициента передачи потенциометрической цепи с резистивными ИП вследствие старения. Примером случайной - погрешность из-за посторонних электрических наводок на нелинейную цепь.

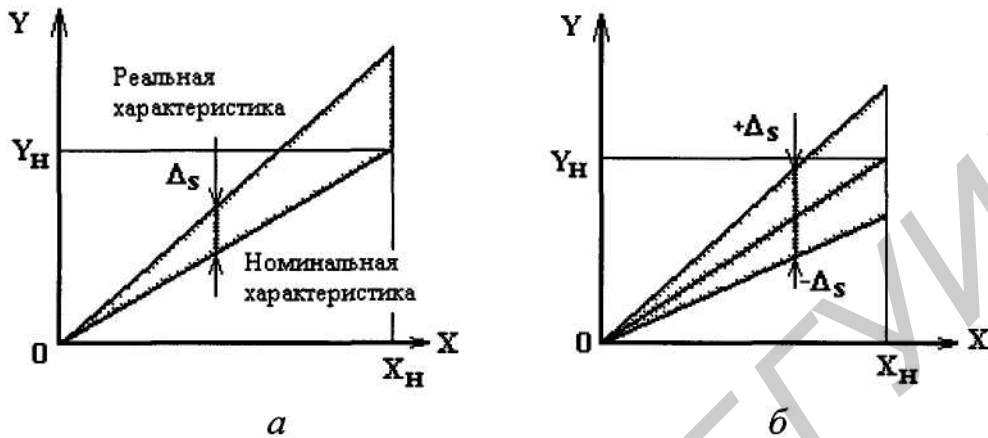


Рисунок 2.4 - Характеристики воздействия мультипликативной погрешности на функцию преобразования

В большинстве реальных преобразователей аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности присутствуют одновременно. В результате полоса погрешностей распределяется так, как показано на рисунке 2.5. При обработке результатов аддитивные и мультипликативные составляющие погрешности суммируются геометрически как некоррелированные составляющие.

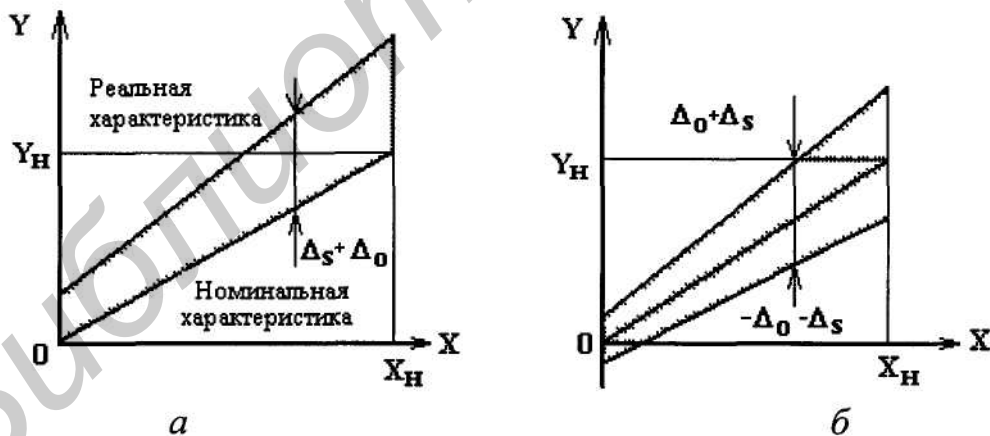


Рисунок 2.5 - Характеристики одновременного воздействия аддитивной и мультипликативной погрешностей на функцию преобразования

Для дискретных ИП (например, реостатные проволочные) характерна еще одна разновидность - погрешность квантования. Эта погрешность возникает во всех дискретных устройствах, в том числе в цифровых измерительных преобразователях.

Аналогично СИ электрических величин погрешности СИ неэлектрических величин могут быть представлены в виде абсолютной, относительной или

приведенной погрешности.

К числу важнейших параметров ИП относится *порог чувствительности*, под которым понимается значение преобразуемой (измеряемой) величины X_0 , численно равное значению аддитивной погрешности. Таким образом, порог чувствительности определяется погрешностью смещения нуля и ограничивается, как правило, собственными шумами преобразователя. Другим параметром, связанным с погрешностями, является *предел преобразования* (предел измерения) X_k , то есть максимальное значение входной величины, которое может преобразовать ИП без существенных искажений. Интервал значений от X_0 до X_k , в котором погрешность не превышает 10%, называется *полным диапазоном преобразования* данного СИ. В полном диапазоне проводить измерения нецелесообразно, так как на его краях абсолютная погрешность измерения достигает 100 %, т.е. результат измерения не определен. Поэтому вводится понятие *рабочий диапазон преобразований* (измерений), в пределах которого удовлетворяются заданные требования к точности. Таким образом, верхний предел рабочего диапазона определяется мультипликативной составляющей погрешности.

Подводя итог рассмотрению погрешностей и параметров преобразователей НЭВ, следует отметить, что основными показателями их качества являются рабочий диапазон преобразования и погрешность измерения. При этом методы нормирования точностных характеристик те же, что и для СИ электрических величин.

Дополнительные погрешности измерительного преобразователя, обусловленные его принципом действия, несовершенством конструкции или технологии изготовления, проявляются при отклонении влияющих величин от нормальных значений.

Кроме рассмотренных выше характеристик, измерительные преобразователи характеризуются: номинальной статической функцией преобразования, вариацией выходного сигнала, выходным сопротивлением, динамическими характеристиками.

К важнейшим неметрологическим характеристикам относятся также габариты, масса, удобство монтажа и обслуживания, взрывобезопасность, устойчивость к механическим, тепловым, электрическим и другим перегрузкам, надежность, стоимость изготовления и т.п.

2.3 Методы уменьшения погрешностей преобразования

Повышение точности измерения - одна из важнейших и актуальнейших задач измерительной техники. В целом она решается путем уменьшения значений погрешностей во всех звеньях системы "объект измерения - измерительное устройство (ИУ) - оператор - внешняя среда". Однако наиболее существенной обычно является погрешность ИП, и поэтому повышению точности ИП придается первостепенное значение. К тому же уменьшение погрешности часто предопределяет улучшение других параметров средства измерения. Например, расширение диапазона измеряемых величин в сторону малых значений связано с необходимостью уменьшения погрешностей аддитивного характера, а в сторону больших - с улучшением линейности ФП, т.е. опять же с уменьшением погрешности нелинейности.

В настоящее время известно множество методов уменьшения погрешностей ИП, которые можно разделить на следующие группы:

- технологические способы стабилизации параметров и характеристик;
- конструктивные методы пассивной и активной защиты от быстро и медленно изменяющихся мешающих факторов;
- методы коррекции систематических погрешностей;
- методы статистической обработки и усреднения результатов (уменьшение случайных погрешностей);
- методы линеаризации ФП.

Следует отметить, что такое разделение в значительной мере условно и порой четко их разграничить не удается.

Стабилизация параметров ИУ технологическим путем исключает применение более стабильных материалов, качественных и стабильных комплектующих изделий, искусственное старение элементов, совершенствование технологии и повышение общей культуры производства. Этот путь приводит к удорожанию СИ, но достигается более высокое их качество. Чаще всего используется в сочетании с другими методами.

Методы пассивной защиты направлены на уменьшение, прежде всего, случайных погрешностей, обусловленных быстро изменяющимися во времени факторами: электромагнитными наводками, вибрацией и т.п. Реализуются экранированием, частотной фильтрацией, амортизацией аппаратуры и т.д. Достоинства: простота, низкая стоимость, надежность. Недостаток: низкая защищенность от постоянных во времени и медленно меняющихся мешающих величин. От этого свободны методы активной защиты, которые реализуются путем стабилизации влияющих величин, например, питанием прибора от стабилизированных источников, термостатированием наиболее ответственных и подверженных влиянию температуры узлов, стабилизацией аппаратуры в пространстве. Основным недостатком - сложность и высокая стоимость. Активные методы применяются обычно в сочетании с пассивными.

Коррекция систематических погрешностей может осуществляться на всех этапах измерительного эксперимента как "вручную", так и автоматически. Методы автоматической коррекции высокоэффективны, сравнительно просто реализуются (особенно с применением микроэлектроники), позволяют использовать как внешнюю, так и встроенную вычислительную технику. В литературе эти методы получили название "структурных", "алгоритмических", "текстовых". Объясняется это тем, что в настоящее время они интенсивно развиваются и еще не имеют единой терминологии и законченной классификации. Наиболее удачен, на наш взгляд, термин "структурные методы", так как при реализации их повышение точности достигается путем введения в схему прибора дополнительных, структурных звеньев. В соответствии с ней в зависимости от объекта воздействия структурные методы делятся на две группы: методы стабилизации реальной ФП и методы коррекции результата. При реализации первой группы методов тем или иным способом автоматически обеспечивается постоянство во времени, независимость от влияющих факторов и близость к номинальной реальной ФП, т.е. именно ФП является объектом воздействия. Особенностью вто-

рой является то, что в процессе измерений производится оценка погрешности и по ее результатам суммарная погрешность минимизируется. Причем если в первом случае результат достигается воздействием на одну из характеристик ИУ, то во втором - на входной или выходной сигнал. По способу представления информации обе группы могут подразделяться на аналоговые и цифровые методы.

Методы стабилизации, в свою очередь, подразделяются на метод с использованием отрицательной обратной связи (ООС) и метод составных параметров (параметрический). Метод ООС широко известен и применяется во многих областях радиоэлектроники, автоматики и измерительной техники для аналогичных целей. Он включает в себя практически все разновидности метода сравнения, в том числе и периодического, а также весьма перспективный итерационный и его разновидности (метод постоянного шага, метод секущей и т.д.). Задачи, которые решаются методом ООС, по своей сути близки к задачам теории автоматического регулирования и теории инвариантности. Характерной его особенностью является наличие цепи ООС, с точностью и стабильностью которой связаны основные ограничения метода. Следует отметить, что введение ООС, являясь универсальным способом повышения точности, не во всех практических случаях может решить задачу снижения погрешности до необходимого уровня. Во всех точных приборах она есть обязательно, но часто ее недостаточно. Метод ООС очень широко используется при измерениях неэлектрических величин.

Метод составных параметров также весьма распространен при измерениях НЭВ и используется, в первую очередь, для коррекции систематических погрешностей, являющихся функцией случайных аргументов, например температуры. Суть метода - во введении в схему прибора дополнительных элементов, на которые воздействуют влияющие факторы, но не воздействует измеряемая величина. Эти элементы включены в схему прибора так, что изменение их параметров корректирует ФП в направлении, обратном воздействию мешающих факторов. Характерным примером является температурная компенсация функции преобразования тензорезисторов, при которой в смежное плечо мостовой цепи включается аналогичный тензорезистор, находящийся в таких же температурных условиях, что и основной, но не подверженный действию измеряемой деформации. В этом случае изменение температуры не приведет к нарушению баланса мостовой цепи. В отличие от метода ООС, параметрический метод не является универсальным, так как для каждой влияющей величины необходимо вводить отдельные дополнительные элементы во всем диапазоне изменений влияющего фактора и измеряемой величины. Область применения метода - уменьшение медленно меняющихся погрешностей (температурных, дрейфа нуля и т.д.).

Метод коррекции результата включает в себя: метод вспомогательных измерений, образцовых сигналов и обратного преобразования. Различие между ними - в алгоритме образования корректирующего сигнала.

Метод вспомогательных измерений заключается в измерении с помощью дополнительных устройств величин, вызывающих погрешность. Результаты

этих измерении подаются на вычислительное устройство, хранящее в памяти зависимость погрешности от влияющих величин и вырабатывающее корректирующий сигнал по результатам вычислений.

Метод образцовых сигналов состоит в использовании известного сигнала, подающегося одновременно на входы исполнительного устройства и прямого ИП. ИП формирует образцовый выходной сигнал, который сравнивается в вычитающем устройстве с входным сигналом. Разность выходного и входного сигналов запоминается и используется для коррекции при подаче на вход и измеряемой величины. Основная особенность - в разновременности формирования корректирующего и измерительного сигналов.

Метод обратного преобразования состоит в том, что выходной сигнал после прохождения через обратный ИП сравнивается с входной величиной. Устройство сравнения осуществляет их вычитание и формирует корректирующий сигнал. Основное отличие от метода образцовых сигналов состоит в разновременности сравнения.

Наиболее распространенным из этих трех методов является метод образцового сигнала. Остальные методы применяются значительно реже. Отметим, что наиболее целесообразно применять метод коррекции результатов в тех случаях, когда необходимо уменьшить погрешности преобразований функционально и конструктивно законченных устройств, а также при разработке ИУ, предназначенных как для самостоятельного применения с невысокой точностью, так и в сочетании с внешними устройствами, повышающими точность преобразования.

Методы статистической обработки заключаются в многократном измерении одной и той же величины с последующим усреднением результата. Усреднение может осуществляться как в аналоговой, так и в цифровой формах. В результате уменьшаются случайные погрешности, но значительно возрастают временные затраты. С математической точки зрения методы статистической обработки аналогичны методу фильтрации, однако систематические погрешности при этом не уменьшаются. Эти методы направлены на уменьшение погрешности результата измерения и в незначительной мере некоторых составляющих случайной погрешности СИ (например погрешности собственных шумов).

Все рассмотренные методы направлены прежде всего на уменьшение аддитивных и мультипликативных погрешностей, и только некоторые из них (например метод ООС) позволяют уменьшить погрешность из-за нелинейности ФП. Поэтому методы линеаризации выделены в отдельную группу и рассматриваются отдельно.

3 ГЕНЕРАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

3.1 Индукционные измерительные преобразователи

3.1.1 Принцип действия индукционных преобразователей

Индукционным измерительным преобразователем называется преобразователь, принцип действия которого основан на законе электромагнитной индукции. Преобразователь имеет катушку. При воздействии входной величины на преобразователь изменяется потокосцепление Ψ катушки с внешним по отношению к катушке магнитным полем:

$$\Psi = w \cdot \Phi = w \cdot B \cdot S, \quad (3.1)$$

где w - число витков катушки; Φ - проходящий через катушку магнитный поток; B - магнитная индукция; S - площадь поперечного сечения катушки.

При этом в катушке наводится ЭДС:

$$E = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (3.2)$$

ЭДС в катушке может наводиться при изменении во времени любой из перечисленных величин w , B , S .

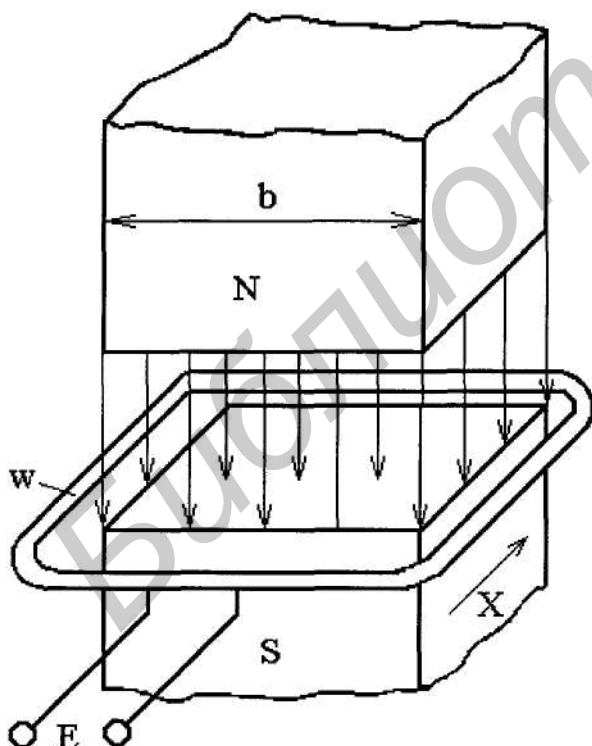


Рисунок 3.1 – Преобразователь с неподвижным магнитом и подвижной катушкой

В качестве примера рассмотрим преобразователь, который представляет собой магнитную систему с постоянным магнитом, в воздушном зазоре которой перемещается катушка (рисунок 3.1). При движении катушки в направлении X изменяется площадь сечения катушки, находящейся в магнитном поле, $S = b \cdot X$. Это приводит к изменению потокосцепления $\Psi = w \cdot B \cdot b \cdot X$, и в катушке наводится ЭДС:

$$E = -\frac{d\Psi}{dt} = -w \cdot B \cdot b \frac{dX}{dt} \quad (3.3)$$

Индукционные преобразователи служат для преобразования линейной $\frac{dX}{dt}$ или

угловой $\frac{d\alpha}{dt}$ скорости перемещения ка-

тушки относительно магнитного поля в ЭДС. Они преобразуют механическую энергию линейного или углового перемещения катушки в электрическую энергию.

3.1.2 Преобразователи скорости и вибрации

Индукционные преобразователи генерируют ЭДС только при перемещении катушки в магнитном поле. По этой причине преобразователи этого типа могут служить для преобразования линейной скорости в ЭДС при небольших линейных перемещениях. Они обычно применяются для измерения скорости вибрации, когда ее амплитуда не превышает нескольких сантиметров. Одно из конструктивных решений преобразователя скорости вибрации показано на рисунке 3.2,а. Преобразователь имеет кольцевой магнит I, расположенный внутри стального ярма 2. Магнитный поток от постоянного магнита проходит по центральному цилиндрическому сердечнику через воздушный зазор и полюсной наконечник 3 с цилиндрической расточкой. В цилиндрическом воздушном зазоре находится намотанная на каркас измерительная катушка 4, которая может перемещаться в воздушном зазоре вдоль оси преобразователя.

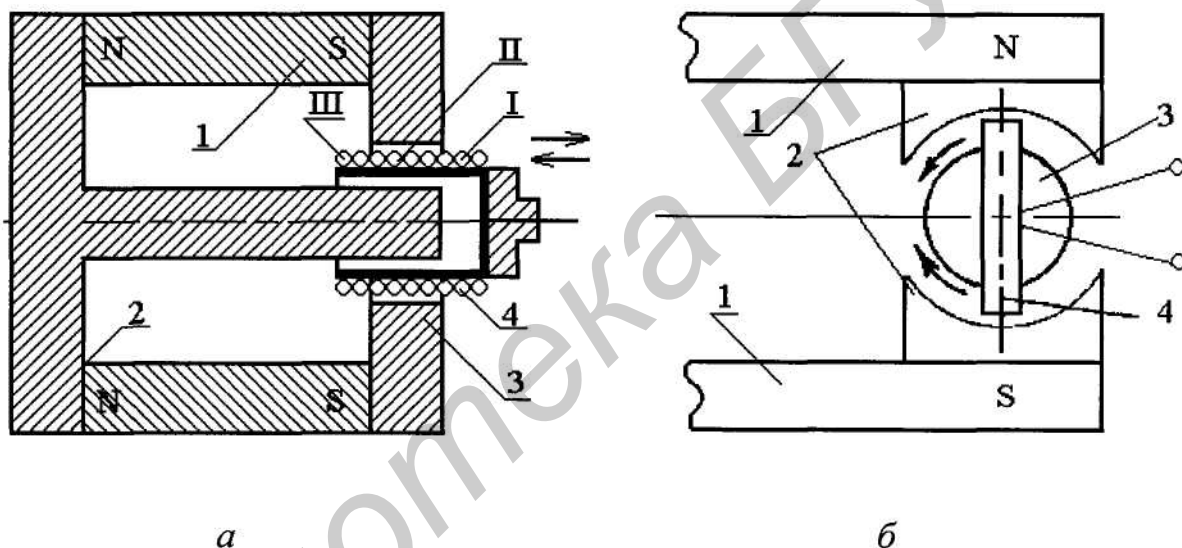


Рисунок 3.2 - Примеры индукционных преобразователей: а - преобразователь линейных вибраций; б - преобразователь угловых вибраций

Измерительную катушку 4 условно можно разделить на три части (см. рисунок 3.2,а). Часть I находится вне магнитопровода и магнитный поток в нее не заходит, т.е. ЭДС в этой части катушки не индуцируется. Часть II находится в воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и цилиндрическим сердечником. Магнитный поток, пронизывающий витки этой катушки, не изменяется во времени, число витков также остается постоянным. В этой части катушки ЭДС также не наводится. Часть III катушки находится вне воздушного зазора, но внутри магнитной системы. Магнитный поток, проходящий через витки этой катушки, также постоянен, но при вибрации катушки изменяется число витков. Изменение числа витков приводит к изменению потокосцепления и наводит ЭДС. Витки катушки обычно наматываются равномерно. При этом ЭДС преобразователя пропорциональна скорости вибрации.

Индукционные преобразователи могут применяться и для измерения угло-

вой виброскорости. Схема такого преобразователя показана на рисунке 3.2,б. Он состоит из постоянного магнита 1, полюсных наконечников 2, цилиндрического стального сердечника 3 и катушки 4. Устройство преобразователя аналогично устройству магнитоэлектрического измерительного механизма. При повороте катушки вокруг оси сердечника ее потокосцепление с полем постоянного магнита изменяется и в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная угловой скорости перемещения объекта измерения.

3.1.3 Тахометрические преобразователи

Преобразователи этого типа представляют собой электромашинные генераторы. В качестве примера рассмотрим синхронный преобразователь с вращающимся постоянным магнитом (рисунок 3.3,а).

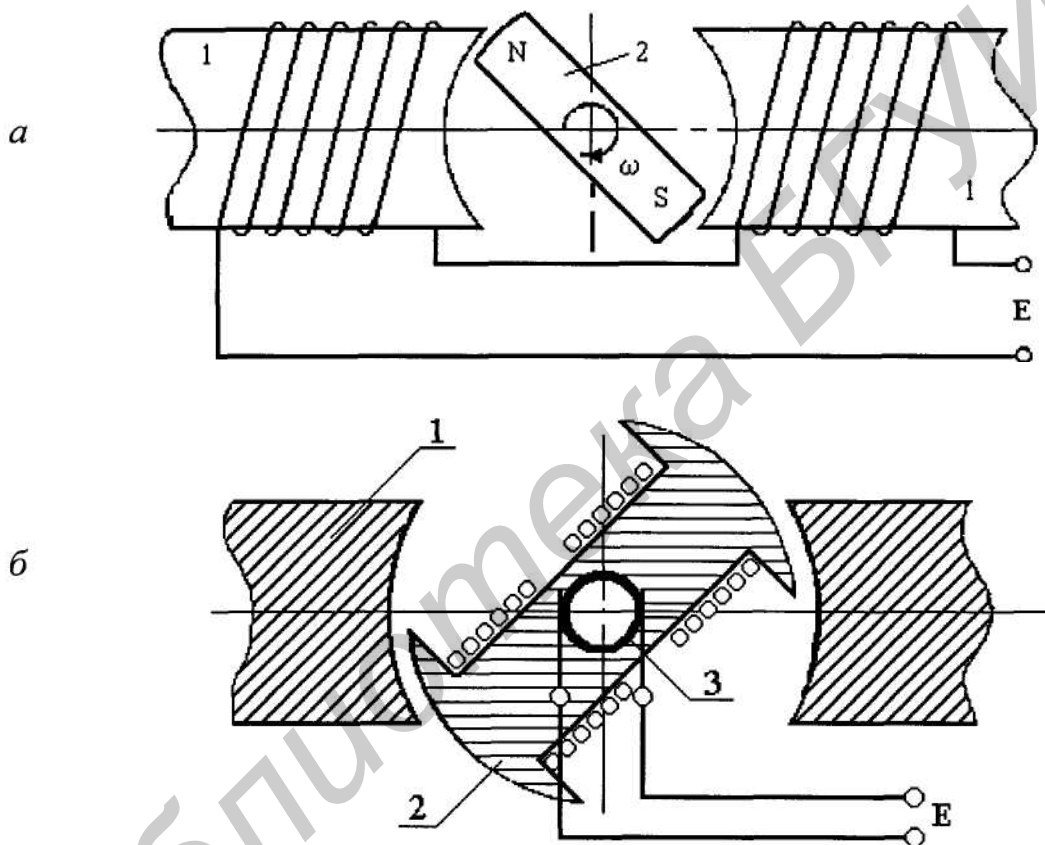


Рисунок 3.3 - Устройство тахометрических преобразователей: а - с неподвижной катушкой и подвижным магнитом; б - с подвижной катушкой и неподвижным магнитом

ЭДС индуцируется в данном преобразователе за счет изменения магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом при его вращении. Частота его выходного сигнала равна или кратна частоте вращения вала. Преобразователь состоит из статора 1, на котором намотана обмотка, и ротора 2 с закрепленным на нем постоянным магнитом. Статор выполнен в виде полюсных наконечников, изготовленных из магнитомягкого материала, с цилиндрической расточкой. При вращении магнита изменяется магнитный поток, проходящий через обмотку, и в ней индуцируется переменная ЭДС. Амплитуда и частота ЭДС пропорциональны частоте вращения ротора. Частота выходного сигнала опре-

деляется соотношением $f = n \frac{p}{60}$, где n - частота вращения, об/мин; p - число пар полюсов.

На рисунке 3.3,б приведена схема тахометрического преобразователя постоянного тока с возбуждением от постоянного магнита, расположенного на статоре 1. Измерительная обмотка расположена на роторе 2, в которой при вращении образуется переменная ЭДС, снимаемая с вращающегося ротора с помощью коллектора 3 и скользящих по нему щеток. При этом переменная ЭДС выпрямляется.

При подключении измерительного прибора к преобразователю последний отдает в измерительную цепь некоторую электрическую мощность, которая оказывается прямо пропорциональной механической мощности. Механическая мощность определяется соотношением

$$P_M = \omega \cdot M. \quad (3.4)$$

Здесь ω - угловая частота вращения ротора; M - необходимый для этого момент, связанный с электрической мощностью выражением

$$M = \frac{P_{эл}}{\eta \cdot \omega}, \quad (3.5)$$

где η - коэффициент полезного действия (КПД).

Из приведенных соотношений видно, что с увеличением ЭДС, генерируемой преобразователем, увеличивается механический момент на его валу.

3.1.4 Импульсные преобразователи

Преобразователи этого типа (рисунок 3.4) представляют собой катушку 1 с разомкнутым ферромагнитным сердечником.

Сердечник катушки предварительно намагничивается. Для измерения частоты вращения вала 2 катушку располагают рядом с ним на небольшом расстоянии. На валу монтируется один или несколько ферромагнитных зубцов 3. При вращении вала зуб проходит вблизи катушки и уменьшает магнитное сопротивление сердечника R_M (см. рисунок 3.4). В соответствии с этим изменяется магнитный поток, пронизывающий катушку, и в ней индуцируется ЭДС. С выводов катушки снимается последовательность двуполярных импульсов, частота повторения которых равна частоте прохождения зубцов вблизи катушки, т.е. пропорциональна частоте вращения вала.

В качестве измерительного прибора с импульсными индукционными преобразователями используется, как правило, цифровой частотомер, регистрирующий количество импульсов с выхода индукционного преобразователя в единицу времени. Другими словами, показания цифрового частотомера равны частоте вращения вала.

3.1.5 Погрешность индукционных преобразователей

ЭДС индукционных преобразователей пропорциональна скорости перемещения катушки лишь при условии, что индукция B постоянна на протяжении

всего пути ее перемещения. Непостоянство индукции вызывает возникновение погрешности.

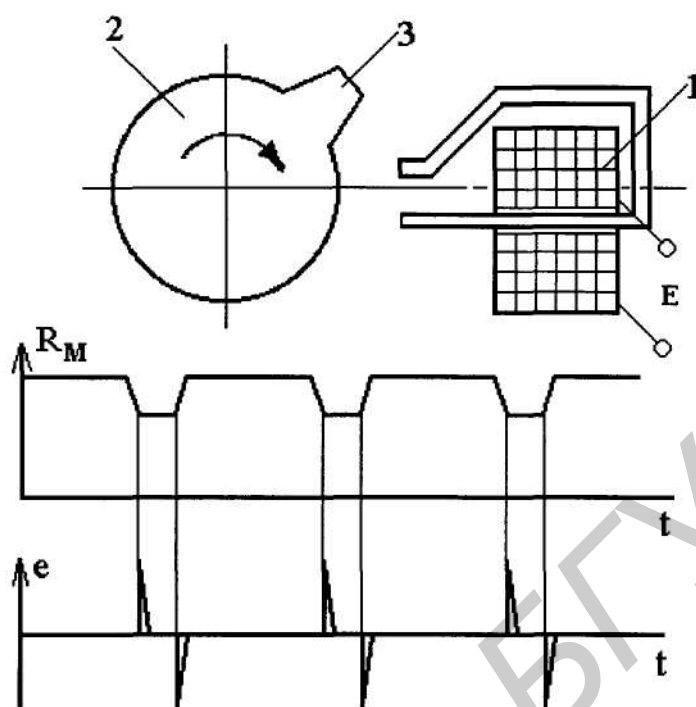


Рисунок 3.4 - Импульсный преобразователь и временные диаграммы его работы

Погрешность индукционных преобразователей также во многом зависит от тока, который потребляет вторичный преобразователь. Проходя по измерительной обмотке индукционного преобразователя, этот ток создает магнитное поле, которое согласно правилу Ленца направлено встречно направлению основного поля и производит размагничивающее действие. Вследствие этого суммарная индукция уменьшается, уменьшается и ЭДС преобразователя. Это явление, имеющее место в электрических машинах, и в частности в тахометрических преобразователях, называется реакцией якоря. Вследствие реакции якоря уменьшается чувствительность тахометрического преобразователя, а функция преобразования становится нелинейной, что приводит к появлению погрешности преобразования. Для уменьшения погрешности следует уменьшить ток вторичного преобразователя. Имеются также конструктивные методы уменьшения этой погрешности.

Описанный вид погрешности присущ тахометрическим преобразователям, поскольку их вторичными преобразователями служат электромеханические приборы с большим потреблением мощности.

Влияние тока нагрузки на функцию преобразования преобразователей вибрации меньше, чем на функцию преобразования тахометрических преобразователей. Нагрузкой преобразователей вибрации обычно являются электронные усилители. Они, как правило, имеют большое входное сопротивление, которое ограничивает ток преобразователя и тем самым уменьшает погрешность преобразования.

Если нагрузка индукционного преобразователя потребляет значительный ток, то может возникнуть погрешность вследствие изменения внутреннего сопротивления преобразователя, обусловленная изменением падения напряжения на его внутреннем сопротивлении. Изменение внутреннего сопротивления может быть обусловлено температурными изменениями сопротивления измерительной обмотки и сопротивления линии связи с вторичным прибором. Внутреннее сопротивление тахометрического преобразователя постоянного тока нестабильно вследствие изменения сопротивления коллектора.

При изменении частоты вращения синхронного тахометрического преобразователя изменяется как ЭДС, так и ее частота. При изменении частоты меняются его входное сопротивление и входное сопротивление его нагрузки. Изменения сопротивлений могут привести к нелинейной функции преобразования прибора в целом, даже если ЭДС тахометрического преобразователя линейно зависит от измеряемой скорости.

Выходной величиной синхронных тахометрических преобразователей является либо значение генерируемой ЭДС, либо ее частота. В последнем случае в качестве вторичного преобразователя используется частотомер. Применяемые стрелочные частотомеры не должны изменять своих показаний при изменении напряжения.

Таким образом, погрешность индукционных преобразователей в значительной степени зависит от режима, в котором они работают. Наибольшая погрешность возникает в режиме, при котором через нагрузку протекает значительный ток. Однако для работы в таком режиме используют наиболее простой вторичный преобразователь. Меньшие погрешности имеют место в режиме холостого хода, когда ток в измерительной катушке практически отсутствует. При работе в таком режиме требуется более сложная и дорогая аппаратура, используются измерительные механизмы повышенной чувствительности или усиленные устройства.

При измерении частоты вращения вала наименьшую погрешность можно получить, если в качестве выходной величины тахометрического преобразователя используется частота изменения ЭДС, а в качестве вторичного преобразователя - цифровой частотомер. При этом исключается влияние нестабильности величины выходного напряжения преобразователя и используется высокая точность цифрового частотомера.

3.2 Пьезоэлектрические измерительные преобразователи

3.2.1 Принцип действия пьезоэлектрических преобразователей

Принцип действия пьезоэлектрического преобразователя основан на явлении пьезоэффекта в кристаллических диэлектриках. Они могут электризоваться под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) или деформироваться в электрическом поле (обратный пьезоэффект).

В кристаллических диэлектриках различно заряженные ионы располагаются в определенном порядке, образуя кристаллическую решетку. Поскольку разноименно заряженные ионы чередуются и расположены так, что их заряды взаимно компенсируются, в целом кристалл электрически нейтрален. Одной из особенностей кристаллов является их симметрия. Кристаллы могут быть сим-

метричны относительно некоторой оси, плоскости или центра. В соответствии с видом симметрии по определенным законам построена кристаллическая решетка и расположены ионы. Электрическая структура кристалла, симметричного относительно оси или плоскости, схематически показана на рисунке 3.5.

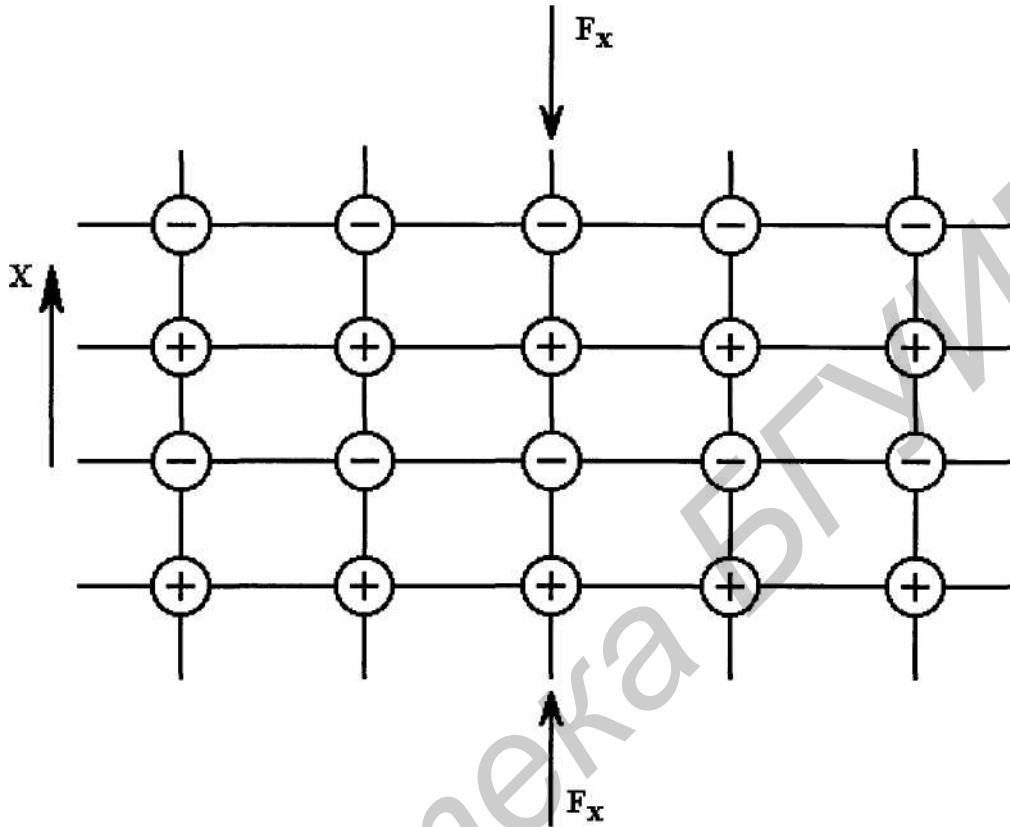


Рисунок 3.5 – Электрическая структура кристалла кварца

В направлении оси X ионы различных знаков чередуются и взаимно компенсируют свои заряды. При действии на кристалл силы F_x в направлении X кристаллическая решетка деформируется, расстояния между положительными и отрицательными ионами изменяются и кристалл электризуется в этом направлении. На его гранях, перпендикулярных оси X , появляется заряд

$$q = d_{11} \cdot F_x, \quad (3.6)$$

пропорциональный силе F_x . Коэффициент d_{11} , зависящий от вещества и его состояния, называется пьезоэлектрическим модулем. Индексы при коэффициенте d_{11} определяются ориентацией силы и грани, на которой появляется заряд, относительно кристаллических осей. При изменении ориентации пьезоэлектрический модуль изменяется.

Вещества, обладающие пьезоэффетом, называются пьезоэлектриками. Для изготовления измерительных преобразователей наибольшее применение нашли естественные кристаллы кварца и искусственные пьезокерамические материалы – пьезокерамики.

Как правило, пьезоэлектрический преобразователь представляет собой пластинку, изготовленную из пьезоэлектрического материала, на которую наносятся два изолированных друг от друга электрода. В зависимости от вещества, формы преобразователя и ориентации кристаллических осей входной величиной могут быть как силы, производящие деформацию сжатия - растяжения, так и силы, производящие деформацию сдвига. Последний вид деформации может использоваться в преобразователях, входной величиной которых является момент силы.

Выходной величиной пьезоэлектрического преобразователя является напряжение на электродах

$$E = \frac{q}{C}, \quad (3.7)$$

где q - пьезоэлектрический заряд; C - емкость, образованная электродами преобразователя.

Подставляя (3.6) в (3.7), получим функцию преобразования пьезоэлектрического преобразователя

$$E = \frac{d_{11} \cdot F}{C}. \quad (3.8)$$

Если преобразователь имеет форму плоской пластины, то емкость между его электродами будет определяться хорошо известным соотношением

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 s}{\delta}, \quad (3.9)$$

где ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрического вещества; s - площадь электродов; δ - расстояние между электродами.

Подставляя (3.9) в (3.8), получим функцию преобразования пьезоэлектрического преобразователя

$$E = \frac{d_{11} \cdot \delta \cdot F}{\epsilon_r \epsilon_0 s}. \quad (3.10)$$

ЭДС, возникающая на электродах преобразователя, довольно значительная - единицы вольт. Однако если сила постоянна, то измерить ЭДС трудно, поскольку заряд мал и быстро стекает через входное сопротивление вольтметра. Если же сила переменна, то образуется переменная ЭДС, измерить которую значительно проще. Если при этом период изменения силы много меньше постоянной времени, определяемой емкостью преобразователя и сопротивлением утечки заряда, то процесс утечки не влияет на выходное напряжение преобразователя. При синусоидальном законе изменения силы

$$F = F_m \sin \omega t \quad (3.11)$$

ЭДС изменяется тоже синусоидально:

$$E = E_m \sin \omega t. \quad (3.12)$$

Измерение переменной силы сводится к измерению переменной ЭДС или напряжения.

Область применения пьезоэлектрических преобразователей весьма обширна:

1. Преобразователи, в которых используется прямой пьезоэффект, применяются в приборах для измерения силы, давления, ускорения.

2. Преобразователи, в которых используется обратный пьезоэффект, применяются в качестве излучателей ультразвуковых колебаний, преобразователей напряжения в деформацию, исполнительных элементов автоматических систем, обратных преобразователей приборов уравнивания и т.д.

3. Преобразователи, в которых используются одновременно прямой и обратный пьезоэффекты, - пьезорезонаторы, имеющие максимальный коэффициент преобразования одного вида энергии в другой на резонансной частоте и резко уменьшающийся коэффициент преобразования при отступлении от резонансной частоты. Включение их в цепь положительной обратной связи усилителя и обеспечение возможности управления их собственной резонансной частотой обеспечивает их применение в качестве измерительных преобразователей неэлектрических (температура, давление, ускорение и т.п.) величин в частоту.

3.2.2 Кварц (SiO_2)

Призматическая часть кристалла кварца и расположение кристаллических осей показаны на рисунке 3.6. Ось X - электрическая, ось Y - механическая, ось Z - оптическая. Для использования в измерительных преобразователях из кристалла вырезается пластинка. При действии на пластинку сил вдоль осей X или Y происходит поляризация кристалла.

На гранях, перпендикулярных оси X , появляются заряды

$$q = d_{11} F_x \text{ или } q = d_{12} \frac{Q_x}{Q_y} F_y, \quad (3.13)$$

где F_x и F_y - соответствующие силы; Q_x и Q_y - площади граней, перпендикулярных осям X и Y ; $d_{11} = d_{12} = 2,31 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н - пьезоэлектрические модули.

Возникновение заряда под действием силы F_x называется продольным пьезоэффектом, возникновение заряда под действием силы F_y - поперечным пьезоэффектом. Действие силы F_z вдоль оси Z не вызывает возникновения электрических зарядов.

Кварцевая пластинка имеет высокую механическую прочность. Допустимые напряжения могут достигать до $(0,7 \dots 1)10^8$ Па/м², что позволяет прикладывать к ней большие измеряемые силы. Она имеет большой модуль упругости, что обуславливает ее высокую жесткость и очень малое собственное внутреннее трение. Последнее обстоятельство определяет высокую добротность изго-

товленных из кварца пластинок. Кварцевые пластинки используются для изготовления измерительных преобразователей силы и давления.

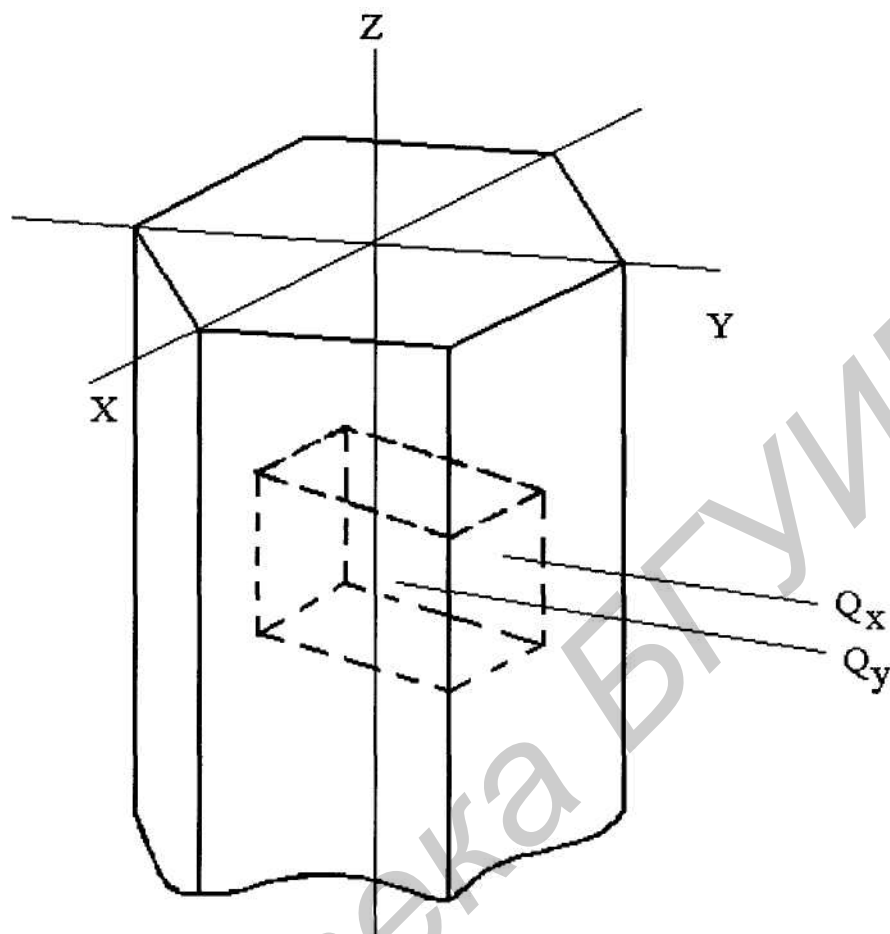


Рисунок 3.6 - Кристалл кварца и пластинка для изготовления преобразователя

Кварц - материал с высокой твердостью, он трудно обрабатывается и может применяться для изготовления пластинок лишь простой формы.

Пьезоэлектрический модуль d_n остается практически постоянным до температуры 200 °С, а затем с увеличением температуры немного уменьшается. Предельная рабочая температура составляет 500 °С. При температуре 573 °С (температура Кюри) кварц теряет пьезоэлектрические свойства. Относительная диэлектрическая проницаемость кварца равна 4,5 и несколько увеличивается с увеличением температуры. Удельное объемное сопротивление кварца превышает 10^{12} Ом.

Электрические и механические свойства кварца имеют высокую стабильность. За 10 лет изменение характеристики не превосходит 0,05 %.

3.2.3 Пьезоэлектрическая керамика

Пьезокерамика имеет доменное строение, причем домены поляризованы. При отсутствии внешнего электрического поля поляризация отдельных доменов имеет хаотическое направление и на поверхности изготовленного из пьезокерамики тела электрический заряд отсутствует. В электрическом поле домены ориентируются в направлении этого поля, вещество поляризуется и на поверхности тела появляются заряды. При снятии поля домены сохраняют свою ориентацию, керамика остается поляризованной, но поверхностный заряд с тече-

нием времени стекает. Если к телу, изготовленному из пьезокерамики, после обработки в электрическом поле приложить механическую нагрузку, то под ее действием домены изменят свою ориентацию и, соответственно, изменится поляризация вещества. Изменение поляризации вызовет появление заряда на поверхности тела. Тело, изготовленное из поляризованной керамики, при воздействии механической силы электризуется так же, как и естественные пьезоэлектрические монокристаллы.

Типичным примером пьезоэлектрической керамики является титанат бария $BaTiO_3$. Значения его пьезоэлектрического модуля обычно находятся в пределах $d_{31} = (4,35 \dots 8,35) \cdot 10^{-11}$ Кл/Н; диэлектрическая проницаемость ϵ_r - в пределах 1100...1800; тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, характеризующий внутреннее удельное сопротивление, - в пределах 0,3...3%. Зависимость возникающего заряда от приложенной силы имеет некоторую нелинейность и гистерезис. Свойства пьезокерамик зависят также от технологии их изготовления и напряженности поляризующего поля.

Большинство пьезокерамик обладает достаточной температурной стабильностью. Пьезоэлектрические свойства сохраняются вплоть до температуры Кюри. Для титаната бария она равна $115^\circ C$.

С течением времени параметры пьезокерамики самопроизвольно изменяются. Старение обуславливается изменением ориентации доменов.

Изготовление преобразователей из пьезокерамики значительно проще, чем из монокристаллов. Керамические изделия изготавливаются по обычной для радиокерамических изделий технологии - путем прессования или литья под давлением. Для снятия электрических зарядов на керамику наносятся электроды, к которым привариваются выводные провода. Отличие от технологии изготовления кварцевых преобразователей заключается в электрической обработке керамики. Для поляризации керамический преобразователь помещается в электрическое поле напряженностью $10^5 - 10^6$ В/м.

3.2.4 Пьезоэлектрические преобразователи силы, давления и ускорения

Для измерения силы, давления и ускорения используются пьезоэлектрические преобразователи с прямым пьезоэффектом (рисунок 3.7).

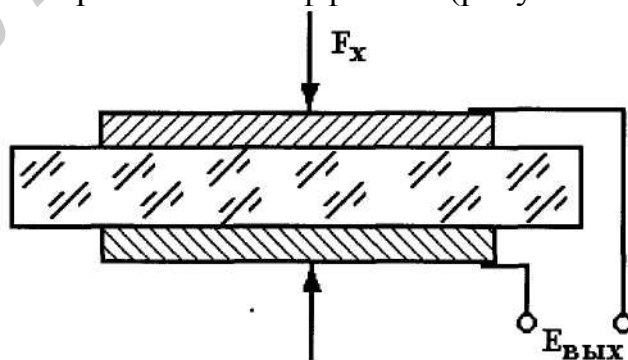


Рисунок 3.7 - Пьезоэлектрический преобразователь для измерения силы, давления и ускорения

Выходная мощность пьезоэлектрических преобразователей очень мала, поэтому на выходе преобразователя должен быть включен усилитель с возможно большим входным сопротивлением.

Для измерения выходной ЭДС преобразователя может использоваться вольтметр переменного тока, проградуированный в единицах измеряемой величины. При этом вольтметр должен иметь большое входное сопротивление.

Упрощенная эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя, соединенного кабелем с вольтметром, представлена на рисунке 3.8.

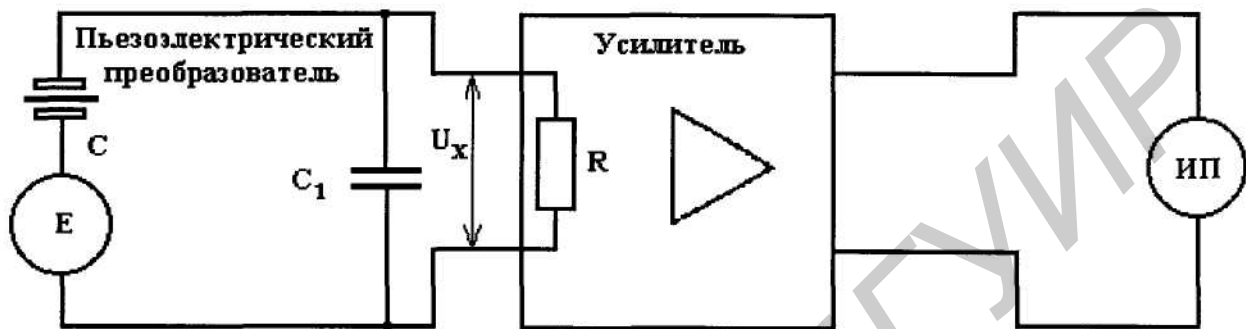


Рисунок 3.8 – Схема включения пьезоэлектрического преобразователя в измерительную цепь

На этой схеме C - собственная емкость преобразователя; C_1 - суммарная емкость соединительного кабеля, входной емкости усилителя и других емкостей, шунтирующих вход усилителя; R - входное сопротивление усилителя. Сопротивление утечки пьезоэлемента и сопротивление утечки кабеля могут рассматриваться как составляющие сопротивления R . Входным сигналом усилителя является падение напряжения U_x на сопротивлении R .

Основным недостатком схемы с усилителем напряжения является зависимость выходного напряжения и чувствительности преобразователя от емкости кабеля, которая может существенно изменяться в зависимости от положения кабеля и таких внешних факторов, как температура и влажность.

Пьезоэлемент обладает некоторой упругостью и массой и является колебательной системой. Резонансные свойства этой системы проявляются на высоких частотах. Резонанс приводит к повышению чувствительности на высоких частотах. При еще большем увеличении частоты чувствительность падает.

В настоящее время наряду с усилителями напряжения с пьезоэлектрическими преобразователями применяются также преобразователи заряда в напряжение, называемые усилителями заряда. Основным достоинством такой схемы является независимость выходного напряжения от емкости C_1 и возможность увеличения чувствительности.

3.2.5 Пьезорезонансные преобразователи

Основой пьезорезонансного преобразователя является пьезорезонатор (рисунок 3.9), частота которого изменяется под воздействием измеряемой неэлектрической величины. Изменение частоты может происходить при воздействии температуры, которая влияет на геометрические размеры, плотность и, главным образом, на упругие свойства кварца или пьезокерамики; под действием меха-

нических напряжений в резонаторе или его деформации; при присоединении дополнительной массы к резонатору, изменяющей его толщину или среднюю плотность. Соответственно различают термочувствительные, тензочувствительные и массочувствительные пьезорезонаторы.

В пьезоэлектрическом резонаторе происходит преобразование электрического напряжения между электродами в деформацию и механические напряжения в пьезоэлементе, которые вызывают ответную реакцию по выходу в виде зарядов на электродах, возникающих под действием механических напряжений.

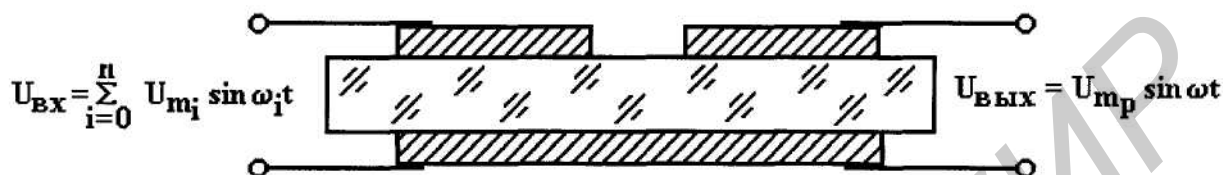


Рисунок 3.9 – Пьезоэлектрический резонатор как полосовой фильтр

Обратимость пьезоэлектрического эффекта позволяет выполнить пьезорезонатор в виде двухполюсника, соединяющего системы электрического возбуждения механических колебаний и съема ультразвуковых волн.

Длина волны $\lambda = \frac{v}{f}$, где v - скорость распространения ультразвука; f - частота излучения. Скорость распространения ультразвука в материале определяется как $v = \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}}$, где E_{ij} - константа упругости; ρ - плотность материала. Следовательно, длина волны

$$\lambda = \frac{\sqrt{E_{ij}}}{f \rho}. \quad (3.14)$$

При построении пьезоэлектрического преобразователя очевидны требования, предъявляемые к пьезорезонатору: высокая добротность, высокая чувствительность к измеряемой величине, малая чувствительность к дестабилизирующим факторам и возможность возбуждения колебаний только на одной частоте. Эти требования обеспечиваются выбором типа среза пьезоэлемента и типа возбуждаемых в пьезоэлементе колебаний.

3.2.6 Погрешности пьезоэлектрических преобразователей

Рабочей областью частот является область, в которой чувствительность остается постоянной. Сверху эта область ограничена резонансом пьезоэлемента. Снизу она ограничена постоянной времени τ . Для улучшения частотных свойств в области нижних частот нужно увеличивать $\tau = R(C + C_1)$. Для усиления выходного напряжения пьезоэлектрического преобразователя применяют усилители с максимально возможным входным сопротивлением (не менее

10^{11} Ом). Дальнейшее увеличение постоянной времени может происходить при увеличении C_1 : для этого вход усилителя шунтируется дополнительным конденсатором. Однако включение этого конденсатора уменьшает чувствительность измерительной цепи на больших частотах $S(\infty)$ и требует увеличения коэффициента усиления усилителя. В рассмотренной выше схеме постоянная времени $\tau = R(C + C_1)$ обычно не превышает 1 с. Использование операционных усилителей с обратными связями позволяет создавать приборы, у которых постоянная времени достигает значений 10 - 100 с.

Верхняя частота рабочего диапазона определяется увеличением чувствительности вследствие механического резонанса. Она довольно высока. Имеются преобразователи с верхней частотой рабочего диапазона 80 кГц.

В измерительной цепи внешними электромагнитными полями может наводиться паразитная ЭДС. Эта переменная ЭДС обуславливает возникновение погрешности. Для защиты от внешних полей измерительная цепь экранируется и преобразователь соединяется с вторичным преобразователем с помощью экранированного кабеля. Однако нестабильность параметров кабеля, например, изменение его емкости, обусловленное изгибом, вызывает изменение чувствительности и вносит погрешность.

Изменение температуры пьезоэлемента вызывает изменение его пьезоэлектрического модуля и чувствительности. Наиболее стабильным пьезоэлектрическим материалом является кварц.

Погрешность преобразователя может быть вызвана также несовершенством пьезоэлектрических материалов: гистерезисом характеристики и ее нелинейностью.

Если при измерениях на преобразователь действуют силы, перпендикулярные оси чувствительности пьезоэлемента, то возможно возникновение дополнительной погрешности измерения, обусловленной поперечным пьезоэффектом.

3.3 Термоэлектрические измерительные преобразователи

Явление термоэлектричества было открыто в 1821 г. Т.И.Зеебеком и заключается в возникновении термоЭДС в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разных проводников, контакты между которыми поддерживаются при разных температурах. Действительно, если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) А и В, соединив их между собой концами (рисунок 3.8), причем температуру одного места соединения сделать отличной от температуры другого, то в цепи потечет ток под действием ЭДС, называемой термоэлектродвижущей силой (термоЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников. Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем или, иначе, термопарой, проводники, составляющие термопару, - термоэлектродами, а места их соединений - рабочим (горячим) и свободным (холодным) спаями.

Явление термоэлектричества принадлежит к числу обратимых явлений, обратный термоэлектрический эффект был открыт в 1934 г. Жаном Пельтье и назван его именем. Если через цепь, состоящую из двух различных проводников или полупроводников, пропустить электрический ток, то теплота выделяет-

ся в одном спае и поглощается в другом. Теплота Пельтье связана с силой тока линейной зависимостью, а нагревание или охлаждение спаев зависит от направления протекания тока через спаи.

3.3.1 Принцип действия термоэлектрических преобразователей

Принцип действия термоэлектрического преобразователя основан на термоэлектрическом эффекте, возникающем в цепи термопары. Конструктивно термоэлектрический преобразователь представляет собой термопару, состоящую из двух разнородных проводников А и В, соединенных между собой в двух точках, как схематически показано на рисунке 3.10,а. На границе раздела двух различных металлов возникает контактная разность потенциалов $E_{AB}(t)$, зависящая от рода металлов и от температуры контакта. В цепи, показанной на рисунке 3.10,а, контактные разности потенциалов образуются в точках 1 и 2. Если $\theta_1 = \theta_2$, то они равны между собой и, будучи противоположно направленными, взаимно уравниваются. Если же $\theta_1 \neq \theta_2$, то в цепи образуется результирующая ЭДС

$$E = E_{AB}(\theta_1) - E_{AB}(\theta_2). \quad (3.15)$$

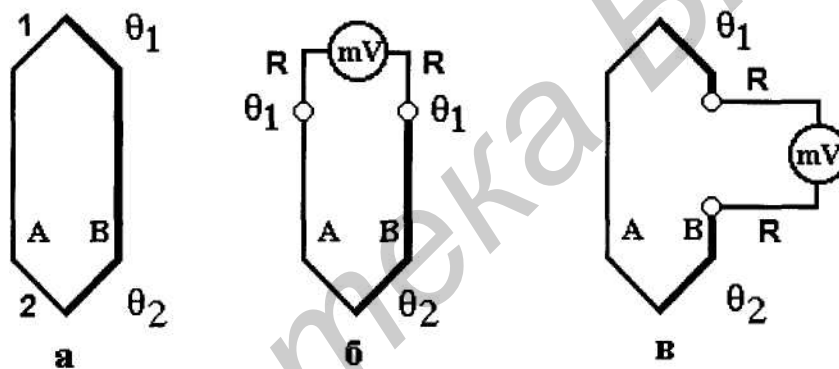


Рисунок 3.10 – Термоэлектрический преобразователь и схемы включения измерительных приборов для измерения термоЭДС

Термопары обладают следующими свойствами.

1 ТермоЭДС зависит от природы термоэлектродов, образующих термопару, и является функцией двух независимых температур - температур ее спаев $E = E(\theta_1, \theta_2)$ - и не зависит от распределения температуры в других точках термопары.

2 Если в цепи термопары включен третий проводник (проводник R на рисунке 3.1,б) и его концы находятся при одинаковых температурах ($\theta_{21} = \theta_{22}$), то включение третьего проводника не изменяет ЭДС цепи. Другими словами, термоэлектрический контур можно разомкнуть в любом месте и включить в него один или несколько разнородных проводников. Таким образом, прибор для измерения термоЭДС может быть включен как между свободными концами термопары, так и в разрыве одного из термоэлектродов.

3 Если термопара имеет температуры спаев θ и θ_0 , то термоЭДС равна алгебраической сумме двух ЭДС, одна из которых генерируется при температурах спаев θ и θ_{01} , а другая - при температурах θ_{01} и θ_0 :

$$E(\theta, \theta_0) = E(\theta, \theta_{01}) + E(\theta_0, \theta_{01}). \quad (3.16)$$

Это свойство используется при измерении температуры спая θ , если температура второго спая θ_{01} отличается от температуры θ_0 , при которой была проведена калибровка термопары.

При $\theta_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ функция $E(\theta, 0)$ представляет собой градуировочную функцию преобразования данной термопары. Значение $E(\theta, \theta_{01})$ определяется экспериментально, а значение $E(\theta_{01}, 0)$ - по значению температуры θ_{01} и градуировочной функции преобразования. По значениям $E(\theta_0, \theta_{01})$ и $E(\theta_{01}, 0)$ вычисляется $E(\theta_0, 0)$, по которой определяется измеряемая температура.

В измерительной технике термоэлектрические преобразователи получили широкое распространение для измерения температур. Кроме того, полупроводниковые термоэлементы используются как обратные тепловые преобразователи, преобразующие электрический ток в тепловой поток. В таблице 3.1 приведены основные характеристики наиболее широко распространенных термопар. ЭДС термопары обычно не превышает 50 мВ. Для повышения выходной ЭДС используются несколько последовательно соединенных термопар, образующих термобатарею.

3.3.2 Схемы включения термоэлектрических преобразователей

Рабочий конец термопары погружается в среду, температуру которой требуется измерить. Свободные концы подключаются к измерительному прибору, в качестве которых обычно используются либо магнитоэлектрические милливольтметры (рисунок 3.11), либо потенциометры постоянного тока. Для подключения термопары к измерительному прибору применяются удлинительные и соединительные проводники. Однако существуют определенные правила выбора удлинительных термоэлектродов. Рассмотрим их.

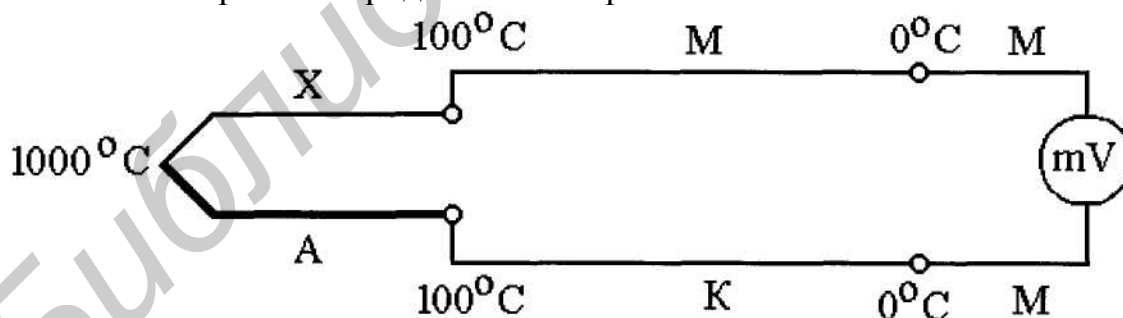


Рисунок 3.11 – Схема включения термоэлектрического преобразователя в электрическую цепь с использованием удлинительных термоэлектродов

Свободные концы термопары, как уже указывалось, должны находиться при постоянной температуре. Однако не всегда возможно сделать термоэлектроды термопары настолько длинными и гибкими, чтобы ее свободные концы размещались в достаточном удалении от рабочего спая. Кроме того, при использовании термопар из благородных металлов делать длинные термоэлектроды экономически невыгодно. Поэтому приходится применять провода из других материалов. В качестве последних используются провода из различных

материалов. Провода подбираются так, чтобы при температуре свободных спаев и в паре между собой они имели такие же термоэлектрические свойства, как и рабочая термопара. При подключении к термопаре компенсационные провода удлиняют ее и дают возможность отвести холодный спай образованной составной термопары в такое место, где температура остается постоянной.

Таблица 3.1

Основные типы термоэлектрических преобразователей

Тип термопары	Материалы электродов термопар	ТермоЭДС (при $\theta_{p.c} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta_{c.c} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), мВ	Верхний предел измеряемой температуры, $^{\circ}\text{C}$	
			Длительно	Кратковременно
ТПП	Платинородий (10% родия) – платина	0,64	1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия) – платинородий (6% родия)	13,81 (при $\theta_{p.c} = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$)	1600	1800
ТХА	Хромель (90% Ni + 10% Cr) – алюмель (94,83% Ni + 2% Al + +2% Mn + 1% Si + 0,17% Fe)	4,10	1000	1300
ТХК	Хромель – копель (56% Cu + +44% Ni)	6,90	600	800
ТВР	Вольфрамрений (5% рения) – вольфрамрений (20% рения)	1,33	2200	2500

и их основные характеристики

Примечание. $\theta_{p.c}$ - температура рабочего спая; $\theta_{c.c}$ - температура свободного спая.

Так, для термопары платинородий – платина применяются удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, образующие термопару, термоидентичную основной термопаре, в диапазоне температур до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для термопары хромель – алюмель удлинительные провода изготавливаются из меди и константана. Для термопары хромель – копель удлинительными являются основные термоэлектроды, но выполненные в виде гибких проводников.

Одним из источников погрешности термоэлектрического преобразователя является несоответствие температуры свободного спая термопары температуре, при которой проводилась ее градуировка (θ_0 , $^{\circ}\text{C}$). Если температура свободного спая θ_1 будет отличаться от температуры θ_0 , $^{\circ}\text{C}$, то термоЭДС $E_{изм}$ будет отличаться от термоЭДС $E_{тр}$, что приведет к возникновению систематической погрешности измерения температуры. Для ее исключения необходимо внести поправку, определение численного значения которой основано на третьем свойстве термоэлектрических преобразователей и приближенно может быть вычислено по следующей формуле:

$$\Delta\theta = k(\theta_1 - \theta_0), \quad (3.17)$$

где k - коэффициент, зависящий от измеряемой температуры и типа термопары.

Для хромель – копелевой термопары он лежит в пределах от 0,8 до 1, для хромель – алюмелевой - в пределах от 0,98 до 1,11, для платинородий – платиновой - в пределах от 0,82 до 1,11. При малых значениях $\Delta\theta = k \cdot (\theta_1 - \theta_0)$ в ряде случаев можно принять $k = 1$. Это позволяет вводить поправку в показания измерительного прибора с помощью корректировки нуля.

При практическом использовании термоэлектрического термометра температура свободных спаев обычно отличается от 0°C на значение $+\theta_0$, поэтому измеренная термоЭДС будет меньше действительной и возникает необходимость введения соответствующей поправки в показания термометра.

Однако из-за нелинейности зависимости ЭДС термопары и температуры рабочего спая поправка $\Delta\theta$ к показаниям термометра θ' не будет равна температуре θ_0 свободного спая (рисунок 3.12). Для определения температуры необходимо воспользоваться градуировочной таблицей для данной термопары, определить ЭДС E как $E = E_{\text{изм}} + \Delta E(\theta_0)$ и затем по скорректированному таким образом значению термоЭДС E найти действительное значение температуры исследуемого объекта θ .

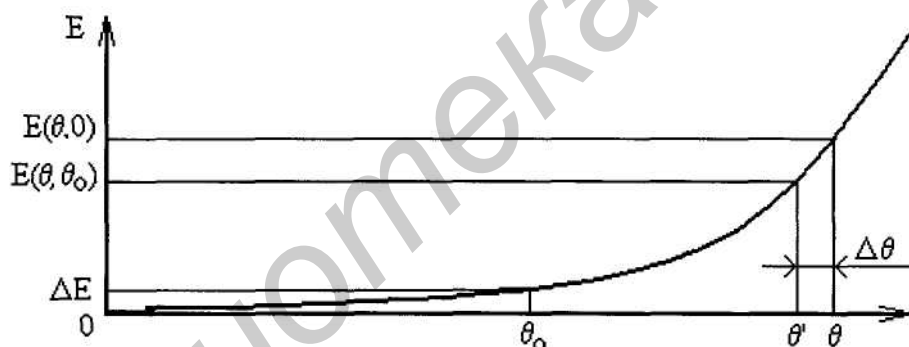


Рисунок 3.12 – Зависимость термоЭДС термопары от температур горячего и свободного спаев

Для введения поправки на температуру свободных спаев применяется устройство, приведенное на рисунке 3.13. В цепь термопары и милливольтметра включен мост, одним из плеч которого является терморезистор R_0 , помещенный в непосредственной близости от свободного спая термопары (остальные плечи моста выполнены из манганиновых резисторов). При температуре θ_0 мост находится в равновесии и напряжение на его выходной диагонали равно нулю. При повышении температуры свободного спая сопротивление R_0 изменяется, мост выходит из равновесия и возникающее напряжение на выходной диагонали моста компенсирует уменьшение термоЭДС термопары.

Уравновешивание моста при температуре терморезистора, равной нулю, производится изменением сопротивления одного из манганиновых резисторов. Изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ моста при температуре терморезистора

θ до значения, равного уменьшению термоЭДС ΔE , производится изменением напряжения питания моста, т.е. сопротивления R . При этом должно выполняться равенство $U_{\text{вых}}(\theta) - \Delta E(\theta) = 0$. Вследствие нелинейности характеристики термопар полной коррекции погрешности при помощи описываемого устройства получить не удается, однако погрешность существенно уменьшается.

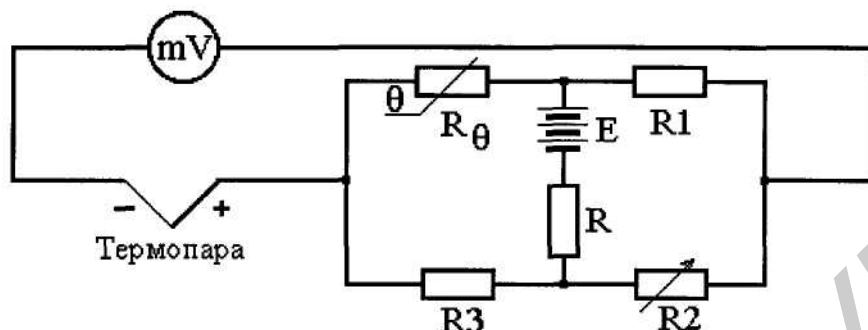


Рисунок 3.13 - Включения термопары в электрическую цепь с введением поправки на температуру свободного спая

При неправильном подключении удлинительных термоэлектродов возникает весьма существенная погрешность. При использовании в качестве измерительного устройства потенциометра постоянного тока термопара T включается в индикаторную диагональ мостовой цепи таким образом (рисунок 3.14), что ее термоЭДС направлена встречно компенсирующему напряжению E_K , создаваемому с помощью мостовой измерительной цепи.

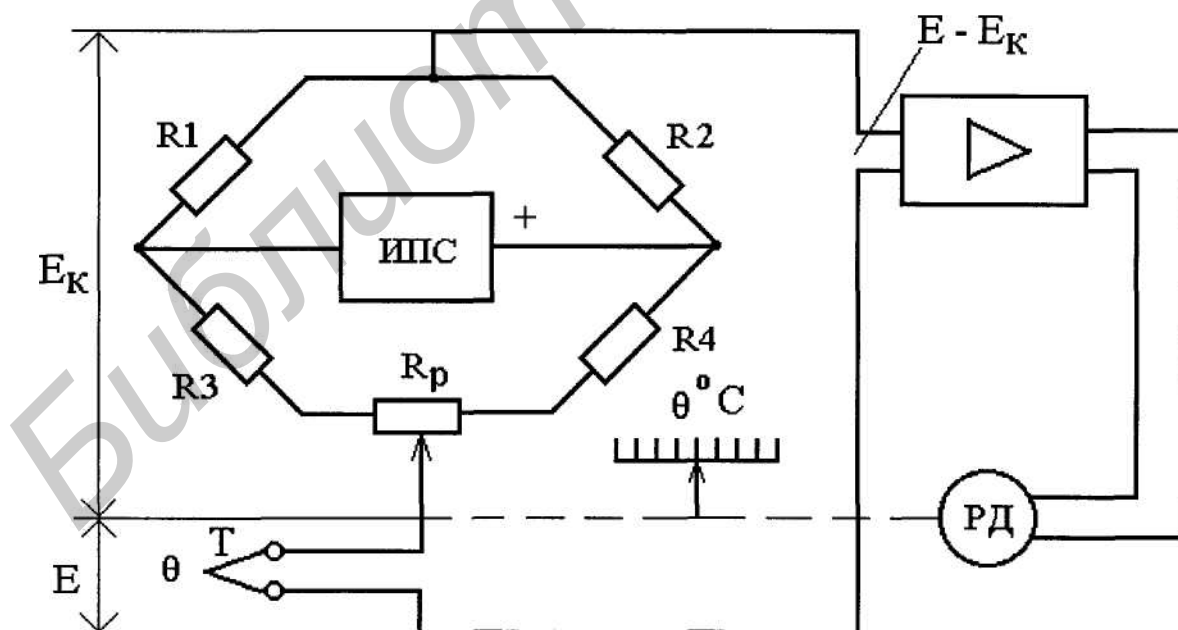


Рисунок 3.14- Использование потенциометра постоянного тока в качестве измерительной цепи термопары

Разность термоЭДС термопары и компенсирующего напряжения $E - E_K$ усиливается усилителем и приводит в действие реверсивный двигатель РД. При

вращении вал двигателя перемещает движок реохорда K_p до тех пор, пока разность $E - E_k$ не станет равной нулю. В этот момент двигатель останавливается и механически связанная с движком реохорда стрелка отсчетного устройства, проградуированного в градусах Цельсия, индицирует измеренное значение температуры. Современные потенциометры постоянного тока могут не только производить индикацию измеренных значений температуры, но и регистрировать ее на записывающем устройстве и передавать измеренные значения для использования в различных измерительных системах.

3.3.3 Погрешности термоэлектрических преобразователей

Одним из источников погрешности термоэлектрического преобразователя является несоответствие температуры свободного спая термопары температуре, при которой производилась ее градуировка.

Однако следует иметь в виду, что из-за нелинейной зависимости между ЭДС термопары и температурой рабочего спая поправка $\Delta\theta$ к показаниям измерительного прибора, проградуированного непосредственно в градусах, не будет равна температуре свободных концов.

Для более точного определения температуры необходимо воспользоваться градуировочной таблицей для данной термопары, определить ЭДС E как $E = E_{изм} + \Delta E(\theta_0)$ и затем по скорректированному таким образом значению E найти значение измеряемой температуры.

Другим источником погрешности термоэлектрического преобразователя является изменение его сопротивления вследствие изменения измеряемой температуры. Если в качестве милливольтметра используется прибор магнитоэлектрической системы с малым внутренним сопротивлением $R_{в}$, то измеряемое им напряжение будет зависеть от изменения сопротивления термоэлектрического преобразователя, удлинительных и соединительных проводников. Можно показать, что приведенная погрешность, обусловленная изменением сопротивления внешней цепи милливольтметра ΔR , будет определяться соотношением

$$\gamma = \frac{\Delta\theta}{\theta_{max}} = \frac{\Delta U}{U_{max}} = -\frac{\Delta R}{R_{н} + R_{в}}, \quad (3.18)$$

где $R_{в}$ - внутреннее сопротивление милливольтметра; $R_{н}$ - номинальное сопротивление его внешней цепи.

Чтобы уменьшить погрешность от падения напряжения на внутреннем сопротивлении термопары, милливольтметры, как правило, градуируются по температуре в комплекте с термопарой с указанием сопротивления линии (обычно около 5 Ом), которое подбирается изменением сопротивления добавочной катушки непосредственно при монтаже прибора.

Следует отметить, что при использовании в качестве измерительного прибора, к которому подключается термоэлектрический преобразователь, измерительного потенциометра рассматриваемая погрешность не возникает. Действительно, в момент компенсации измеряемой термоЭДС термопары внутренним

источником питания потенциометра по его внешней цепи ток не течет, т.е. отсутствует падение напряжения на его внешней цепи.

3.4 Фотоэлектрические преобразователи

3.4.1 Принцип действия фотоэлектрических преобразователей

Фотоэлектрические преобразователи позволяют преобразовывать в электрические сигналы информацию, содержащуюся в видимом свете или излучении соседних длин волн – инфракрасном и ультрафиолетовом.

Свет одновременно имеет и волновую, и корпускулярную природу. В волновом аспекте он представляет собой электромагнитные колебания, излучаемые при электронных переходах в атомах источника с одного энергетического уровня на другой. Эти волны распространяются в вакууме со скоростью света $c = 299\,792\,458$ м/с, а в веществе – с меньшей скоростью $v = c/n$, где n – показатель преломления среды. Частота ν и длина волны λ связаны соотношением $\lambda = v/\nu$, т.е. в вакууме $\lambda = c/\nu$ (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Оптическое излучение: наименование областей и распределение их по спектру

В корпускулярном аспекте свет рассматривается, когда речь идет о взаимодействии его с веществом. Свет, как и все другие виды электромагнитного излучения, представляется состоящим из частиц - фотонов, каждый из которых несет элементарную энергию, определяемую только частотой излучения. В веществе электроны связаны атомами, и для того, чтобы стать свободными, они должны получить энергию, равную энергии их связи. Поглощение одного фотона вызывает освобождение одного электрона при условии, что энергия одного фотона будет больше энергии связи электрона.

Фотоэлектрический преобразователь представляет собой фотоэлектронный прибор (фотоэлемент), используемый в качестве измерительного преобразователя. Имеются три типа преобразователей: преобразователи с внешним фотоэффектом, преобразователи с внутренним фотоэффектом и фотогальванические преобразователи. Наибольшее применение нашли преобразователи последних двух типов.

К преобразователям с внешним фотоэффектом относят вакуумные и газонаполненные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители. Вакуумные фотоэлементы состоят из вакуумированной стеклянной колбы, содержащей два

электрода: анод и фотокатод. При освещении фотокатода под влиянием фотонов света происходит эмиссия электронов. Если между анодом и фотокатодом приложено напряжение, то эти электроны образуют электрический ток, который называется фототоком. Для фотоэмиссии электронов необходимо, чтобы энергия фотона $E = \nu \cdot h$, где ν - частота света; h - постоянная Планка, была больше работы выхода электронов Φ , характерной для данного материала фотокатода. Частота $\nu_{гр} = \Phi/h$ называется красной границей фотоэффекта, а соответствующая ей длина волны $\lambda_{гр} = \frac{c}{\nu_{гр}}$ (c - скорость света) - длинноволновым

порогом фотоэффекта. Если $\lambda > \lambda_{гр}$, то никакая интенсивность света не может вызвать фотоэффект.

Газонаполненный фотоэлемент аналогичен вакуумному, но имеет определенное газовое заполнение. При заполнении фотоэлемента инертным газом He, Ar, Kr, Xe фотоэлектроны, движущиеся к аноду, сталкиваются с молекулами газа и ионизируют их. Благодаря ионизации газа происходит усиление тока фотоэмиссии. Отношение тока, усиленного за счет ионизации, к первичному фототоку называется коэффициентом газового усиления, который может достигать 6 - 7. Таким образом, чувствительность газонаполненных фотоэлектрических преобразователей выше, чем у вакуумных, и составляет 100 - 250 мкА/лм.

Чувствительность газонаполненных фотоэлементов весьма сильно зависит от напряжения питания. Поэтому напряжение питания фотоэлементов должно стабилизироваться и не превышать значений 100 - 240 В, поскольку при напряжениях выше этих значений начинается область самостоятельного разряда.

В газонаполненных фотоэлементах максимальная амплитуда фототока достигается лишь через некоторое время после начала освещения (по мере развития газового разряда). Поэтому газонаполненные фотоэлементы применяются для регистрации световых потоков с частотами, не превышающими нескольких сотен герц.

Фотоэлектрический умножитель (ФЭУ) - это вакуумный фотоэлемент, снабженный системой электродов для усиления тока фотоэмиссии. Усиление первичного фототока производится за счет использования вторичной электронной эмиссии. Для этого в фотоумножителях помимо фотокатода и анода вводятся вторичные катоды (эмиттеры) Э и системы фокусировки электронного пучка. Коэффициент вторичной эмиссии может составлять 2,5 - 4. Общий коэффициент усиления в многокаскадных фотоумножителях достигает сотен тысяч.

Принципиальная схема ФЭУ показана на рисунке 3.16. Свет падает на фотокатод ФК, который эмитирует электроны. Поток электронов фокусируется электрическим полем, создаваемым электродом Э, формируется диаграммой Д и направляется на ускоряющий электрод Э1. Напряжение на электроде таково, чтобы энергии фотоэлектрона было достаточно для вторичной эмиссии электронов. Поток электронов, усиленный электродом Э1, направляется на следующие электроды Э2 - Э5, усиливается и собирается анодом А. Анодный ток ФЭУ довольно мал и требует дополнительного усиления. Для этого он преобра-

зается в напряжение с помощью сопротивления R_H . Питание ФЭУ производится с помощью делителя напряжения $R1 - R8$.

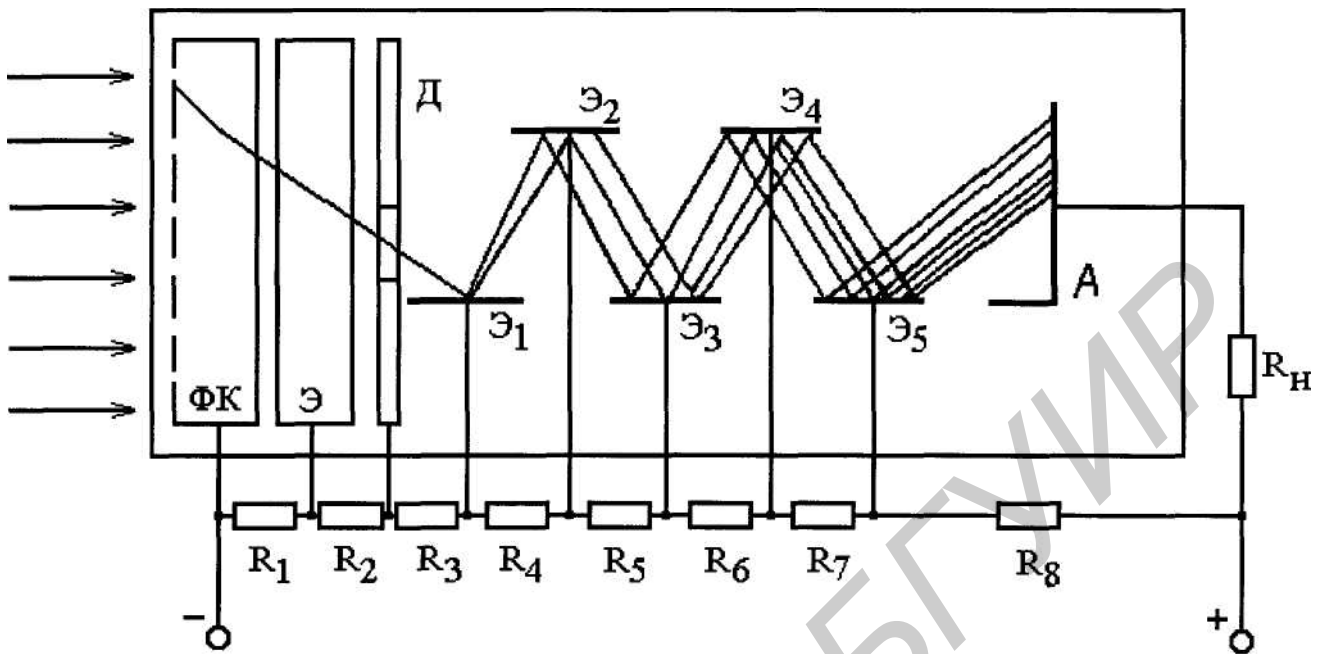


Рисунок 3.16 – Схема фотоэлектрического умножителя

Фотоэлектронные умножители имеют высокую чувствительность и малую инерционность (как и у вакуумных фотоэлементов) и используются для измерения очень малых световых потоков (до 10^{-5} лк).

Чувствительный элемент преобразователей с внутренним фотоэффектом (фоторезисторов) выполнен в виде пластинки, на которую нанесен слой полупроводникового фоточувствительного материала. В качестве фоточувствительного материала обычно используется сернистый кадмий, селенистый кадмий или сернистый свинец.

Электропроводность полупроводниковых материалов обусловлена возбуждением электронов в валентной зоне и примесных уровнях. При возбуждении электроны переходят в зону проводимости, в валентной зоне появляются дырки. При освещении возбуждение электронов увеличивается, что вызывает увеличение электропроводности. Красная граница фоторезисторов находится в инфракрасной области; например, для сернисто-свинцовых $\lambda_{гр} = 2,7$ мкм. При небольших освещенностях преобразователя число возбужденных светом электронов пропорционально освещенности, его электрическая проводимость

$$G = \frac{I_{\phi}}{U}, \quad (3.20)$$

где I_{ϕ} – фототок; U - напряжение, приложенное к преобразователю, также пропорциональна освещенности.

При больших освещенностях пропорциональность нарушается. Типовая зависимость фототока от освещенности приведена на рисунке 3.17,а. Чувствительность фоторезисторов определяется кратностью изменения их сопротивления. Для некоторых типов она достигает значения

$$S = \frac{R_T}{R_{200}} = 10^5, \quad (3.21)$$

где R_T – темновое сопротивление, т.е. сопротивление неосвещенного преобразователя; R_{200} – сопротивление при освещенности, равной 200 лк.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фоторезисторов линейна, т.е. их сопротивление не зависит от приложенного напряжения (рисунок 3.17,б). Инерционность преобразователей характеризуется постоянной времени τ . У селенисто-кадмиевых преобразователей τ лежит в пределах от 1 до 140 мс, у сернисто-кадмиевых – от 0,5 до 20 мс.

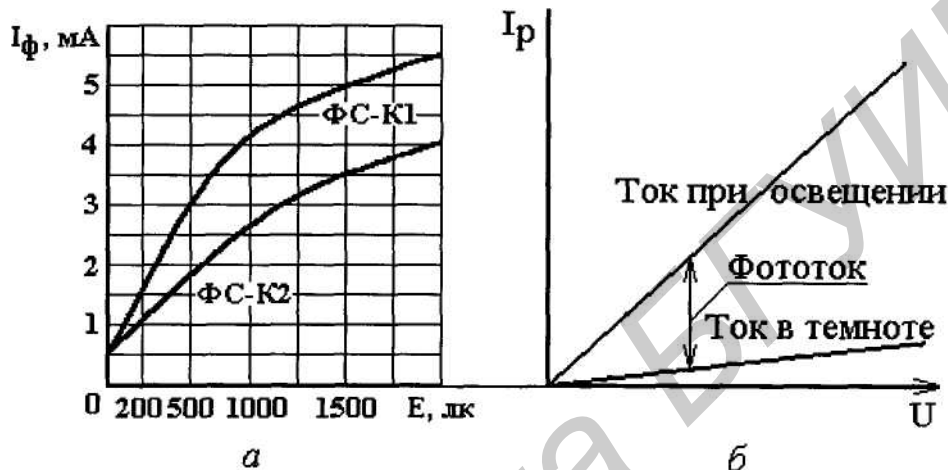


Рисунок 3.17 – Характеристики фоторезисторов

а – зависимость фототока от освещенности; б – вольт-амперная характеристика

Фоторезисторы имеют высокую чувствительность, однако их сопротивление зависит от температуры. Для уменьшения температурной погрешности два идентичных фотоэлектрических преобразователя включаются в смежные плечи мостовой измерительной цепи.

Фотогальванические преобразователи представляют собой фотоэлектронные приборы с р - n переходом: *фотодиоды* и *фототранзисторы*. При освещении перехода создается дополнительная концентрация носителей в n-слое. Это приводит к усилению их диффузии к р-n переходу и в самом переходе. У диода, подключенного к запирающему напряжению (рисунок 3.18,а), под действием света возрастает обратный ток. Вольт-амперная характеристика германиевого фотодиода приведена на рисунке 3.18,б. При отсутствии освещения она не отличается от характеристики обычного диода, а при освещении смещается вверх пропорционально значению светового потока. Наибольшее распространение получили германиевые и кремниевые фотодиоды. Их спектральные характеристики заходят в область инфракрасного излучения (для германиевых фотодиодов до $\lambda_{\text{гр}} = 2$ мкм, для кремниевых фотодиодов до $\lambda_{\text{гр}} = 1,2$ мкм).

Фотодиоды могут работать в фотодиодном и генераторном (вентильном) режимах. В фотодиодном режиме преобразователь подключают к запирающему напряжению (рисунок 3.18,а). При увеличении его освещенности возрастает обратный ток, что приводит к увеличению напряжения U_n на сопротивлении R_n . Напряжение U_n и чувствительность можно определить по ВАХ и нагрузочной прямой (рисунок 3.18,б). Зависимость тока фотодиода от освещенности практи-

чески линейна. Внутренне дифференциальное сопротивление фотодиода имеет значение порядка единиц МОм, поэтому обычно они работают в режиме, близком к короткому замыканию.

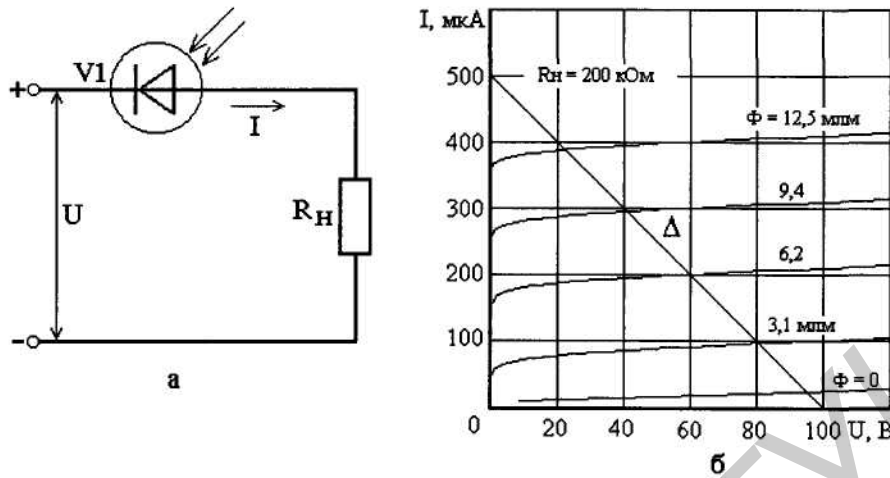


Рисунок 3.18 – Фотодиодный режим работы преобразователя
а – принципиальная схема; б – семейство вольт-амперных характеристик при различных значениях светового потока и нагрузочная прямая Δ

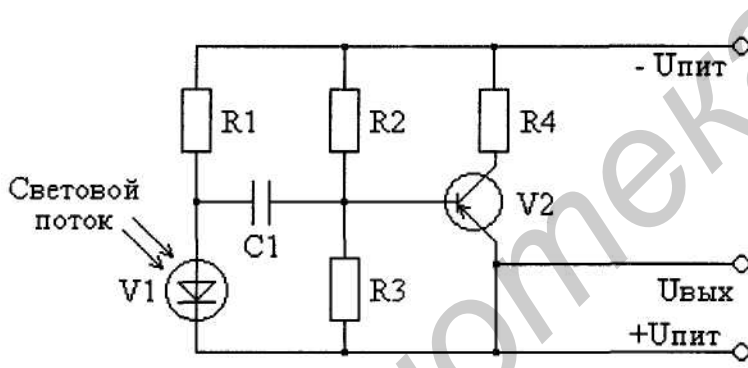


Рисунок 3.19 – Схема включения фотодиода при работе в генераторном режиме

В генераторном режиме фотодиод включают по схеме, приведенной на рисунке 3.19, и он сам является источником тока. Фототок, напряжение на нагрузке U_n и чувствительность преобразователя можно определить по ВАХ, приведенной на рисунке 3.20.

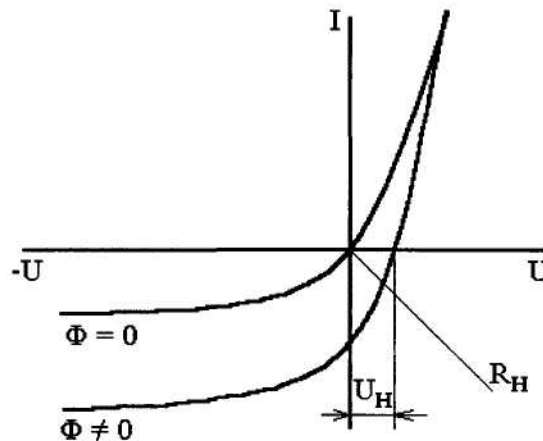


Рисунок 3.20 – Вольт-амперная характеристика фотодиода при работе в генераторном режиме

3.4.2 Область применения фотоэлектрических преобразователей

Фотоэлектрические преобразователи нашли широкое применение для измерения неэлектрических величин. Основными их достоинствами являются: возможность проведения измерений без непосредственного контакта с объектом измерения; отсутствие механического воздействия на объект измерения; чувствительность к силе света и его спектру. Основным их недостатком является большая погрешность преобразования, обусловленная в основном усталостью, старением и зависимостью параметров преобразователя от температуры.

Вследствие этого фотоэлектрические преобразователи нашли применение в основном при решении следующих измерительных задач.

1 При измерениях, в которых преобразователь работает в импульсном режиме. Примером может служить измерение частоты вращения вала, имеющего диск с отверстиями (рисунок 3.21). Диск прерывает луч света, падающего на фотоэлектрический преобразователь. В этом случае измеряемая скорость вращения вала преобразуется в частоту повторения электрических импульсов.

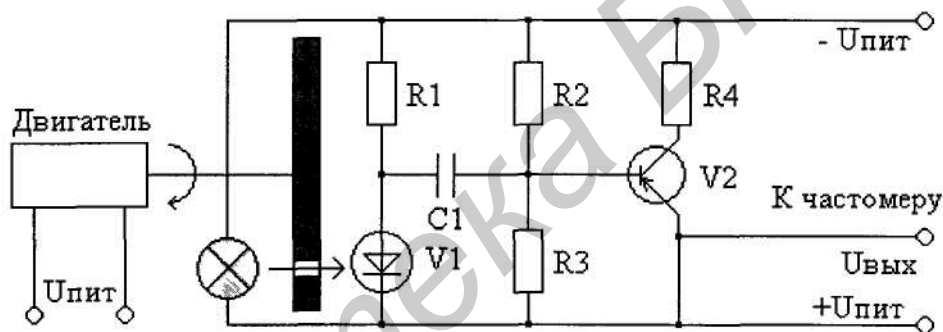


Рисунок 3.21 - Работа фотоэлектрического преобразователя в импульсном режиме

2 В качестве прямого преобразователя в измерительных приборах сравнения.

3 При измерении неэлектрических величин, когда промежуточной величиной является световая величина. Например, при измерении концентрации вещества в растворе, когда промежуточной величиной является изменение поглощения света раствором.

Для уменьшения погрешности измерения фотоэлектрические преобразователи включаются в дифференциальные или компенсационные измерительные цепи. Пример такой измерительной цепи, служащей для измерения концентрации раствора одним фотоэлектрическим преобразователем, представлен на рисунке 3.22. По этой схеме лучи света по двум каналам поочередно освещают фотоэлектрический преобразователь 1. Коммутация осуществляется с помощью диска 2, имеющего отверстия и вращающегося с постоянной угловой скоростью при помощи синхронного двигателя СД. Световой поток, падающий на фотоэлектрический преобразователь, оказывается промодулированным по интенсивности (рисунок 3.23).

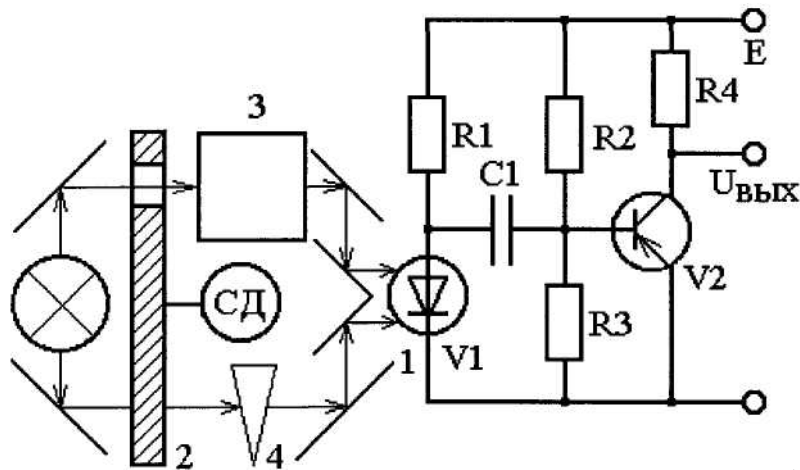


Рисунок 3.22 - Дифференциальная схема включения фотоэлектрического преобразователя

Переменная составляющая светового потока

$$\Delta\Phi = \Phi_{\Pi} - \Phi_0, \quad (3.22)$$

где Φ_{Π} - световой поток, прошедший через объект измерения 3; Φ_0 - образцовый световой поток, прошедший через оптический клин 4.

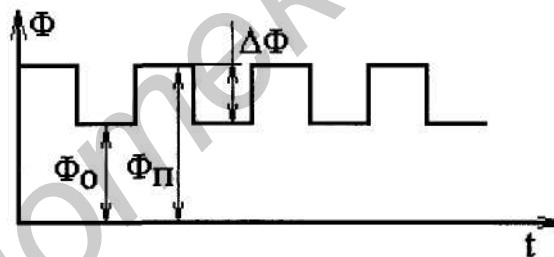


Рисунок 3.23 – Временная диаграмма, поясняющая принцип модуляции светового потока

Переменная составляющая светового потока преобразуется в переменное напряжение и усиливается. В рассматриваемом приборе оба канала дифференциальной измерительной цепи оказываются практически идентичными, что позволяет компенсировать аддитивные погрешности.

Однако вследствие модуляции светового луча снижается частотный диапазон прибора, увеличивается его инерционность. При таком способе измерения частотный диапазон ограничивается частотой модуляции, причем верхняя частота диапазона измерения должна быть на порядок меньше частоты модуляции.

3.5 Гальванические преобразователи

Принцип действия гальванических преобразователей основан на зависимости потенциала электрода от концентрации ионов в растворе. Металлический электрод, погруженный в раствор электролита, частично в нем растворяется. Положительные ионы металла переходят в раствор, и электрод получает отри-

цательный заряд. Образованная разность потенциалов между электродом и раствором препятствует переходу ионов металла, и растворение электрода прекращается. При равновесии электрический потенциал электрода зависит от концентрации ионов в растворе и может служить для определения их концентрации.

Конструктивно гальванический преобразователь (рисунок 3.24) состоит из двух полуэлементов 1 и 2, которые гальванически соединены между собой электрическим ключом 3. Полуэлемент представляет собой сосуд с раствором электролита, в который погружен металлический электрод. В одном полуэлементе находится раствор, концентрация которого измеряется, в другом - раствор с известной концентрацией. Электролитический ключ - это трубка, заполненная раствором КС1 и закрытая с двух сторон полупроницаемыми пробками из ваты или асбеста. ЭДС преобразователя E , измеряемая между двумя электродами, определяется неизвестной концентрацией.

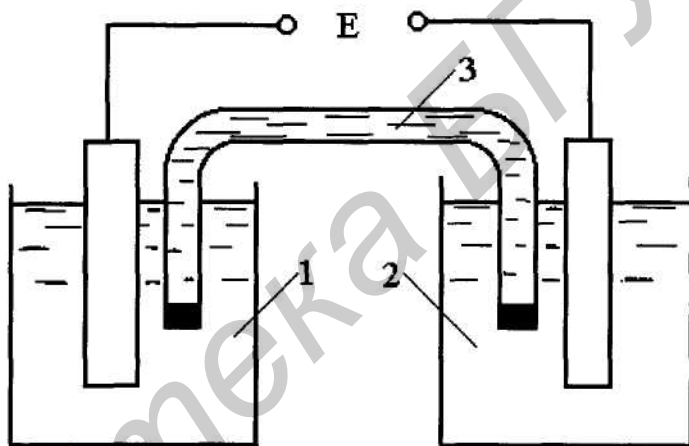


Рисунок 3.24 – Конструкция гальванического преобразователя

Большое значение имеет определение концентрации ионов водорода H^+ в растворах. Чистая дистиллированная вода, хотя и немного, но диссоциирована на ионы. Согласно закону действующих масс и вследствие малой диссоциации воды ионное произведение воды

$$k = a_{H^+} a_{OH^-}, \quad (3.23)$$

где a_{H^+} и a_{OH^-} - концентрация ионов H^+ и OH^- , выраженная в молях на литр.

Ионное произведение воды - величина постоянная, при 22 °С равная 10^{-14} . Если в воде растворить кислоту, то при диссоциации ее молекул концентрация ионов H^+ возрастает и, следовательно, уменьшается концентрация ионов OH^- . Растворение оснований изменяет концентрации H^+ и OH^- противоположным образом. Концентрация ионов водорода характеризует кислотность раствора. Кислотность влияет на протекание многих химических реакций и биохимических процессов. Единицей ее измерения служит водородный показатель

$$pH = -\lg a_{H^+}. \quad (3.24)$$

В качестве примера в таблице 3.2 приведены величины рН для различных концентраций соляной кислоты и едкого натра.

Приборы, служащие для измерения водородного показателя, называются рН-метрами. Их первичными преобразователями служат гальванические преобразователи, в которых роль металла играет водород, роль металлических ионов - ионы H^+ .

Типичным полуэлементом рН-метра является водородный электрод 1 на рисунке 3.25. Он представляет собой стеклянный сосуд с электролитом, в который погружена пластинка, покрытая мелкодисперсной платиной (платиновой чернью). Снизу на пластинку подается газообразный водород. Он адсорбируется платиной и частично в виде ионов H^+ переходит в раствор. Вследствие оставшихся на пластинке электронов она имеет отрицательный потенциал относительно раствора. Для измерения кислотности используют два полуэлемента.

Таблица 3.2 - Зависимость значений рН от концентрации растворов

Раствор электролита	Концентрация раствора, моль/л	Содержание ионов H^+ , г/л	рН
Концентрированная соляная кислота HCl	1	1	0
	0,1	10^{-1}	1
Разбавленная соляная кислота HCl	0,0001	10^{-4}	4
Чистая вода (нейтральный раствор)	-	10^{-7}	7
Разбавленная щелочь NaOH	0,0001	10^{-10}	10
	0,01	10^{-12}	12

Один полуэлемент 1 заполняется электролитом с известной концентрацией, другой 2 - электролитом, значение рН которого нужно измерить. Развиваемая между электродами разность потенциалов E определяется выражением

$$E = C \cdot \Theta \cdot \ln \frac{(a_{H^+})_x}{(a_{H^+})_0}, \quad (3.25)$$

где C - постоянная; Θ - температура, К; $(a_{H^+})_x$ - измеряемая концентрация ионов H^+ ; $(a_{H^+})_0$ - концентрация ионов H^+ образцового раствора.

Если в качестве образцового используется раствор с нормальной концентрацией ионов H^+ (1 г/л) и измерение производится при 18 °С, то разность потенциалов

$$E_{12} = 0,058 \ln (a_{H^+})_x = - 0,058 \text{ рН}. \quad (3.26)$$

Водородный электрод позволяет измерять рН в пределах от 0 до 14 с высокой точностью. Однако через преобразователь необходимо непрерывно пропускать газообразный водород. В настоящее время имеются стеклянный, хлорсеребряный и другие рН-метры, лишенные этого недостатка.

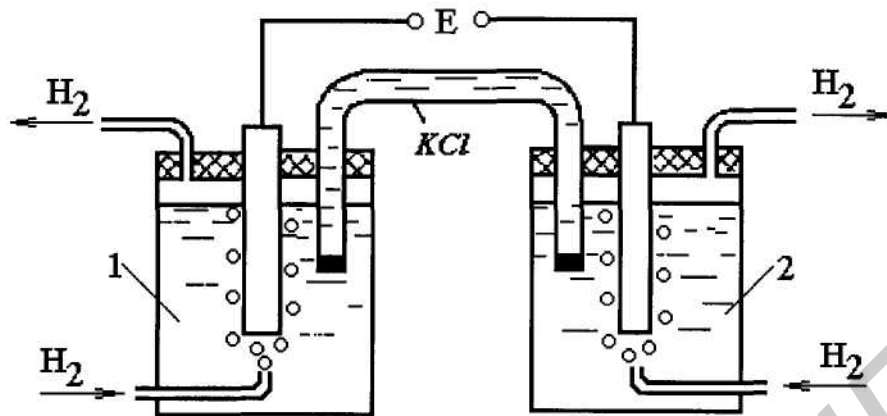


Рисунок 3.25 – рН-метр на основе гальванического преобразователя

Измерение ЭДС гальванических преобразователей должно производиться при минимальном токе, поскольку при протекании тока происходит электролиз и изменяется концентрация раствора в приэлектродной области, что создает погрешность. Кроме того, при протекании тока происходит падение напряжения на довольно большом внутреннем сопротивлении преобразователя, что также вносит погрешность в измерение ЭДС. ЭДС рН-метров измеряется либо электронными вольтметрами с большим входным сопротивлением, либо с помощью компенсационных измерительных цепей (например потенциометр) с автоматической коррекцией температурных погрешностей.

Известны цифровые рН-метры с встроенными микропроцессорами, обеспечивающие измерение с абсолютной погрешностью 0,001 рН. Градуировку рН-метров производят по образцовым буферным растворам с точно известным и стабильным значением рН.

При неизменной концентрации электролита и постоянной температуре ЭДС гальванического преобразователя может быть весьма стабильной, что используется для создания нормальных элементов, применяемых в качестве мер ЭДС, а также для реализации эталона вольта.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Алиев Т.М., Сеидель Л.Р. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов. - М.: Энергия, 1975. – 216 с.
- 2 Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А., Шекиханов А.М. Итерационные методы повышения точности измерений. - М.: Энергоиздат, 1986.- 168 с.
- 3 Атамалян Э.Т. Приборы и методы измерения электрических величин. М.: Высш. шк., 1982.
- 4 Ацюковский В.А. Емкостные преобразователи перемещения.- Л.: Энергия, 1966.- 278 с.
- 5 Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2 кн: Пер. с фр. – М.: Мир, 1992. – 480 с.: ил.
- 6 Беркутов А.М. и др. Методы и средства измерения неэлектрических величин: Учеб. пособие / Под ред. В.И.Петухова. – Рязань: РРТИ, 1973.- 156 с.
- 7 Бурдун Г.Д., Марков Б.П. Основы метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1985.- 256 с.
- 8 Горовиц А.М. Синтез систем с обратной связью: Пер. с англ. / Под ред. М.В.Меерова - М.: Сов. радио, 1970. – 600 с.: ил.
- 9 ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения.
- 10 Елизаров А.С. Электрорадиоизмерения: Учеб. для вузов по спец. "Радиотехника". – Мн.: Высш. шк., 1986. – 320 с.: ил.
- 11 Зайцев Ю.В. и др. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи.- М.: Радио и связь, 1985. – 120 с.
- 12 Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных приборов.- М.: Изд-во стандартов, 1972. – 200 с.
- 13 Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов / Н.Н.Евтихийев, Я.А.Купершмидт, В.Ф.Папуловский, В.Н.Скугоров; Под общ. ред. Н.Н.Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.: ил.
- 14 Карпов Р.Г., Карпов П.Р. Электрорадиоизмерения. - М.: Высш. шк., 1973. – 272 с.
- 15 Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике - М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.: ил.
- 16 Куликовский В.А. Индуктивные измерители перемещений.- М.: Госэнергоиздат, 1960. – 280 с.
- 17 Куликовский К. Л., Купер В. Я. Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 448 с.: ил.
- 18 Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи: Учеб. пособие для вузов - Л.: Энергоатомиздат, 1983.- 328 с.
- 19 Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. - Киев: Высш. шк., 1986. – 504 с.

20 Основы метрологии и электрические измерения: Учеб. для вузов / Б.Я.Авдеев, Е.М.Антонюк, Е.М.Душин и др.; Под общ. ред. Е.М.Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 480 с.: ил.

21 Ревин В.Т., Кострикин А.М. Метрология и измерения. Генераторные измерительные преобразователи: Метод. пособие. – Мн.: БГУИР, 1994. – 46 с.

22 Резисторы: Справ. / Ю.Н.Андреев и др./ Под ред. И.И.Четверткова. - М.: Энергоиздат, 1981. – 352 с.

23 Реуцкий В. С. Метрология и измерения. Метод. разработка для индивидуальной работы студентов. Ч. I. - Мн.: МРТИ, 1990. - 54 с.

24 Скрипник Ю.А. Повышение точности измерительных устройств. –Киев: Техника, 1976. – 264 с.

25 Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ./Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М.: Мир, 1992. 259с.: ил.

26 Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. - М.: Энергия, 1966. - 698 с.: ил.

27 Электрические измерения: Учеб. для вузов. / Под ред. А.В.Фремке и Е.М.Душина. -Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. -392 с.: ил.

28 Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В.Новицкого. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергия, 1975. - 576 с.

Учебное издание

Ревин Валерий Тихонович

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Учебное пособие
для студентов специальности 54 01 01
«Метрология, стандартизация и сертификация»

В 5-ти частях

Часть 1

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н.Батурчик

Подписано в печать

21.08.2002.

Формат 60x84 1/16. ↑

Бумага *сфт*

Печать *ручной*

Гарнитура "Таймс".

Усл. печ. л 4, 3

Уч.-изд. л. 4,0.

Тираж 100 экз.

Заказ 332

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛП № 156 от 05.02.2001 Лицензия ЛП № 509 от

03.08.2001 220013, Минск, П.Бровки, 6