

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный технический университет**

**Приборостроительный факультет**

**Кафедра «Стандартизация, метрология и информационные системы»**

**Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине  
«АНАЛИЗ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ»  
для студентов специальности 1-54 01 01 «Метрология, стандартизация и  
сертификация (машиностроение и приборостроение)»**

**Составители: Коробко Юрий Станиславович,  
Самохвал Петр Михайлович.**

**Минск ◊ БНТУ ◊ 2022**

## **Перечень материалов**

Электронный учебно – методический комплекс (ЭУМК) по дисциплине «Анализ и преобразование измерительной информации» содержит:

материалы для теоретического изучения учебной дисциплины, представленные учебным пособием «Анализ и преобразование измерительной информации», рекомендации по выполнению лабораторных работ, представленные в учебно – методическом пособии «Измерительные преобразователи. Лабораторный практикум», контрольные вопросы к зачету и самостоятельной подготовке по учебной дисциплине, примерный тематический план учебной дисциплины и перечень основной и дополнительной литературы.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

I ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ .....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....	8
1.1 Место ИИС в современной измерительной технике.....	8
1.2 Классификация ИИС .....	12
2 ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ .....	17
2.1 Измерительные сигналы .....	17
2.2 Классификация измерительных сигналов.....	18
2.3 Основные виды измерительных сигналов.....	19
3 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	25
3.1 Понятие средства измерения .....	25
3.2. Классификация измерительных преобразователей.....	26
3.3 Датчики .....	28
3.4 Характеристики измерительных преобразователей.....	33
3.5 Схемы включения датчиков.....	35
4 ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН .....	38
4.1 Термоэлектрические преобразователи .....	38
4.2 Оптические преобразователи .....	46
4.3 Датчики магнитного поля .....	58
4.4 Электромагнитные датчики .....	67
4.5 Резистивные измерительные преобразователи.....	75
4.6 Емкостные измерительные преобразователи .....	84
4.7 Пьезоэлектрические преобразователи.....	90

4.8 Индукционные датчики.....	95
4.9 Струнные датчики.....	103
4.10 Выбор первичных преобразователей.....	107
5 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ.....	111
5.1 Задачи преобразования измерительных сигналов.....	111
5.2 Преобразователи аналоговых сигналов.....	112
6 АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	128
6.1 Структуры аналоговых измерительных приборов.....	128
6.2 Индикаторные устройства.....	131
7 ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	145
7.1 Обобщенная структурная схема цифрового измерительного прибора.....	146
7.2 Времяимпульсные АЦП.....	150
7.3 Электронно-счетные частотомеры.....	157
7.4 Устройства отображения измерительной информации.....	161
8 ИНТЕРФЕЙСЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....	167
8.1 Общая характеристика.....	167
8.2 Интерфейс МЭК.....	169
8.3 Интерфейс КАМАК.....	171
8.4 Интерфейс RS-232.....	173
9 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТЯХ.....	177
9.1. Осциллографы.....	177
9.2 Анализаторы спектра.....	187
10 СОВРЕМЕННЫЕ АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	194

10.1 Интеллектуальные измерительные преобразователи .....	200
10.2 Назначение и виды ИИС .....	201
10.3 Программная и аппаратная части средств измерений .....	203
11 ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ИИС И ИХ КОМПОНЕНТОВ.....	205
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ДЛЯ УГЛУБЛЕННОГО ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА .....	213
II ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	215
III РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ.....	321
IV ВСПОМАГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ.....	323
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА.....	340

## I ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Материалы для теоретического изучения учебной дисциплины «Анализ и преобразование измерительной информации» представлены учебным пособием, включающим 10 основных глав, приведенных ниже.

### ВВЕДЕНИЕ

Применение и развитие измерительной техники всегда было обусловлено потребностями производства, торговли и других сфер человеческой деятельности. Контрольно-измерительные операции давно стали неотъемлемой частью технологических процессов. В значительной степени именно они определяют качество выпускаемой продукции.

Прогресс измерительной техники неразрывно связан с научно – техническим прогрессом. Современные научные и технические задачи приводят к новым измерительным задачам, для решения которых нужны новые, современные средства измерений (СИ). К этим средствам измерений сегодня предъявляются следующие требования:

- высокая точность измерений;
- широкий диапазон измерений;
- большая номенклатура измеряемых величин;
- высокая производительность измерительных операций;
- автоматизация измерительных операций;
- большое число выполняемых функций.

Практическое решение поставленных задач оказалось возможным благодаря бурному развитию вычислительной и измерительной техники. Особая, определяющая роль при этом принадлежит применению различного рода преобразователей (датчиков) измерительной информации, возможность создания которых сегодня очень большая и многогранная. Это привело к широкому появлению различного рода измерительных систем (информационно – измерительных – ИИС), которые позволяют решать конкретные задачи

производства и научных исследований, требующих получения, обработки, отображения и хранения больших объемов измерительной информации.

Современная электроника и вычислительная техника позволили настолько сильно увеличить быстродействие и объемы памяти электронных вычислительных машин, что практически нет лимита в реализации самых сложных измерительных задач. Серийно выпускаемые измерительные преобразователи – датчики позволяют использовать электрические методы измерения большинства физических величин. При этом стоимость средств вычислительной техники, измерительных преобразователей и других компонентов ИИС снизилась до уровня, делающего экономически целесообразным их применения в производстве, научных исследованиях и мониторинге самых различных объектов.

В настоящее время ИИС применяются практически повсеместно. Они позволяют решать задачи, недоступные для других средств измерения, обеспечивают высокий уровень автоматизации процесса измерений, высокую достоверность получаемых результатов, высокоинформативную и удобную индикацию результатов, являются симбиозом аппаратных средств и алгоритмов обработки измерительной информации. Поэтому и проектирование ИИС, и их применение невозможны без правильного теоретического обоснования и понимания этих алгоритмов. При этом благодаря наличию в составе ИИС современных ЭВМ, возможна дальнейшая обработка результатов измерений, полученных путем обработки первичной измерительной информации, что позволяет решать с помощью ИИС широкий спектр других задач, не являющихся чисто измерительными, в частности, контроль качества, распознавание образов и др.

# 1 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

## 1.1 Место ИИС в современной измерительной технике

В современной литературе измерительные системы рассматриваются как наиболее распространенные разновидности информационно – измерительных систем. С метрологической точки зрения измерительная система (ИС) – совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту. В этом же документе приведен один из примеров ИС: измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о ряде величин в разных энергоблоках. Она может содержать сотни измерительных каналов. Измерительные системы обладают основными признаками средств измерений и являются их специфической разновидностью.

Под информационно – измерительными системами в целом понимается совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования и обработки с целью представления в удобном потребителю виде либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации. Для упрощения при описании измерительных систем в целом в учебном пособии будет использовано обобщающее название – ИИС.

При этом средствами измерительной техники считаются технические средства, специально предназначенные для измерений, а под средствами измерений (СИ) понимаются технические средства, предназначенные для измерений и имеющие нормированные метрологические характеристики. Указанные понятия детально рассматриваются в курсе «Теоретическая метрология».

Измерения являются одним из основных источников количественной информации об исследуемых объектах. Измерительная техника развивалась и



совершенствовалась на протяжении всей истории человечества. Во все времена ее уровень определялся уровнем и потребностями производства. По мере развития производства и научных исследований расширялся круг измеряемых физических величин.

Если во времена античности измерялось всего несколько величин (время, масса, длина, площадь, объем), то сейчас перечень измеряемых величин составляет сотни тысяч наименований. Одновременно с увеличением номенклатуры измеряемых величин на порядки возрастали диапазоны и точность измерений, расширялись их функциональные возможности. Сегодня вырастает вес автоматизированных СИ, увеличивается объем получаемой и обрабатываемой измерительной информации.

Автоматизированные СИ встраиваются в системы автоматического управления различного уровня и становятся составными частями автоматизированного производства наряду с обрабатывающим и другим технологическим оборудованием. Появление и развитие ИИС неразрывно связано с двумя событиями.

Первое – это появление и развитие вычислительной техники. На начальном этапе (1950 – 1960 – е годы) существовали как аналоговые, так и цифровые вычислительные устройства. Поэтому аналоговые ИИС были более распространены. Для их создания использовалась ламповая электроника, а основным элементом памяти был магнитный сердечник с катушками (один сердечник обеспечивал один бит памяти). В последующие десятилетия шло интенсивное развитие цифровых вычислительных устройств, которые в настоящее время практически вытеснили аналоговые устройства, хотя аналоговые и гибридные ЭВМ еще находят некоторое применение. На смену лампам пришли транзисторы, а затем микросхемы малой и средней интеграции. В настоящее время используются персональные компьютеры или специализированные микропроцессорные вычислительные устройства на базе больших интегральных схем.

Второе – это создание различного рода измерительных преобразователей. Измерительные преобразователи обеспечивают преобразование исследуемой физической величины в другой вид величины, обычно – электрическую, наиболее удобную с точки зрения обработки, хранения, передачи и т.п.

Современные измерительные преобразователи позволяют преобразовать в электрический сигнал любую физическую величину, а благодаря возможностям вычислительной техники удалось на порядки повысить точность измерения.

Измерительные системы находят применение везде, где необходимо автоматическое получение опытным путем количественной информации о состоянии объектов исследования. Причем это получение связано с выполнением массовых операций и осуществлением сложных измерений, недоступных локальным измерительным приборам. ИИС воспринимают изучаемые величины непосредственно от объекта, а на их выходе формируется количественная информация об исследуемом объекте, которая используется для принятия каких – либо решений. Использование этой информации не входит в функции ИИС.

На современном этапе развития общества и производства практически все сферы деятельности человека немислимы без применения ИИС, особенно такие как космические исследования (измерительное оборудование систем управления и жизнеобеспечения, радиотелеметрические системы), аэродинамика, (измерение аэродинамических сил, распределение давлений, температур, расходов газов), экспериментальная прочность (измерение внешних сил, воздействующих на объекты и реакции на их действие, тензометрия, динамометрия, термометрия), геофизика (исследование строения земной коры), океанография (комплексные измерения температуры, химического состава, скоростей движения, давлений, в водной среде), химия, физика, медицина, биология, метеорология, робототехника, метрология, автоматизированный контроль и испытание продукции, охрана окружающей среды и т.п.

Следует отметить, что сегодня широко реализуются ИИС, встроенные в аппаратуру и установки (испытательный стенд, станция, отдельная часть автоматизированной системы управления). Они встречаются часто, но не всегда выделены конструктивно и не отражены в названии. Создаются ИИС, в которых широко применяются системные измерительные преобразователи (голографические, телевизионные, рентгенографические и т.п.). Они позволяют воспринимать поля исследуемых физических величин. Современные ИИС позволяют рассредоточить вычислительную мощность по различным уровням и блокам. Это позволяет уменьшить потоки измерительной информации, сократить время ее обработки. Создаются новые типы ИИС – измерительные роботы.

Следует также отметить, что идет существенная миниатюризация всех компонентов измерительной и вычислительной техники, особенно ее электронных компонентов. Например, отечественные ИИС 1980 – х годов занимали помещения в 20 – 30 м<sup>2</sup>. Сейчас вся измерительная и обрабатывающая часть может занимать на столе площадь в 1 – 2 м<sup>2</sup>. В связи с этим возникает вопрос о разграничении понятий между автоматизированными измерительными приборами и ИИС. Этой границей, конечно, является системный принцип их построения.

Появление, развитие и широкое использование ИИС поставило перед теоретической метрологией ряд новых задач.

- 1) Обоснование методов выбора целей измерения при исследовании сложных объектов.
- 2) Выработка общих подходов к выбору структуры и элементов ИИС.
- 3) Разработка алгоритмов обработки измерительной информации, вытекающих из поставленной цели измерения.
- 4) Разработка методов оценки погрешностей и неопределённостей результатов измерений с помощью ИИС и выбора и нормирования их метрологических характеристик.
- 5). Разработка методов поверки и калибровки ИИС.

## 1.2 Классификация ИИС

Существует множество различных признаков, позволяющих классифицировать ИИС. Рассмотрим наиболее важные из них.

1. В зависимости от назначения ИИС подразделяются на:

- измерительные информационные;
- измерительные контролирующие;
- измерительные управляющие.

Измерительная информационная – измерительная система, предназначенная для целей представления измерительной информации в виде необходимом потребителю.

Измерительная контролирующая – измерительная система, предназначенная для целей контроля параметров технологического процесса, явления, объекта или его состояния. Они могут выполняться в виде систем автоматического контроля (САК), которые осуществляют контроль соотношения между текущим (измеренным) состоянием объекта и установленной «нормой» по известной математической модели объекта. По результатам обработки полученной информации выдается вывод о состоянии объектов контроля.

Измерительная управляющая – измерительная система, предназначенная для целей автоматического управления технологическим процессом, автоматическим производством. Она может быть представлена в виде измерительной контролирующей системы, включающей в себя устройства обратной связи для воздействия на контролируемый объект для поддержания заданных значений параметров, изменения их по заданному алгоритму и т. д.

2. В зависимости от характера входных величин ИИС различаются:

- по количеству входных величин;
- по поведению входных величин во времени: неизменные или изменяющиеся;
- по расположению входных величин в пространстве: сосредоточенное или распределенное;

- по представлению входных величин: дискретное или непрерывное;
- по энергетическому признаку входных величин: активные, пассивные;
- по характеру помех, суммирующихся с входными величинами: независимые помехи; помехи, зависящие от исследуемых величин.

3. По видам выходной информации ИИС разделяются:

- по характеру выходной информации: либо выдается измерительная информация (именованные числа, их отношения, графики и т. п.), либо осуществляются количественные суждения (выводы по результатам контроля, диагностики, идентификации);

- по степени обработки выходной информации: либо вырабатываются результаты оценки одного показателя, либо вырабатываются показатели, характеризующие функциональные зависимости, статистические показатели и т. д.;

- по потребителю измерительной информации: человек – оператор, ЭВМ, АСУ.

4. По виду структурных схем ИИС:

- системы последовательного действия (одноканальная система);

- системы параллельного действия (многоканальная система);

- системы параллельно – последовательного действия (с коммутатором на входе);

- системы мультиплицированной структуры.

### **1.3. Обобщенная структура ИИС**

С функциональной точки зрения при современном уровне развития цифровой вычислительной техники все возможные варианты реализаций ИИС можно рассматривать как частные случаи обобщенной структуры, приведенной на рисунке 1.1.

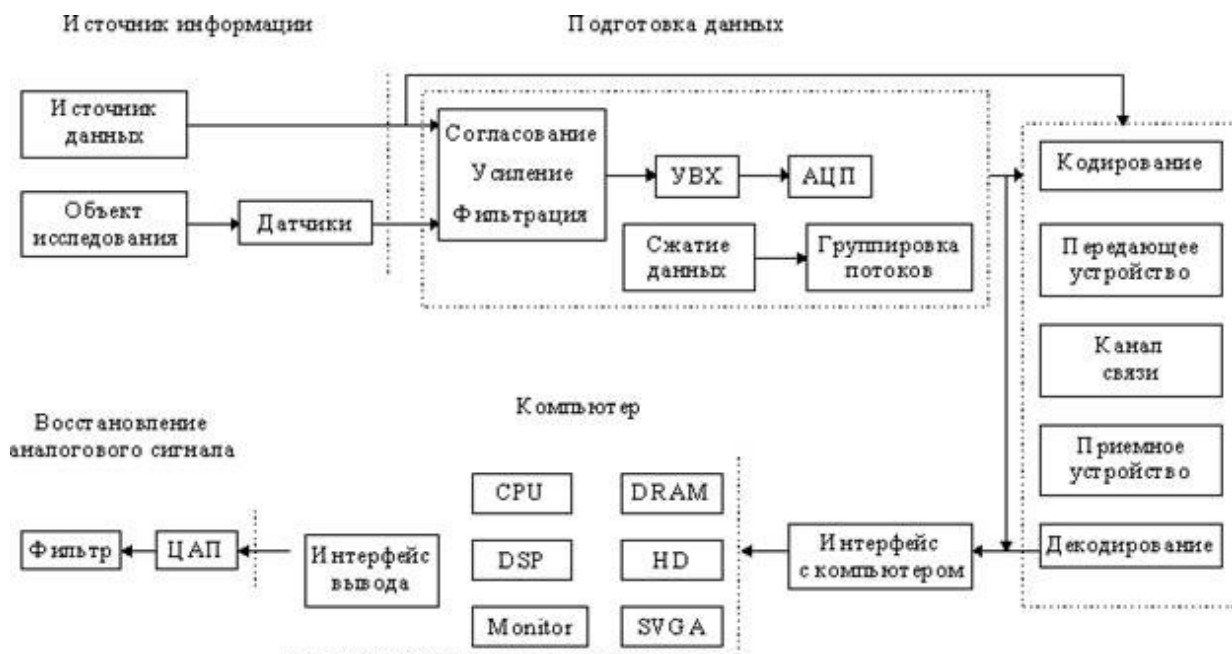


Рисунок 1.1 – Обобщенная структура ИИС

В самом общем виде структура ИИС включает в себя источник информации, модуль подготовки данных, связующий элемент, модуль вычислительной техники, модуль восстановления.

Источником информации является объект исследования, подлежащий измерению. В общем случае измеряемые величины объекта исследования являются аналоговыми, которые посредством первичных преобразователей (датчиков) преобразуются в измерительные сигналы. Первичные измерительные преобразователи преобразует измеряемые величины в пропорциональные электрические величины (напряжение, ток, сопротивление, емкость, индуктивность и др.), подлежащие дальнейшей обработке. Такое преобразование наиболее выгодно, поскольку электрические величины в дальнейшем удобно обрабатывать, хранить, передавать и т.п.). Датчики являются обязательными компонентами ИИС. Вид датчика в первую очередь определяется видом преобразуемой величины. В рамках одной ИИС, если даже преобразуемые величины одинаковы по физическому смыслу, первичные преобразователи могут быть различными, в частности, в зависимости от требуемого диапазона измерения.

В модуле подготовки данных измерительный сигнал подвергается предварительной аналоговой обработке: согласованию, приведению амплитуды к динамическому диапазону устройства выборки и хранения (УВХ), полосовой фильтрации (ограничению полосы частот сигналов для корректной оцифровки) и т.п. Поскольку обработка измерительной информации в ИИС является цифровой, то каждый сигнал подвергается процедуре аналого-цифрового преобразования (АЦП).

Связующий элемент, или канал связи – это техническое устройство или часть окружающей среды, предназначенные для передачи с минимально возможными искажениями измерительных сигналов от одного компонента ИИС к другому. Например, проводная линия связи, радиоканал, телефонная линия связи, линия электропередачи с соответствующей каналобразующей аппаратурой т. п. Основными элементами связующего элемента являются кодирующие и декодирующие устройства, а также передающие и приемные устройства.

Модуль вычислительной техники или компьютер выполняет обработку измерительной информации, например, статистическую обработку сигналов, спектральную обработку, формирование моделей процессов и явлений, хранение данных и т.п.

В модуле восстановления измерительной информации осуществляется восстановление исходной аналоговой измерительной информации по цифровым отсчетам с допустимой погрешностью. Здесь производится цифро-аналоговое преобразование в соответствующем преобразователе – ЦАП. Иногда цифро-аналоговое преобразование не выполняется, поскольку регистрация, хранение и обработка измерительной информации выполняются в цифровом виде.

Цепь преобразования данных одного устройства (или датчика) в системе образует измерительный канал.

Измерительный канал (ИК) – это конструктивно или функционально выделенная совокупность элементов измерительной системы, выполняющая

законченную функцию, начиная с восприятия измеряемой величины до получения результата ее измерений, выражаемого числом или соответствующим ему кодом, или до получения аналогового сигнала, один из параметров которого – функция измеряемой величины.

Измерительный канал можно представить в виде последовательного соединения измерительных преобразователей, некоторые из которых сами могут быть многоканальными. Понятие ИК отражает сущность выполнения измерений в ИИС. Оно необходимо для анализа погрешностей измерения и организации метрологического обеспечения. Конструктивно различные элементы канала могут быть объединены в единое устройство. Например, в качестве измерительных каналов могут использоваться электронные измерительные приборы (цифровые вольтметры, частотомеры, весы и др.), имеющие цифровой выход. Различают одноканальные и многоканальные ИИС.

Одноканальная измерительная система – система, в которой измерительная информация от разных точек измеряемого объекта или среды поступает по одному измерительному каналу.

Многоканальная измерительная система – система, в которой имеется два и более измерительных каналов.

Измерительная система может включать десятки, сотни и тысячи измерительных каналов. Протяженность ИК может составлять от десятков метров до нескольких сотен километров.

При описании структуры ИИС иногда используется понятие измерительно – вычислительный комплекс (ИВК), которое включает все элементы ИИС, кроме первичных преобразователей. С метрологической точки зрения ИВК – средство измерения, представляющее функционально объединенную совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенное для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи. Как правило, ИВК выпускаются как самостоятельные изделия с целью унификации аппаратной части ИИС. Однако сегодня, в связи с миниатюризацией ЭВМ, информационно – вычислительные комплексы теряют свою актуальность.



## 2 ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### 2.1 Измерительные сигналы

В метрологии сведения об измеряемой физической величине называют измерительной информацией. Согласно РМГ29 – 2013 измерительной называют информацию о значении величины, входящей в модель измерений. В измерительную информацию могут также входить и другие данные, например, сведения о погрешности измерений, о числе измерений и др. Физическими носителями измерительной информации являются измерительные сигналы (ИС). Измерительный сигнал – это носитель измерительной информации один или несколько параметров которого функционально связаны с измеряемой величиной. Физическая природа сигналов, несущих измерительную информацию, может быть самой различной: электрический ток или напряжение, радиосигнал, давление сжатого воздуха, световой поток, деформация, перемещение и др.

Первичным носителем измерительной информации, т.е. первичным измерительным сигналом, всегда является сама измеряемая физическая величина. На пути от объекта измерения к показывающему или регистрирующему устройству ИИС измерительный сигнал может подвергаться нескольким последовательным преобразованиям, которые разделяют на первичное и вторичные. Первичное преобразование – это преобразование, при котором входным сигналом является измеряемая величина.

Не все величины могут быть измерены непосредственно. Так, например, о температуре, давлении, силе, электрическом токе мы судим по эффектам, наблюдаемым при их действии на объекты. Воздействие температуры сопровождается тепловым расширением материалов. Действие силы или давления приводит к деформации тел. Взаимодействие проводника, через который идет электрический ток, с магнитным полем порождает силу, действующую на проводник. На пути к отображению

измерительной информации полученный сигнал подлежит дальнейшим (вторичным) преобразованиям.

Измерительные сигналы могут характеризоваться несколькими параметрами, которые разделяют на информативные и неинформативные. Параметр сигнала, связанный с измеряемой величиной и несущий основную измерительную информацию, называют информативным, а все остальные параметры – неинформативными.

## 2.2 Классификация измерительных сигналов

Классификацию измерительных сигналов можно проводить по различным признакам. Наиболее важные признаки представлены на рисунке 2.1.

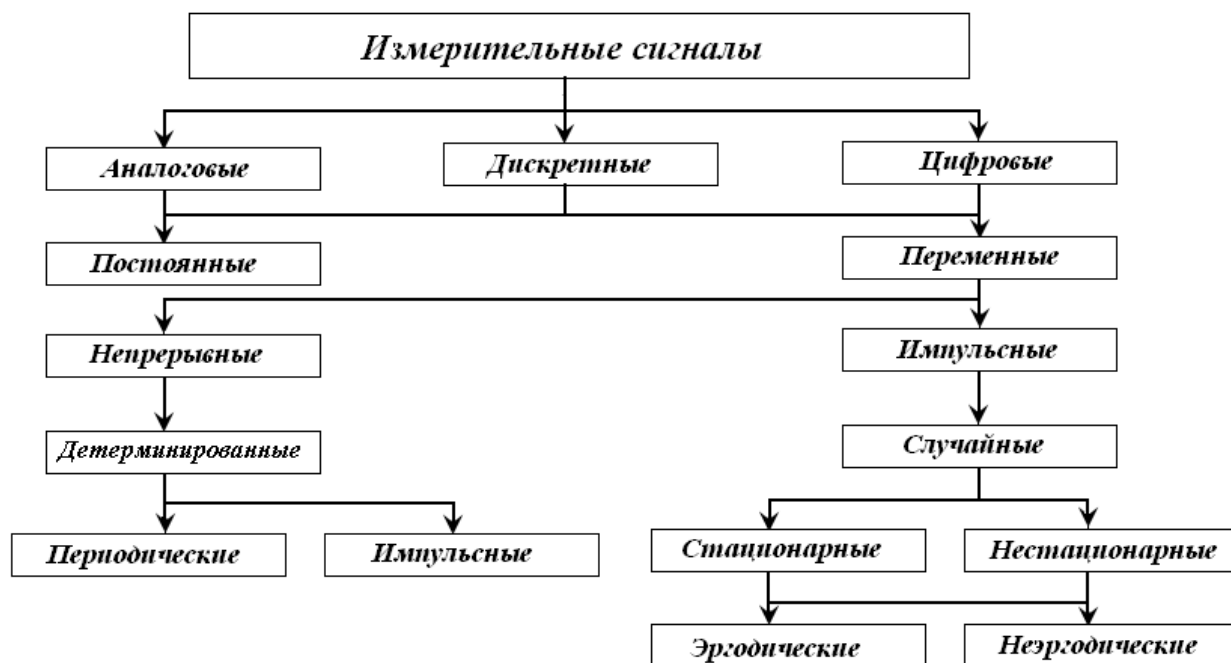


Рисунок 2.1 – Классификация измерительных сигналов

Информативный параметр аналогового сигнала может принимать в определенных границах любые значения, дискретного сигнала – только некоторое конечное число значений. Цифровые измерительные сигналы представляют собой частный случай дискретных сигналов, каждому значению которых поставлены в соответствие определенные комбинации символов некоторого алфавита (например, десятичной или двоичной системы).

Детерминированные измерительные сигналы характеризуются тем, что при повторении условий наблюдения они принимают одни и те же значения или одни и те же последовательности значений.

Случайные измерительные сигналы наблюдаются при исследовании событий, которые за счет влияния ряда случайных факторов при повторении условий наблюдения наступают случайно в неопределенные моменты времени.

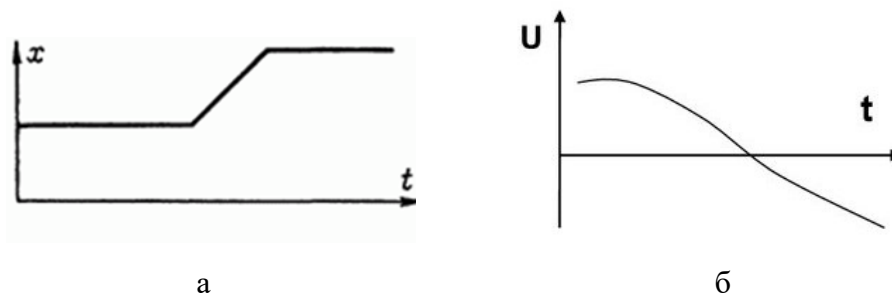
### **2.3 Основные виды измерительных сигналов**

Носителями измерительной информации могут быть сигналы различной физической природы: электрические, пневматические, оптические и т.п. Однако сегодня, в связи с бурным развитием электроники и вычислительной техники наиболее удобным и распространенным видом сигналов для передачи, преобразования и анализа измерительной информации являются электрические сигналы. В данном разделе в качестве носителей измерительной информации будут рассмотрены именно электрические измерительные сигналы. Рассмотрим основные виды измерительных сигналов.

#### **2.3.1 Аналоговые измерительные сигналы**

Аналоговый сигнал – это сигнал, описываемый непрерывной или кусочно – непрерывной функцией, одним из аргументов которой является время. Значения аналогового сигнала произвольны в каждый момент времени и могут иметь бесконечное множество значений в определенных пределах. Они непрерывны и их значения не могут изменяться скачками. Пример аналогового сигнала – напряжение с выхода термопары, которая передает в аналоговом виде значение температуры в программируемый логический контроллер, управляющий температурой в электрической печи. Обычно носителем электрического измерительного сигнала является электрическое напряжение. Рассмотрим некоторые виды аналоговых электрических сигналов.

1. Постоянные или медленноменяющиеся электрические напряжения (рисунок 2.2).

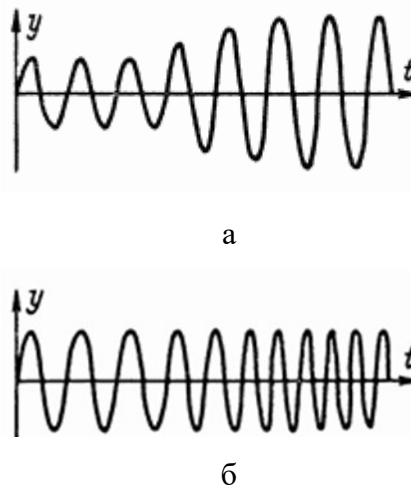


а – постоянное напряжение; б – медленно меняющееся напряжение  
 Рисунок 2.2 – Постоянные или медленноменяющиеся напряжения

Информативным параметром таких напряжений может быть само значение напряжения, либо его полярность, либо и то и другое.

## 2. Аналоговые периодические электрические напряжения.

Напряжение синусоидальной формы (рисунок 2.3).



а – модулированное по амплитуде; б – модулированное по частоте

Рисунок 2.3 – Напряжения синусоидальной формы

Синусоидальные сигналы – могут быть модулированы по амплитуде, частоте или фазе. В зависимости от того, который из этих параметров сигнала является информативным, говорят об амплитудно – модулированных, частотно – модулированных или фазомодулированных сигналах.

Напряжение формы «меандр» (рисунок 2.4).

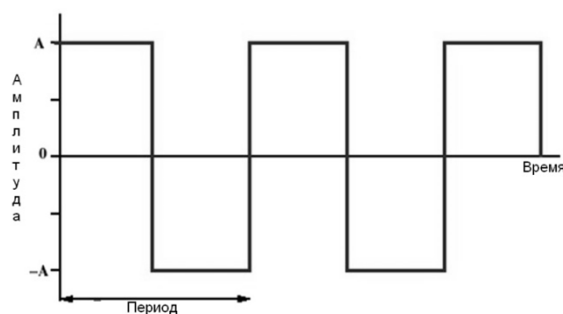
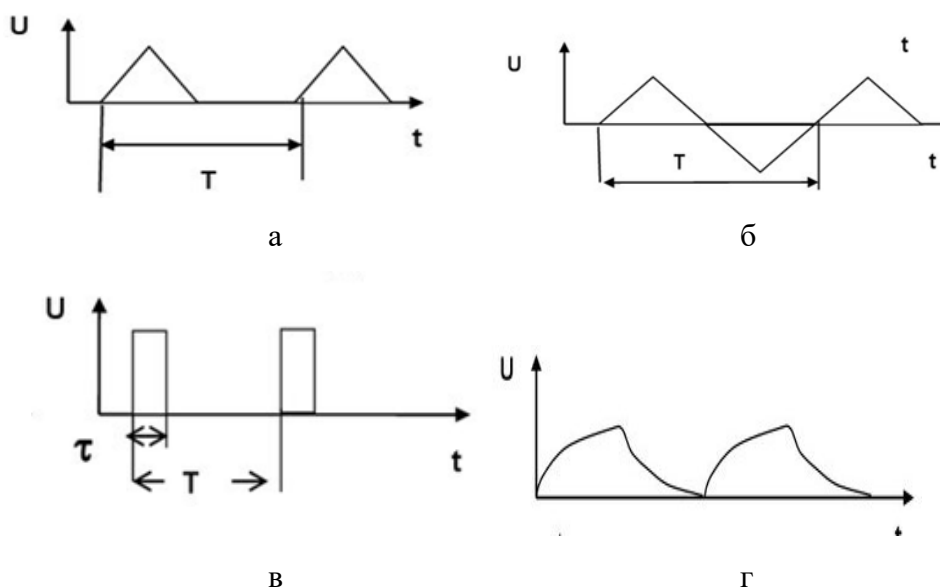


Рисунок 2.4 – Напряжения формы «меандр»

Информативными параметрами такого напряжения могут быть амплитуда и период повторения сигнала.

Гармонические напряжения сложных форм (рисунок 2.5).

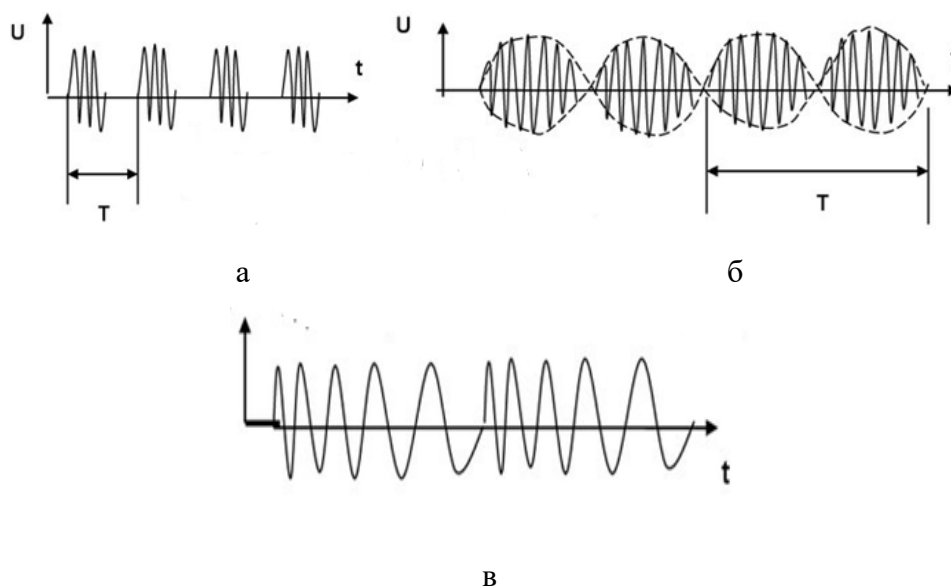


а – треугольная; б – пилообразная; в – последовательность видеоимпульсов; г – сложная форма

Рисунок 2.5 – Напряжения сложных форм

Информативными параметрами таких напряжений могут быть амплитуда, период повторения, длительность импульсов, фаза, комбинация импульсов различного уровня и т.п. Так, Последовательность видеоимпульсов (прямоугольных импульсов) может быть модулирована по амплитуде (амплитудно – импульсно – модулированные сигналы) по частоте (частотно – импульсно – модулированные сигналы), по фазе (фазо – импульсно – модулированные сигналы) по ширине импульсов (широотно – импульсно – модулированные сигналы).

3. Радиосигналы (рисунок 2.6). Радиосигналами называют электрические высокочастотные колебания, которые заключают в себе передаваемое сообщение (измерительную информацию). Информативными параметрами радиосигналов могут быть, например, период повторения радиоимпульсов (рисунок 2.6 а, б), либо частота радиосигнала (рис. 2.6 в).



а, б – радиосигналы с информативным параметром в виде периода повторения; в – радиосигналы с информативным параметром в виде частоты

Рисунок 2.6 – Радиосигналы

Аналоговый сигнал невозможно непосредственно ввести в компьютер и обработать. Поэтому его необходимо преобразовать в дискретный сигнал.

### 2.3.2 Дискретные сигналы

Дискретный сигнал – это сигнал, который представляется в виде последовательности значений, взятых в дискретные моменты времени (рисунок 2.7). Эти моменты называются отсчётами, а интервал  $\Delta t$  называется интервалом дискретизации.

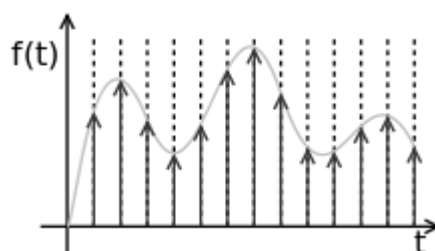


Рисунок 2.7 – Дискретный сигнал

Дискретный сигнал (квантованный по времени) представляет из себя последовательность коротких по времени импульсов с периодом повторения  $\Delta t$ , амплитуда которых равна амплитуде преобразованного аналогового сигнала в эти моменты времени. То есть, дискретизация аналогового сигнала состоит в том, что сигнал представляется в виде последовательности значений, взятых в дискретные моменты времени. Информативным параметром являются эти значения амплитуды.

При осуществлении операции квантования дискретный сигнал разбивается на уровни (рисунок 2.8). Расстояния между этими уровнями называется шагом квантования  $\Delta$ .

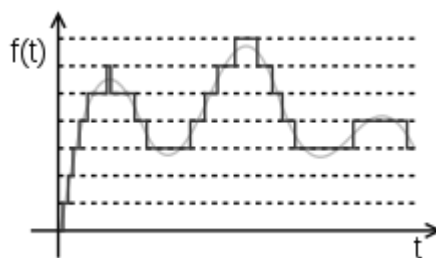


Рисунок 2.8 – Квантованный сигнал

Цифровыми сигналами называются сигналы, одновременно дискретные по времени и квантованные по уровню (рисунок 2.9). На каждом заданном промежутке времени известно приближённое (квантованное) значение сигнала. Это значение можно записать в двоичной системе. Получится последовательность нулей и единиц, которая и будет являться цифровым сигналом (кодом).

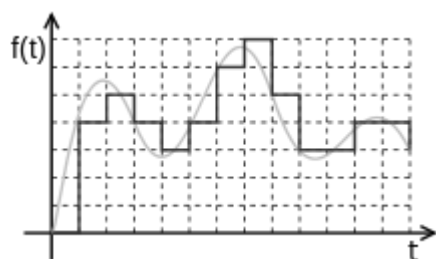
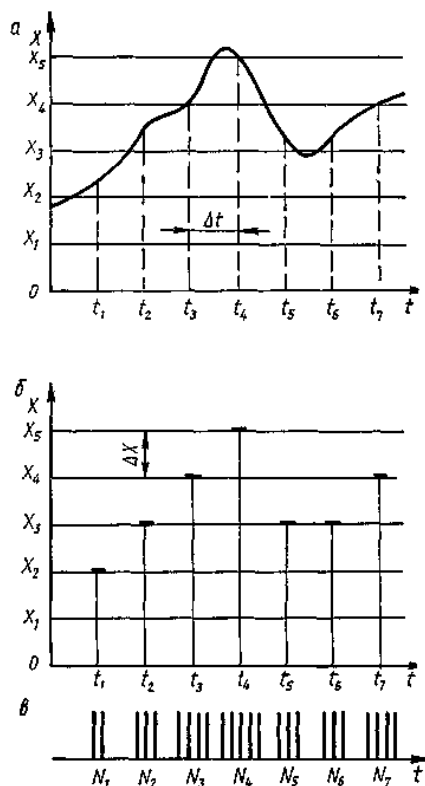


Рисунок 2.9 – Дискретный сигнал

В качестве примера на рисунке 2.10 представлены эпюры преобразования аналогового сигнала  $X$ . Рисунок 2.10, а – демонстрирует операцию

дискретизация. Рисунок 2.10, б – квантование. На рисунке 2.10, в – показана операция преобразования квантованного сигнала в унитарный код, когда число импульсов пропорционально квантованному значению. В дальнейшем (например, при вводе в ЭВМ) унитарный код может быть преобразован в двоично – десятичный код.



а – дискретизация; б – квантование; в – преобразование квантового сигнала в унитарный код

Рисунок 2.10 – Преобразование аналогового сигнала



## **3 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

### **3.1 Понятие средства измерения**

Современное понятие «средство измерений» определено РМГ 29 – 2013.

Средство измерений (СИ) – техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики.

В метрологии средства измерений принято классифицировать по виду, принципу действия и метрологическому назначению. С точки зрения изучаемой дисциплины интерес представляет первый классификационный признак. По виду средств измерений делят на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы и измерительно – вычислительные комплексы.

Мерой называется СИ, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения одного или нескольких заданных размеров физической величины.

Измерительный преобразователь – СИ, предназначенное для преобразования измеряемой величины в другую величину, предназначенную для дальнейших преобразований.

Измерительный прибор – СИ, предназначенное для получения значения измеряемой физической величины в установленном диапазоне и в форме, удобной для снятия результата измерений. Именно только эта разновидность СИ ошибочно принимается за общее понятие «средство измерений».

Измерительная установка (измерительный стенд) – СИ, представляющее из себя совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем и расположенных в одном месте.

Понятие измерительной системы было подробно рассмотрено ранее. Главная цель всех измерительных систем – автоматизация процесса измерения и

использования результатов измерений для автоматического управления различными процессами производства.

Измерительно – вычислительный комплекс представляет из себя СИ, предназначенное для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Основное внимание данной дисциплины уделено изучению измерительных преобразователей, представляющих в современной метрологии обширный класс средств измерений.

### **3.2. Классификация измерительных преобразователей**

Одним из основных вопросов современной теории измерительных устройств является положение об измерительных преобразователях. При этом измерение рассматривается как процесс приема и преобразования измерительной информации об измеряемой величине. При этом структуру любого измерительного устройства представляют в виде совокупности измерительных преобразователей, осуществляющих функциональные измерительные преобразования измерительных сигналов различной физической природы в соответствии с принципом построения.

Современные определения терминов «измерительный преобразователь», «первичный измерительный преобразователь», «чувствительный элемент», «датчик» приведены в РМГ 29 – 2013.

Измерительный преобразователь (ИП) – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь может либо конструктивно входить в состав измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), либо применяться вместе со средством измерений. Рассмотрим наиболее важные признаки, по которым классифицируют измерительные преобразователи.

По характеру преобразования измерительной информации различают аналоговый, аналого – цифровой и цифроаналоговый преобразователи. Аналоговый измерительный преобразователь преобразует одну аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал) в другую аналоговую величину (измерительный сигнал). Аналого – цифровой измерительный преобразователь (АЦП) предназначен для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код. Цифро – аналоговый измерительный преобразователь (ЦАП) преобразует числовой код в аналоговую величину. Устройство подобных преобразователей будет рассмотрено ниже.

По месту включения в измерительный канал различают первичные и промежуточные преобразователи. Первичный – это тот, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительном канале. Примером может служить терморезистор или фотоэлемент, служащие для преобразование светового потока в пропорциональный электрический ток, подлежащий дальнейшей обработке. В одном средстве измерений может быть несколько первичных преобразователей, например, ряд первичных преобразователей измерительной контролирующей системы, расположенных в разных точках контролируемого объекта. Промежуточный измерительный преобразователь занимает место в измерительном канале после первичного преобразователя. Чувствительный элемент (ЧЭ) – это часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал.

По другим признакам различают, например, передающий измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации; масштабный измерительный преобразователь, предназначенный для изменения измерительного сигнала в заданное число раз и т.п. В научной литературе можно встретить и другие классификационные признаки.

Особый интерес представляет понятие «датчик». Согласно РМГ 29 – 2013 датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого

поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию). Причем в некоторой научной литературе можно встретить отождествление понятий «датчик», «чувствительный элемент», «первичный преобразователь». И это не является «неправильностью», поскольку при современном уровне развития производства измерительной техники и электроники в одном устройстве могут быть одновременно реализованы все перечисленные компоненты. Иногда считают, что основное различие между датчиком и преобразователем состоит в том, что преобразователь представляет собой устройство, которое может преобразовывать измерительную энергию из одной формы в другую, тогда как датчик представляет собой устройство, которое может обнаруживать физическую величину и преобразовывать данные в электрический сигнал. Поэтому четкую границу между терминами «первичный измерительный преобразователь», «датчик», «чувствительный элемент» провести достаточно трудно. Все зависит от измерительной задачи, выбранных типа и конструкции датчика и т.д. Однако в любом случае датчики также являются типом преобразователей. Примеры датчиков – датчик температуры, датчик силы, датчик перемещения. Датчик, используемый в области измерений ионизирующих излучений, называют детектором.

### 3.3 Датчики

В большинстве случаев сам датчик представляет собой конструктивную совокупность одного или нескольких измерительных преобразователей (первичных и промежуточных) и сопутствующих им конструктивных элементов, предназначенную для измерения (контроля) конкретной физической величины и выполненную в виде единой конструкции. В этом случае входящий в состав датчика измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, называют в некоторых случаях чувствительным элементом. Выходные сигналы датчиков в общем случае могут быть электрическими, пневматическими, оптическим, гидравлическими и др. Однако в современных измерительных системах, как правило, используют

датчики с электрическим выходным измерительным сигналом. Это дает широкую возможность их применения в электроизмерительных схемах, приводит к ряду важных преимуществ, таких как быстроедействие, возможность передавать измерительную информацию на расстояние, возможность автоматизации процессов измерения и представления результатов в цифровой форме и их обработке в ЭВМ, многофункциональность и гибкость (позволяющие, при наличии программирующего устройства, оперативно перестраивать структуру измерительных каналов) и т.п. В датчиках, для преобразования измеряемых величин в удобную для передачи и восприятия форму используются различные физические явления, обладающие достаточно строгими закономерностями, например, тензорезистивный и пьезоэлектрический эффекты, эффекты изменения электрической емкости, омического сопротивления, электромагнитные явления и т.д. Более подробно принципы построения различных датчиков будут рассмотрены ниже.

По назначению датчики разделяют в зависимости от их применения для измерения физических величин.

1) Датчики контроля линейных и угловых размеров:

- геометрических параметров профилей и шероховатостей поверхностей;
  1. – уровней сыпучих веществ и жидкостей в различных сосудах (баках, танкерах, паровых котлах и т. п.);
- перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали;
- параметры износа трущихся частей различных механизмов, биения валов, расстояния и т. д.

Диапазон, охватываемый величинами этой, группы, простирается от долей микрона до тысяч метров, т. е. составляет примерно десять порядков. Диапазон угловых размеров равен 3 – 4 порядкам.

2) Датчики контроля различного рода силовых воздействий:

- механических напряжений в деталях и конструкциях машин и сооружений;

- силы;
- крутящих моментов;
- давления жидкостей и газов;
- акустических шумов;
- разности давлений и т. п.

Диапазоны значений величин этой группы, как правило, весьма широки. Например, в вакуумной технике приходится измерять давления до  $1,3 \cdot 10^{-8}$  Па, а в технике высоких давлений до 108 Па и выше. Диапазон давлений охватывает  $\approx 16$  порядков. Примерно такой же диапазон занимают значения сил, встречающихся в технике и научных исследованиях.

### 3) Датчики параметров движения:

- перемещения объектов в пространстве;
- линейные и угловые скорости;
- ускорения перемещений.

Значения параметров этой группы могут достигать астрономических цифр (космические расстояния и скорости). В эту группу входят также параметры вибраций (вибрационные перемещения, скорости и ускорения), скорости вращения валов и т. д.

Кроме перечисленных, измеряемые величины могут характеризовать свойства вещества (концентрация, рН – уровень, влажность и др.), электрические процессы (ток, напряжение, мощность), оптические параметры и т.д. Существует множество типов и модификаций датчиков, отличающихся принципами действия, разными вариантами выполнения схемы и конструкции.

Датчики с электрическим выходным сигналом делят на генераторные и параметрические.

В генераторных датчиках осуществляется преобразование измеряемого параметра непосредственно в электрический сигнал (т. е. они генерируют электрическую энергию). Примерами генераторных датчиков являются.

Пьезоэлектрические датчики, использующие пьезоэлектрический эффект, возникающий в некоторых кристаллах (кварц, турмалин: и др.), в зависимости от значений и характера прилагаемых к кристаллу упруго деформирующих сил.

Индукционные датчики, использующие явление электромагнитной индукции — наведение ЭДС в электрическом контуре, в котором меняется величина магнитного потока.

Фотоэлектрические датчики, использующие зависимость ЭДС фотоэлемента с запирающим слоем от освещенности.

Термоэлектрические датчики (термопары), использующие явление термоэлектрического эффекта, возникающего в цепи термопары, в зависимости от разности температур ее рабочего и свободного спаев.

Датчики электрических потенциалов, использующие зависимость концентрации водных растворов от концентрации водородных ионов в растворе, которую можно определить по потенциалу, возникающему на границе различных электродов, опущенных в контролируемый раствор.

Гальванические датчики, использующие зависимость ЭДС гальванического элемента от состава и концентрации растворов электролитов.

В параметрических датчиках измеряемая величина преобразуется в параметр электрической цепи — сопротивление, индуктивность, емкость и т. п., причем датчик питается от внешнего источника электрической энергии. Примерами параметрических датчиков являются.

Емкостные датчики, использующие зависимость электрической, емкости конденсатора от размеров и взаимного расположения его обкладок при воздействии на него измеряемого параметра.

Электромагнитные и магнитоэлектрические датчики, которые объединяют три типа датчиков – индуктивные, трансформаторные и магнитоупругие.

Индуктивные датчики, которые основаны на зависимости индуктивности дросселя от длины и площади сечения его сердечника от взаимного расположения обмоток дросселя и частей магнитопровода.

Трансформаторные датчики, которые основаны на изменении взаимной индуктивности обмоток преобразователя под воздействием механических перемещений ферромагнитного сердечника.

Магнитоупругие датчики, действие которых основано на принципе изменения магнитной проницаемости (или индукции) ферромагнитных тел под воздействием приложенных к ним механических сил или напряжений.

Электроконтактные датчики, коммутирующие электрическую цепь под воздействием измеряемого параметра.

Потенциометрические (реостатные) датчики, использующие зависимость сопротивления реостата от положения его движка, который может перемещаться под воздействием контролируемого параметра.

Жидкостные (электролитические) датчики, принцип действия которых основан на изменении сопротивления электропроводящей жидкости при взаимном перемещении электродов или изменении геометрической формы корпуса чувствительного элемента.

Тензорезисторные (тензометрические) датчики, использующие свойство тензопреобразователя изменять свое сопротивление при упругих деформациях. Они подразделяются в зависимости от материала тензорезистора на проводниковые (проволочные и фольговые) и полупроводниковые.

Датчики контактного сопротивления, использующие зависимость контактного сопротивления между поверхностями двух твердых тел от усилия их сжатия.

Магнитомодуляционные датчики, представляющие собой устройства, содержащие магнитную систему и магнитометр, при взаимном перемещении которых меняется напряженность магнитного поля, пронизывающего магнитометр, и, соответственно, выходной сигнал.

Датчики термосопротивления, пьезосопротивления, фотосопротивления и др., использующие свойства изменять свое сопротивление соответственно в зависимости от температуры, механического напряжения, освещенности и т. д.



### 3.4 Характеристики измерительных преобразователей

Параметры датчиков, как средств измерений, определяются определенными характеристиками. Рассмотрим основные из них.

Входная величина –  $X$ , воспринимаемая и преобразуемая датчиком.

Выходная величина –  $Y$ , используемая для передачи информации. Она обычно модулируется по амплитуде, по временному признаку (частота, фаза и др.), по кодовому признаку, а также по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи).

Статическая характеристика датчика, показывающая зависимость выходной величины от входной.

$$Y = f ( X )$$

Наиболее приемлемой статической характеристикой для большинства датчиков является линейная характеристика. Для линейризации характеристик датчиков, используют различные методы, например, усилители – линейризаторы, программные методы и др. Однако наряду с линейными часто используются датчики с другими характеристиками, например, релейными, логарифмическими и т.п.

Математическое или графическое описание связи выходной величины от входной называется функцией преобразования измерительного преобразователя (или для датчика в целом – функцией преобразования датчика), которая характеризуется коэффициентом преобразования  $K$  – отношением выходной величины к входной величине:

$$K = Y / X$$

Отношение изменения выходной величины  $\Delta Y$  к соответствующему изменению входной величины  $\Delta X$  называется чувствительностью датчика:

$$S = \Delta Y / \Delta X$$

Если зависимость между выходной и входной величинами является линейной, то чувствительность преобразователя не зависит от входной величины. В этом случае чувствительность и коэффициент преобразования

равны. Поэтому для линейных датчиков используют как термин «чувствительность», так и термин «коэффициент преобразования».

Динамическая характеристика, которая описывает поведение преобразователя при изменениях входной величины и определяется структурой его элементов. Динамические свойства датчиков могут быть определены передаточными функциями, переходными, импульсно – переходными (весовыми), амплитудно – частотными, амплитудно – фазовыми и другими характеристиками.

Порог чувствительности, определяющий минимальное изменение входной величины, вызывающее заметно различимое изменение выходного сигнала.

Основная погрешность, показывающая максимальную разность между получаемой в нормальных условиях величиной выходного сигнала и его номинальным значением, определяемым по статической характеристике для данной входной величины. Основная погрешность выражается как в абсолютных, так и в относительных единицах. В последнем случае погрешность обычно относят к разности предельных значений выходной величины и выражают в процентах (класс точности).

Дополнительные погрешности датчика – это погрешности, вызываемые изменениями внешних условий по сравнению с нормальными условиями. Выражаются обычно в процентах, отнесенных к изменению вызвавшего их фактора (например, температурная погрешность – 1,5 % на 10 0С).

Максимальная мощность входных и выходных сигналов, потребляемая мощность и КПД.

В заключение отметим, что к современным датчикам предъявляются также такие требования как высокая динамическая точность, минимальное искажение формируемого сигнала, высокая статическая точность, высокая надежность, допустимые габариты и масса, высокая чувствительность, высокая мощность выходного сигнала и др.

### 3.5 Схемы включения датчиков

Рассмотрим простейшие структурные схемы датчиков. В наиболее общих случаях структурная схема датчика включает в себя один или два, реже – несколько элементарных преобразователей. В простейшем случае датчик может состоять только из одного преобразователя (рисунок 3.1), осуществляющего преобразование измеряемой неэлектрической величины  $X$  в электрическую величину  $U$ .

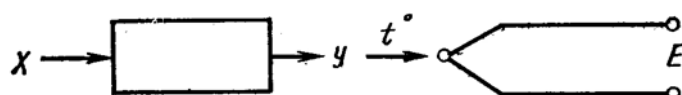


Рисунок 3.1 – Структурная однозвенная простейшая схема и пример датчика (термопары), состоящего только из одного преобразователя

На рисунке также в качестве примера показана схема простейшего датчика температуры – термопары, когда входная неэлектрическая величина температура  $t^\circ$  преобразуется в пропорциональное постоянное напряжение  $E$ .

На рисунке 3.2 представлена структурная схема датчика, состоящая из чувствительного элемента 1, воспринимающего энергию  $X$  измеряемого параметра и преобразующего ее в промежуточную неэлектрическую величину  $X_1$ , и выходного преобразователя 2, предназначенного для преобразования промежуточной неэлектрической (обычно механической) величины  $X_1$  в электрический сигнал  $U$ .

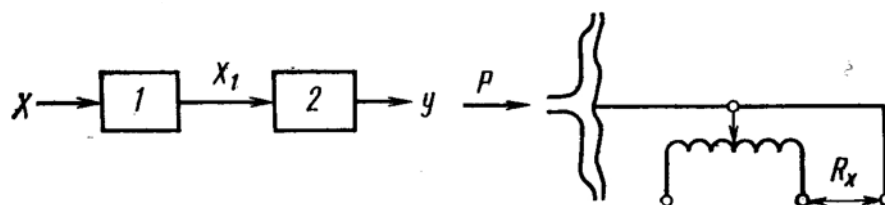


Рисунок 3.2 – Структурная схема и пример датчика (потенциометрический датчик давления), состоящего из чувствительного элемента 1 и выходного преобразователя 2

На этом же рисунке в качестве примера показана схема датчика давления, в котором измеряемое давление  $P$  воздействуя на чувствительный элемент –

мембрану, приводит к ее механическому перемещению, что в свою очередь перемещает связанный с ней движок реостата, пропорционально изменяя его сопротивление  $R_x$

На рисунке 3.3, показана структура каскадного соединения преобразователей. Между чувствительным элементом 1 и окончательным преобразователем 2 располагается передаточный механизм или несколько промежуточных преобразователей 3.

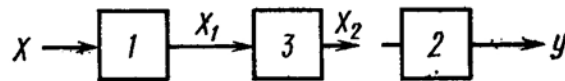


Рисунок 3.3 – Схема каскадного соединения

В индуктивных датчиках давления часто используется дифференциальная схема, пример которой показан (рисунок 3.4). Схема включает два чувствительных элемента 1, преобразователь 4 – вычитающий элемент и окончательный преобразователь 2.

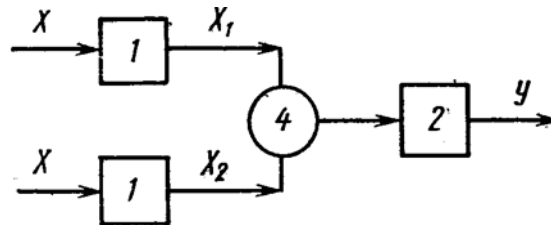


Рисунок 3.4 – Дифференциальная схема

В трансформаторных датчиках линейных перемещений может использоваться компенсационная схема (рисунок 3.5). Здесь дополнительно в цепь обратной связи включены усилитель 5 и генератор компенсирующей величины 6.

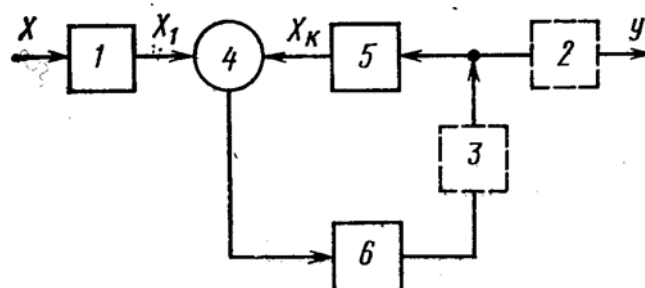


Рисунок 3.5 – Компенсационная схема

В самом общем виде подавляющее большинство датчиков неэлектрических параметров можно представить обобщенной структурной схемой, представленной на рисунке 3.6.

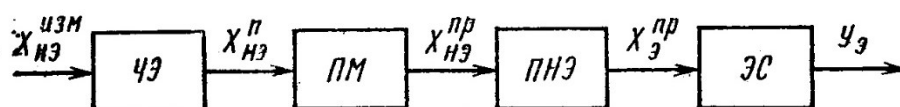


Рисунок 3.6 – Обобщенная структурная схема датчика неэлектрической величины

Согласно схеме, датчик состоит из первичного преобразователя – чувствительного элемента ЧЭ, на вход которого поступает неэлектрическая измеряемая величина  $X_{нэ}$ . С его выхода пропорциональная неэлектрическая величина  $X_{нэ}$  подается на промежуточный преобразователь – передаточный механизм ПМ. С выхода ПМ преобразованная неэлектрическая величина  $X_{нэ}$  поступает на промежуточный преобразователь неэлектрической величины ПНЭ, с выхода которого снимается пропорциональный электрический сигнал  $X_{э}$ . Этот сигнал поступает на электрический преобразователь ЭС, представляющий из себя электрическую схему. С выхода ЭС снимается выходной электрический сигнал  $U_{э}$ , пропорциональный входной измеряемой неэлектрической величине  $X_{нэ}$ .

Используя понятие преобразователей структуру средства измерения любого вида, можно представить в виде совокупности измерительных преобразователей, осуществляющих функциональные измерительные преобразования сигналов различной физической природы (рисунок 3.7).

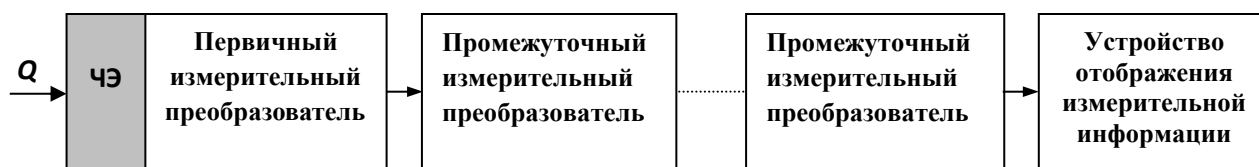


Рисунок 3.7 – Структура средства измерения

## **4 ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

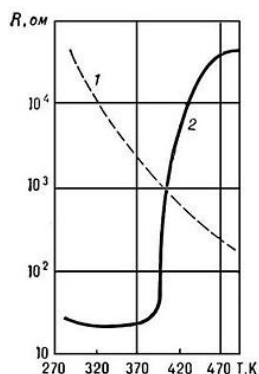
### **4.1 Термоэлектрические преобразователи**

Термоэлектрические преобразователи (термодатчики) нашли самое широкое применение практически во всех информационно – измерительных системах, как в виде отдельных датчиков, так и в составе различных преобразователей. Их принцип действия основан на использовании тепловых процессов (нагрева, охлаждения, теплообмена). Входной величиной термоэлектрических преобразователей является температура.

#### **4.1.1 Резистивные датчики температуры**

Резистивные датчики температуры (RTD – Resistance Temperature Detector) – это датчики, в состав которых входит резистор, значение сопротивления которого изменяется при изменении его температуры. Они относятся к датчикам параметрического типа и являются одними из наиболее стабильных и точных температурных датчиков, работающих в температурном диапазоне от минус 270°С до плюс 850°С и используются там, где требуется хорошая повторяемость результатов измерений при их высокой точности. Принцип работы RTD основан на свойстве материала, из которого он изготовлен, к изменению своего электрического сопротивления при изменении температуры.

По типу зависимости сопротивления от температуры различают терморезисторы с отрицательным и положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Первые обозначаются NTC («Negative Temperature Coefficient»). Их иногда называют термисторами. С ростом температуры сопротивление термисторов уменьшается. Вторые обозначаются PTC («Positive Temperature Coefficient») и называются позисторами. С ростом температуры их сопротивление увеличивается. На рисунке 4.1 показаны графики зависимости сопротивлений термисторов и позисторов от температуры.



1 – для термистора, 2 – для позистора

Рисунок 4.1 – Зависимость сопротивлений термисторов от температуры

На электрических схемах терморезисторы обозначаются следующим образом (рисунок 4.2).

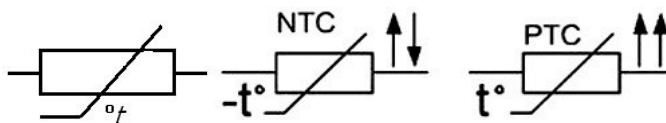


Рисунок 4.2 – Обозначение терморезисторов на электрических схемах

Основные параметры термоэлектрических преобразователей.

Температурный коэффициент сопротивления, который равен изменению сопротивления участка цепи при изменении температуры на 1 градус.

Номинальное сопротивление – это величина сопротивления при 0 градусах.

Диапазон применения. Терморезисторы делят на низкотемпературные (менее 170К), среднетемпературные (от 170 до 510 К), высокотемпературные (более 570К).

Мощность рассеяния. Это величина мощности, в пределах которой терморезистор во время работы обеспечивает сохранение заданных параметров по техническим условиям.

По конструктивному исполнению бывают металлические терморезисторы (их часто называют болометрами) и полупроводниковые (термисторы).

Металлические терморезисторы обычно изготавливаются из меди или платины. Платиновые используют при температурах от минус 260 °С до плюс 1100 °С, а медные – при температурах не более плюс 180 °С.

В металлических терморезисторах сопротивление  $R$  отрезка провода прямо пропорционально его длине  $L$  и обратно пропорционально площади поперечного сечения  $S$ :

$$R = \rho L / S,$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала.

Каждый металл имеет определенное удельное сопротивление, которое может быть определено экспериментально. Сопротивление металла растет с увеличением температуры. Теоретически, любой металл может быть использован в качестве датчика температуры, однако идеальный металл должен иметь специфические характеристики: высокую точку плавления, устойчивость к коррозии, иметь линейную характеристику  $R=F(t)$ , быть долговечным. Наилучшим металлом, удовлетворяющим этим свойствам, является платина. Материал хрупок, но высокоустойчив к загрязнению и обладает только слегка нелинейной характеристикой  $R=F(t)$ . Кроме того, платина обладает химической стабильностью, возможностью получения в химически чистой форме, ее электрические свойства имеют высокую повторяемость.

Американский стандарт IEC/DIN – предполагает использование в качестве материала датчика сплав платины с другими металлами платиновой группы, а Европейский стандарт IEC/DIN – предполагает использования металла со степенью чистоты не менее 99,99%.

Металлические терморезисторы широко используются в резистивных датчиках. Их изготавливают двух видов: проволочные и тонкопленочные. Проволочные датчики наматывают очень тонким платиновым проводом на катушку до получения сопротивления равным 100 Ом. Тонкопленочные изготавливаются методом осаждения тонкого слоя платины или ее сплавов на керамическое основание и со следующей подгонкой сопротивления резистора к требуемому значению. Для работы RTD необходим внешний источник питания. К достоинствам RTD можно отнести высокую стабильность и линейность характеристик, высокую точность и надежность. Недостатками являются высокая стоимость, необходимость источника питания, низкий температурный



коэффициент сопротивления (при изменении температуры на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  сопротивление RTD может измениться на  $0,1\text{ }\Omega$ ), саморазогрев (может привести к погрешности измерения низких температур), появление дополнительной погрешности за счет подводящих проводов.

На рисунке 4.3 в качестве примера показана мостовая схема подключения датчика.

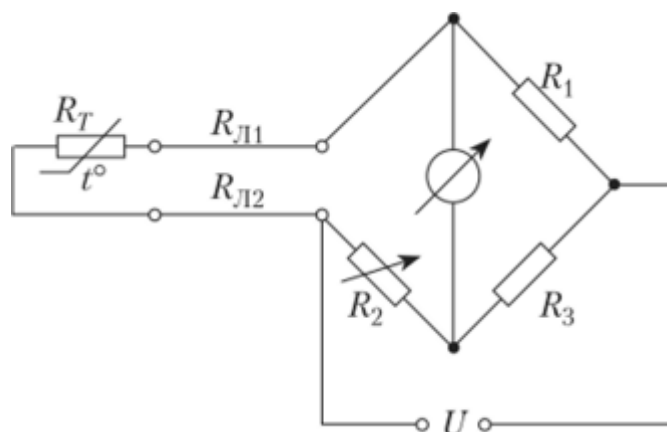


Рисунок 4.3 – Мостовая схема подключения резистивного датчика температуры

На рисунке обозначено:  $R_T$  – резистивный датчик температуры;  $R_1, R_2, R_3$  – сопротивления плеч моста ( $R_2$  – подстроечный резистор);  $R_{Л1}, R_{Л2}$  – сопротивления соединительных проводов;  $U$  – источник внешнего питания, подключенный в одну из диагоналей моста. Ко второй диагонали моста подключен измерительный прибор (например, вольтметр). Датчик  $R_T$  помещен в среду, температура которой измеряется. При выполнении условия баланса  $(R_T + R_{Л1}) R_3 = (R_2 + R_{Л2}) R_1$  мост будет уравновешен и вольтметр будет показывать ноль. При изменении температуры датчика его сопротивление меняется, что приводит к нарушению баланса моста и появлению напряжения во второй его диагонали. Это напряжение, пропорциональное изменению сопротивления датчика, измеряется вольтметром. Резистор  $R_2$  служит для установки начального баланса моста перед измерением. Как видно из схемы на результат измерения оказывают влияние сопротивления соединительных проводов  $R_{Л1}$  и  $R_{Л2}$ . Это влияние тем ощутимей, чем они длиннее. Поэтому в мостовых схемах дополнительно применяют специальные приемы, позволяющие компенсировать

влияние соединительных проводов, например, подключение моста по трехпроводной схеме.

Конструктивно резистивные датчики температуры выполняются в виде самостоятельных элементов, в жестком корпусе, позволяющем удобное крепление и применение (рисунок 4.4).

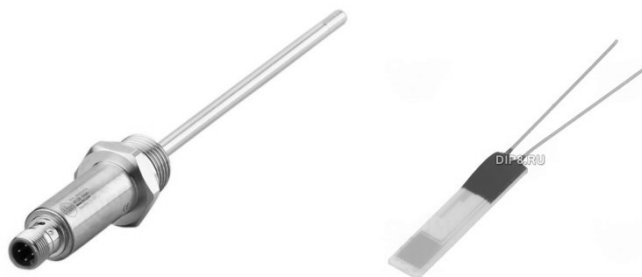


Рисунок 4.4 – Резистивные датчики температуры

В заключение отметим, что платиновые датчики используют при температурах от минус 260 °С до плюс 1100 °С. Однако они более дорогие и обладают менее линейными зависимостями сопротивления от температуры. Медные используют при температурах не более плюс 180 °С, но они дешевле и у них линейность характеристик намного выше, чем у платиновых. Недостаток медных терморезисторов – малое удельное сопротивление, неустойчивость к повышенным температурам, быстрая окисляемость.

Полупроводниковые терморезисторы изготавливают из полупроводников (оксидов кобальта и марганца, оксидов меди и марганца и др.). По сравнению с металлическими терморезисторами они обладают более высокими чувствительностью и ТКС. При небольших размерах сопротивление полупроводниковых терморезисторов доходит до 1 Мом, что позволяет не учитывать при измерениях сопротивление соединительных проводников. Также достоинствами термисторов являются хорошая линейность зависимости их сопротивления от температуры (в интервале температур от минус 100 °С до плюс 200 °С), высокая надежность, стабильность характеристик в течение длительного времени. К недостаткам можно отнести невозможность обеспечить необходимую точность их характеристик при массовом изготовлении, что

создает необходимость дополнительной настройки аппаратуры при замене терморезистора.

Конструктивно выполнение полупроводниковых терморезисторов самое разнообразное: бусинки, цилиндрики, таблетки и т.п. (рисунок 4.5)

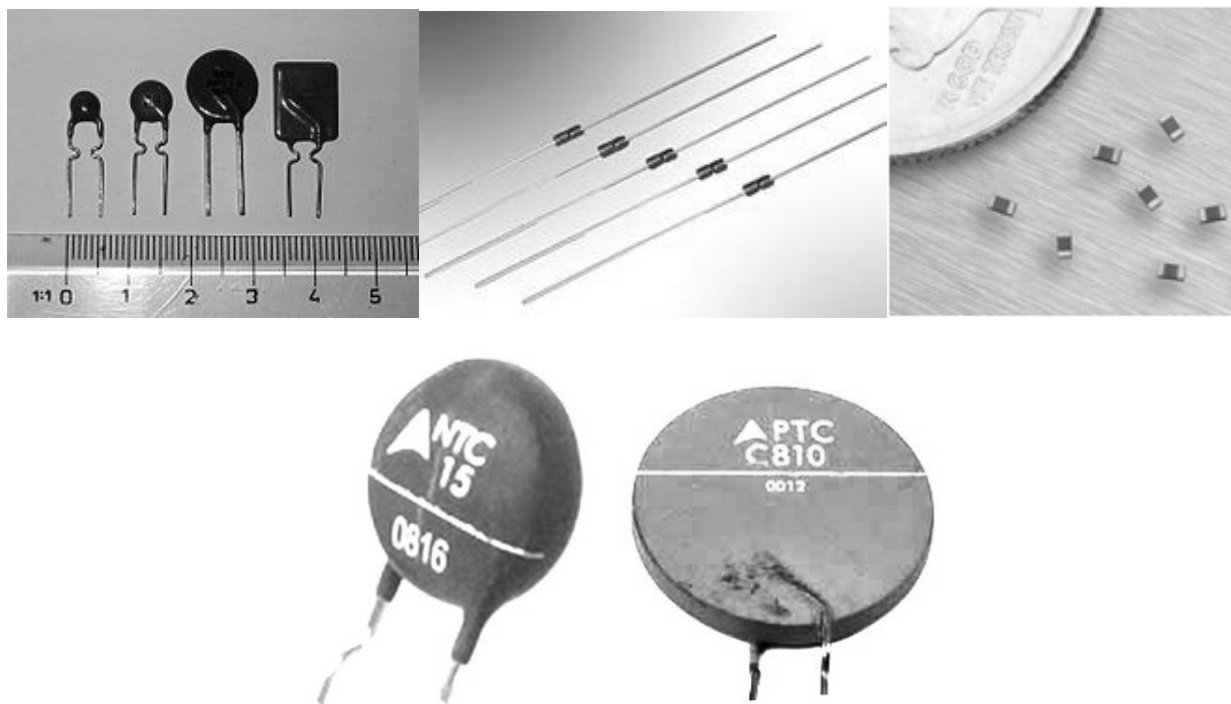


Рисунок 4.5 – Полупроводниковые терморезисторы

#### 4.1.2 Термопары

Термопары относятся к термопреобразователям генераторного типа. В них происходит преобразование тепловой энергии в электрическую. Термопара представляет из себя устройство в виде пары проводников из различных металлов, соединенных на одном конце и формирующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект, открытым немецким физиком Томасом Зеебеком (Tomas Seebeck) в 1821 г. Схема термопары представлена на рисунке 4.6. Два разнородных металла 3 и 4 соединены между собой рабочим (горячим) спаем  $T_1$ . Другие же два конца проводов остаются свободными и подключаются к измерительной цепи дополнительными (холодными) спаями  $T_2$ .

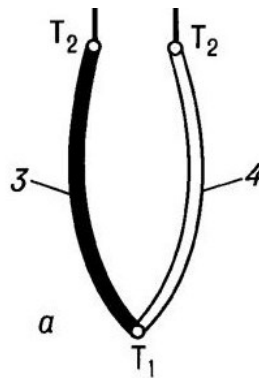


Рисунок 4.6 – Схема термопары

Если между рабочим и дополнительными спаями двух разнородных металлов, образующих замкнутую электрическую цепь, существует разность температур  $T_1$  и  $T_2$ , то в цепи образуется термоэлектродвижущая сила (термоЭДС)  $U_{\text{термо}}$  (рисунок 4.7), пропорциональная этой разности температур. Присоединив термопару к измерительной цепи, получим датчик температуры.

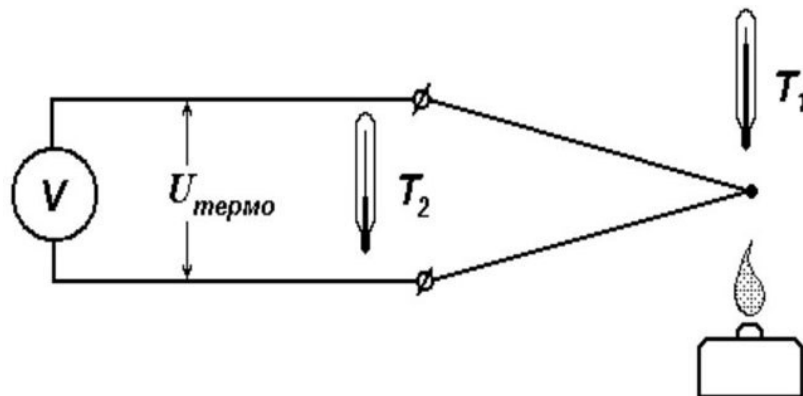


Рисунок 4.7 – Возникновение термоЭДС

Типы термопар зависят применяемых металлов. Например, ТХА – хром – алюмель, применяется в диапазоне температур от минус 200 °С до плюс 1300 °С. Термопара ТХК (хром – копель) используется от минус 253 °С до плюс 800 °С, ТЖК (железо – константан) – от минус 203 °С до плюс 750 °С, ТВР (вольфрам – рений) – от 1800 °С до 3000 °С, ТПП (платинородий – платина) – до плюс 1400 °С.

Точность датчика зависит от вида термопары, диапазона измеряемых температур, чистоты материала, электрических шумов, коррозии, свойств спая и процесса изготовления. Термопарам присваивается класс допуска (стандартный

или специальный), устанавливающий доверительный интервал измерений. Достоинствами термодатчиков с использованием термопар являются большой температурный диапазон измерений, высокая точность, простота и надежность. К основным недостаткам можно отнести необходимость постоянного контроля состояния и температуры холодного спая, структурные изменения металлов при изготовлении прибора, зависимость состояния спаев от состава атмосферы, зависимость погрешности измерений из – за воздействия электромагнитных волн.

Термопары чаще всего используют в качестве датчиков температуры для точных измерений в пределах довольно широких температурных диапазонов.

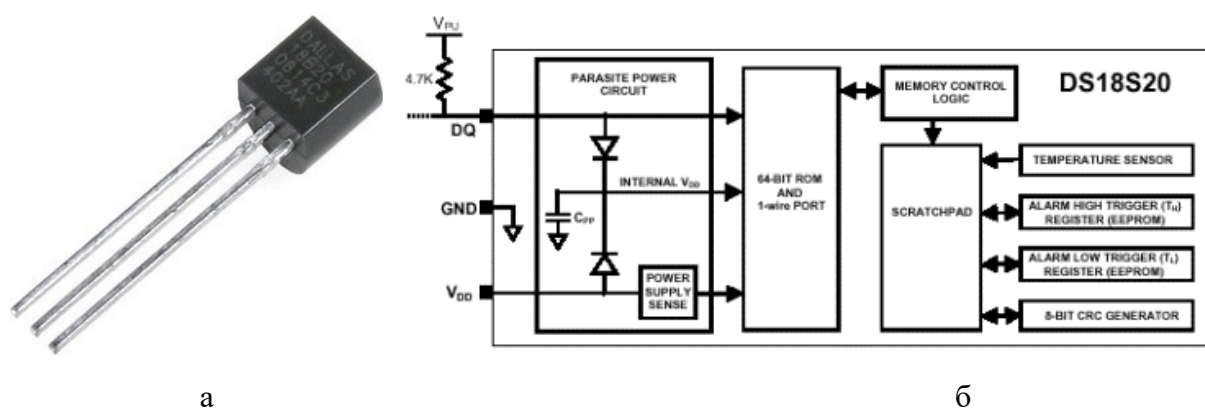
### **4.1.3 Интегральные датчики температуры**

Наиболее современным способом измерения температуры в информационно – измерительных системах является применение интегральных диодных датчиков температуры IC (Integrated Circuit temperature sensors). Интегральные датчики на базе диодов обладают преимуществами перед термопарами и платиновыми резистивными преобразователями благодаря своей компактности и возможности встраиваемости прямо в микросхемы. К тому же они недороги в производстве. Однако интегральные датчики температуры способны работать при сравнительно низких температурах – не более 150 °С.

Принцип работы датчиков основан на зависимости вольт – амперной характеристики полупроводникового диода от температуры. Датчики используются в регуляторах, усилителях, микроконтроллерах, процессорах, системах измерения температуры измерительных модулей, в ИИС для дистанционного мониторинга температуры и прочих электронных устройствах, где требуется точный оперативный мониторинг температуры.

По конструкции интегральные датчики подразделяются на аналоговые и цифровые. Аналоговые выдают пропорциональные температуре аналоговые сигналы тока или напряжения в диапазоне напряжений от 4 до 30 В. При необходимости выходной аналоговый сигнал может быть легко преобразован в

цифровой при помощи АЦП. Цифровые датчики имеют внутри себя АЦП, что позволяет получать на его выходе цифровой сигнал, что удобно для передачи на внешний микроконтроллер. В качестве примера на рисунке 4.8 показан внешний вид цифрового интегрального датчика температуры DALLAS DS18B20 с интерфейсом 1 – Wire и его блок-схема. Датчик может работать в диапазоне измерений от минус 55 °С до плюс 125°С и точностью 0.5°С в диапазоне от минус 10°С до плюс 85°С и предназначен для контроля и регулировки степени нагретости какого-либо материала, вещества и т.п. в технологическом процессе, обеспечивая тем самым его безопасность. Датчик способен работать без внешнего питания.



а – внешний вид; б – блок-схема

Рисунок 4.8 – Интегральный датчик DS18B20.

В интегральных термодатчиках также возможна реализация и опциональных функций, например, мониторинг изменения напряжения, измерение температуры удаленного объекта, сигнализация о превышении заданной температуры и т.п.

## 4.2 Оптические преобразователи

### 4.2.1 Общие сведения об оптических преобразователях

Оптический датчик – это устройство, предназначенное для определения оптического излучения контролируемого объекта посредством преобразования изменений электромагнитных волн в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации. В этих датчиках

световое излучение различных диапазонов обычно преобразуется в электрический сигнал. В английской терминологии оптические датчики часто называют PhotoCell Sensor или Light Sensor, что означает фотодатчик, или световой датчик. В оптических датчиках электроны, испускаемые из его приемного вещества, называются фотоэлектронами, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется фототоком. Характеристики оптического излучения во взаимодействии с веществом рассматриваются фотометрией – разделом физической оптики и метрологии.

В оптических датчиках используются два вида фотоэффекта: внешний и внутренний. Внешний фотоэффект, называемый фотоэлектронной эмиссией, связан с испусканием электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Датчики, использующие внешний фотоэффект, называются фотоэлементами. Внутренний фотоэффект связан с возникновением свободных носителей заряда (электронов и дырок) в твердом теле при поглощении в нем квантов электромагнитного излучения. Он проявляется в изменении фотопроводимости и появлению фотогальванического эффекта.

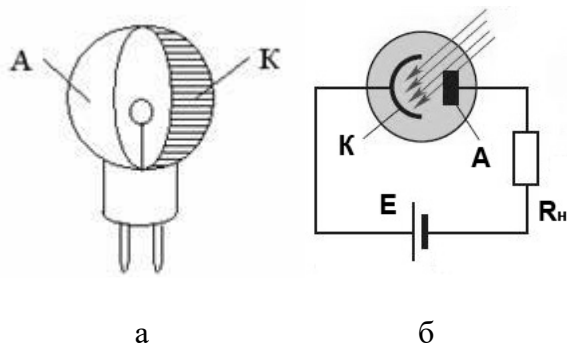
Фотопроводимостью называется изменение электрической проводимости среды под действием электромагнитного излучения. Датчики с изменяемой проводимостью под действием электромагнитного излучения называют фоторезистивными или фоторезисторами (фотосопротивлениями). Фотогальванический эффект связан с возникновением электрического тока при действии электромагнитного излучения на полупроводник или диэлектрик, включенный в замкнутую цепь, или возникновение ЭДС в образце при разомкнутой цепи. Датчики, основанные на фотогальваническом эффекте, называются фотодиодами. Рассмотрим принципы действия некоторых датчиков.

#### **4.2.2 Фотоэлементы**

Фотоэлементы относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости фотоэлектронной эмиссии чувствительного

элемента от электромагнитного излучения объекта. Фотоэлементы служат преобразователями оптического излучения в электрические сигналы. Различают электровакуумные и полупроводниковые фотоэлементы.

Электровакуумный элемент конструктивно представляет из себя вакуумированную или газонаполненную стеклянную колбу со встроенными анодом А и фотокатодом К (рисунок 4.9, а). Его действие основано на фотоэлектронной эмиссии (внешний фотоэффект).



а – конструкция, б – схема включения

Рисунок 4.9 – Электровакуумные фотоэлементы.

Катод в виде тонкого светочувствительного слоя нанесен на внутреннюю поверхность баллона. Анод изготовлен в виде кольца, расположенного в центре баллона. Выводы от катода и анода сделаны через ножку на нижний цоколь. Под действием светового потока из фотокатода К вылетают электроны. Они попадают на анод А и создают в цепи фототок. Фототок пропорционален интенсивности светового потока. Схема включения электровакуумного элемента показана на рисунке 4.9, б. При изменении светового потока изменяется фототок, а следовательно, и падение напряжения на резисторе нагрузки  $R_{н}$ . Таким образом, с помощью фотоэлемента световой поток осуществляет управление выходным напряжением источника Е.

Принцип действия полупроводниковых фотоэлементов связан с внутренним фотоэффектом и основан на работе выпрямляющего электрического  $n$ - $p$ -перехода в фотогальваническом режиме. Под действием на  $n$ - $p$ -переход оптического излучения возникает фотоЭДС и при подключении фотоэлемента к



внешней электрической цепи через сопротивление нагрузки  $R_n$  протекает электрический ток, пропорциональный световому потоку (Рисунок 4.10).

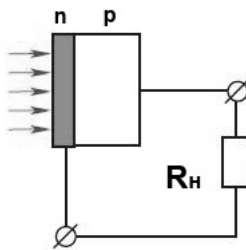


Рисунок 4.10 – Принцип действия полупроводниковых фотоэлементов

Для изготовления полупроводниковых фотоэлементов используют германий (чистый или легированный примесями золота, меди или цинка), кремний и др. Полупроводниковые фотоэлементы используют также для прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию – в солнечных батареях (напр., на космических станциях), в фотоэлектрических генераторах.

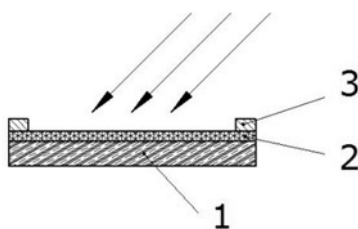
Основными параметрами фотоэлементов являются световая и спектральная чувствительности. Световая чувствительность ( $S$ ) – отношение фототока к вызывающему его световому потоку. Для определения  $S$  используют, как правило, калиброванные источники света (например, лампу накаливания с воспроизводимым значением цветовой температуры нити, обычно равным 2860 К). Спектральная чувствительность ( $SL$ ) – отношение фототока к вызывающему его лучистому потоку с длиной волны  $L$ . У кремниевых фотоэлементов диапазон спектральной чувствительности находится в области спектра от 400 до 1100 нм, у германиевых – от 500 до 2000 нм. Так, фотоЭДС кремниевого фотоэлемента, освещаемого лампой накаливания в расчёте на 1 см<sup>2</sup> освещаемой поверхности, может достигать десятых долей вольта.

### 4.2.3 Фоторезисторы

Фоторезистор (фотосопротивление) – полупроводниковый прибор, который изменяет свою электрическую проводимость в зависимости от

интенсивности и спектрального состава падающих на него лучей. Их относят к датчикам параметрического типа.

Принцип работы полупроводникового фоторезистора основан на уменьшении его сопротивления при поглощении лучистой энергии. Лучистая энергия вызывает ионизацию атомов и увеличение числа свободных носителей заряда – электронов и дырок, что вызывает уменьшение сопротивления фоторезистора. Конструктивно фоторезистор представляет собой стеклянную пластинку 1, на которую путем испарения в вакууме нанесен тонкий слой полупроводника 2, а по краям расположены два металлических электрода 3 (рисунок 4.11). Полупроводниковый слой покрывается прозрачным лаком для защиты от влаги.



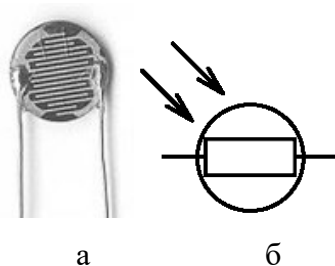
1 – стеклянная пластинка; 2 – полупроводник; 3 – электрод

Рисунок 4.11 – Конструкция фоторезистора

Основными достоинствами фоторезисторов являются их высокая чувствительность к излучению в широком диапазоне излучения (от инфракрасной до рентгеновской области спектра), способность значительно изменять свое сопротивление (на несколько порядков), высокая стабильность параметров во времени, небольшие габариты. Кроме того, фоторезисторы выпускаются на различные номиналы сопротивлений. К недостаткам можно отнести ухудшение линейности характеристик при большей освещённости, зависимость сопротивления от температуры, низкая скорость реакции на импульс (не более 1 кГц).

Тем не менее фоторезисторы нашли широкое применение в системах автоматики для контроля с любым видом передаваемой информации: сигнализации, измерения и регистрации. Наибольшее распространение

получили фоторезисторы, изготовленные из сернистого свинца, сернистого кадмия, селенистого кадмия. Внешний вид фоторезисторов, выпускаемых промышленно, а также его схематичное изображение представлены на рисунке 4.12.



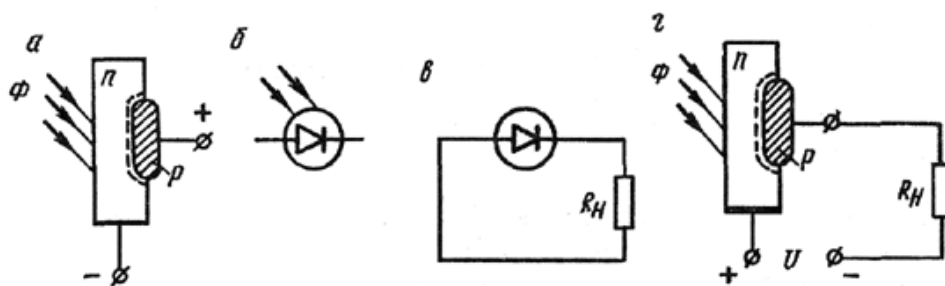
а – внешний вид, б – обозначение на схемах

Рисунок 4.12 – Фоторезисторы

#### 4.2.4 Фотодиоды

Фотодиод – полупроводниковый диод, в котором используется зависимость фототока от его освещенности. Фотодиод имеет два электрода, разделенные р-п-переходом. В основе принципа действия фотодиодов лежит использование односторонней проводимости р-п-перехода, при освещении которого появляется ЭДС. При этом фотодиод может работать в двух режимах. В генераторном режиме (рисунок 4.13, а) при освещении фотодиода квантами излучения  $\Phi$  между электродами «+ и -» устанавливается некоторая разность потенциалов, представляющая собой фотоЭДС (может достигать до 1 В). При подсоединении сопротивления нагрузки  $R_n$  к электродам в цепи пойдет ток, пропорциональный интенсивности излучения (рисунок 4.13, в). На рисунке 4.13, б показано схематическое обозначение фотодиодов.

В фотопреобразовательном режиме (рисунок 4.13, г) напряжение источника приложено в обратном направлении. При отсутствии освещения через фотодиод происходит темновой ток. При освещении появляется световой ток.



а – Устройство фотодиода, б – Схематическое обозначение, в – Схема включения при генераторном режиме, г – Включение при фотопреобразовательном режиме

Рисунок 4.13 – Фотодиоды

Фотодиод, работающий в режиме фотопреобразования, подобен фоторезистору, обладающему большей интегральной чувствительностью. У кремниевых диодов типа ФД-К1 она имеет значение от 4 до 5 мА/лм, а у германиевых – от 20 до 25 мА/лм.

Конструктивно фотодиод представляет собой обычный диод в корпусе, в котором имеется окошко, позволяющее свету попадать в полупроводниковое соединение (рисунок 4.14).



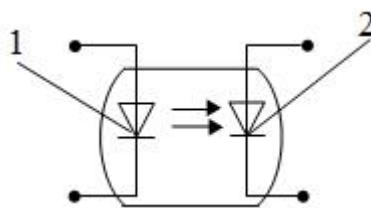
Рисунок 4.14 – Конструкция фотодиода

Если в фотодиодах использовать обратимый электрический пробой, сопровождающийся лавинным умножением носителей заряда, как в полупроводниковых стабилитронах, то фототок, а следовательно, и чувствительность значительно возрастут. На этом эффекте строят лавинные фотодиоды. Чувствительность лавинных фотодиодов может быть на несколько порядков больше, чем у обычных фотодиодов (например, у германиевых – в 200-300 раз больше, у кремниевых – в 100 раз больше). Лавинные фотодиоды являются быстродействующими фотоэлектрическими приборами, их частотный диапазон может достигать 10 ГГц. Недостатком лавинных фотодиодов является более высокий уровень шумов по сравнению с обычными фотодиодами.

Кроме фотодиодов промышленностью производятся и широко применяются другие типы фотоприборов, например, фототранзисторы и фототиристоры, в которых используется внутренний фотоэффект.

#### 4.2.5 Оптроны

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода (рисунок 4.15). Такие пары «светодиод – фотодиод» называются оптопарами или оптронами.



1 – светодиод, 2 – фотодиод

Рисунок 4.15 – Оptron

Оптроны предназначены для преобразования электрических сигналов в световые, их дальнейшей передачи через оптические каналы и повторного преобразования сигнала вновь в электрический. Входные и выходные цепи в таких приборах оказываются электрически никак не связанными (гальванически развязанными), поскольку передача сигнала осуществляется через оптическое излучение. Оптроны классифицируют по следующим основным признакам.

В зависимости от степени интеграции различают элементарный оптрон, включающий в себя 2 и более элемента объединённых общим корпусом, и оптронную интегральную схему. Ее конструкция состоит из одной и более оптопар и, помимо этого, еще может быть оснащена дополняющими элементами (например, усилителем).

В зависимости от разновидности оптического канала различают оптроны с каналом открытого типа и каналом закрытого типа. Оптроны с открытым оптическим каналом можно рассматривать как оптопары, у которых световой

поток между излучателем и приёмником проходит вне корпуса. При этом у пользователя появляется возможность перекрывать световой поток непрозрачной заслонкой, что дает возможность видеть на выходе фотоприемника перепад уровней. По такому принципу работают, например, механические компьютерные мыши. Используя подобные оптроны делают датчики перекрытия светового потока (излучатель напротив приемника) и датчики отражения светового луча (излучатель и приемник находятся в одной плоскости). Внутри датчиков с открытым оптическим каналом могут находиться интегральные усилители и сложные транзисторные формирователи. Например, широко используются щелевые оптопары фирмы Vishay. Их типовые параметры, следующие: устойчивое перекрытие светового потока (на расстоянии от 2 до 5 мм), время включения (от 1 до 20 мкс), время выключения (от 3 до 30 мкс), наличие транзисторного ключа на выходе и др.

На рисунке 4.16 в качестве примера показана схемы подключения датчика с оптроном с открытым оптическим каналом к микроконтроллеру.

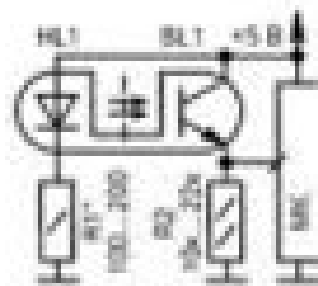


Рисунок 4.16 – Схема подключения оптрона с открытым каналом

В зависимости от типа фотоприёмника различают фоторезисторные (или просто резисторные), фотодиодные, фототранзисторные, фототиристорные, фотосимисторные и другие оптопары. Также бывают оптопары, функционирующие с помощью фотогальванического генератора. Отдельно различают солнечные батареи.

Оптроны нашли самое широкое применение как в датчиках, так и в составе измерительных систем. Ниже приведены наиболее частые области их использования:

1. Фиксация механического воздействия. При этом применяются устройства, оснащённые оптическим каналом открытого типа, который можно перекрыть, например, оказать механическое воздействие. Само устройство можно использовать как сенсор.

2. Детекторы наличия, когда необходимо выявить, например, наличие либо отсутствие бумажных листов в принтере.

3. Детекторы конечной либо начальной точки, счётчики, дискретные спидометры.

4. Гальваническая изоляция, использование оптронов при которой позволяет передавать сигнал, не связанный с электрическим напряжением.

Конструктивно оптроны выполняются в виде элементов, показанных на рисунке 4.17.

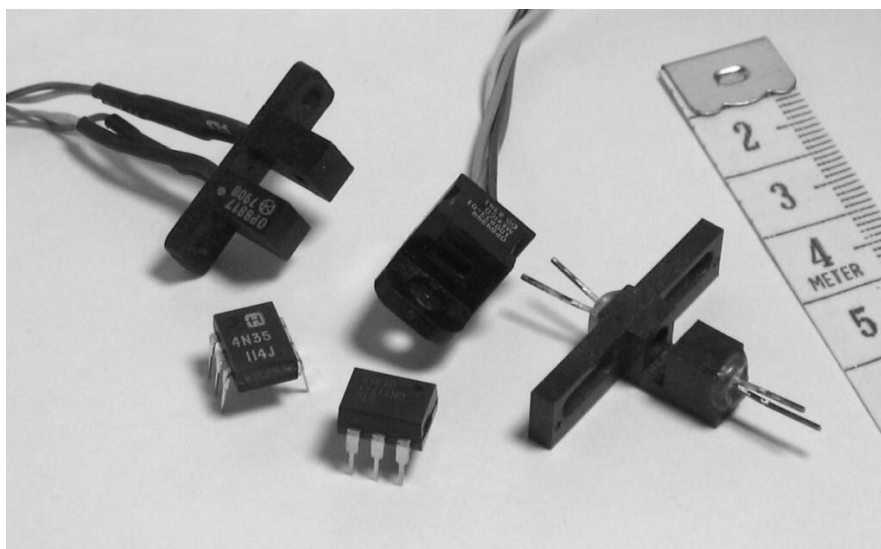


Рисунок 4.17 – Конструкции оптронов

#### 4.2.6 Оптоволоконные датчики

Оптическое волокно – нить из оптически прозрачного материала (стекло, пластик), используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения. Оптическое волокно имеет круглое сечение и состоит из двух частей – сердцевины и оболочки. Для обеспечения полного внутреннего отражения абсолютный показатель преломления сердцевины несколько выше показателя преломления оболочки. Луч света, направленный в сердцевину, будет

распространяться по ней, испытывая многократные переотражения от границы раздела «сердцевина – оболочка».

Кабели на базе оптических волокон используются в волоконно-оптической связи, позволяющей передавать информацию на большие расстояния с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи. Все оптические волокна, используемые в телекоммуникациях, имеют диаметр  $125 \pm 1$  микрон. Диаметр сердцевины может отличаться в зависимости от типа волокна и национальных стандартов.

Волоконно-оптические датчики строят, используя следующие свойства оптического волокна.

Изменение характеристик волокна при механическом воздействии. На рисунке 4.18, а показана схема применения оптоволоконна в этом случае.

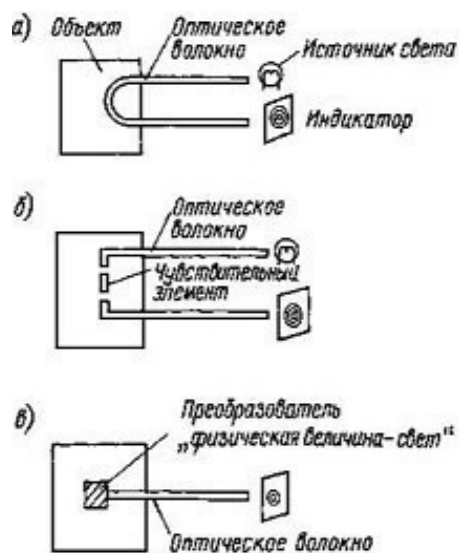


Рисунок 4.18 – Схемы применения оптоволоконна

Оптоволоконно частично встроено в объект измерения. Источник света направлен в один конец волокна, а индикатор света находится на его другом конце. При механическом воздействии на объект измерения последний деформируется, что приводит к деформации встроеной части оптоволоконна, что, в свою очередь приводит к изменению интенсивности проходящего света. Это изменение фиксируется индикатором.

Следующая возможность применения оптоволоконна показана на рисунке 4.18, б. Оптоволоконно также встроено в объект измерения. В его разрыв



вставлен чувствительный элемент. Деформация объекта приводит к изменению параметров передаваемого света, что регистрируется чувствительным элементом, что, в свою очередь наблюдается на индикаторе.

На рисунке 4.18, в – показано применение оптоволокна при преобразовании «физическая величина свет». Чувствительным элементом может быть как сам измеряемый объект, так и специальный элемент, прикрепляемый к нему. При том исходя из принципа кодирования измеряемой информации, можно условно разделить на группы:

- фазовые – датчики, в которых используется высоко когерентный источник излучения и производится измерение фазы световой волны, изменяющейся под влиянием внешнего параметра;

- со спектральным кодированием – датчики, где используется источник излучения с широким спектром с возможностью анализа всего спектра;

- амплитудные – датчики, в которых измеряемый параметр модулирует интенсивность проходящей или отраженной световой волны;

- туннельные – датчики, где используется эффект туннелирования излучения через малый зазор;

- поляризационные – датчики, использующие информацию о поляризации световой волны.

В заключение отметим, что на базе оптических элементов разработаны различные оптические измерительные приборы. Вот некоторые из них:

1. Фотометры – приборы для измерения световых потоков и величин (освещенности, яркости, светимости и силы света).

2. Спектральные измерительные приборы. Для них общим является разложение электромагнитного излучения в спектр по длинам волн (спектроскопы, монохроматоры, полихроматоры, спектрографы, спектрофотометры и квантометры).

3. Интерферометры – приборы, в которых основной измеряемой характеристикой является фаза электромагнитного колебания.

4. Поляриметры – приборы для измерения параметров поляризации, т.е. определения ориентации колебаний электромагнитной волны относительно направления распространения.

5. Рефрактометры – приборы для измерения показателя преломления твердых тел, жидкостей и газов.

6. Гониометры – приборы для угловых измерений. Представляют собой зрительные трубы или лазеры, оптическая ось которых снабжена отсчетным угловым лимбом.

7. Измерительные микроскопы – приборы для увеличения видимых размеров (или углов наблюдения) различных объектов и измерения размеров увеличенных деталей.

8. Пирометры – приборы для измерения собственного теплового излучения тел (от слова «пиро» – огонь).

### **4.3 Датчики магнитного поля**

Магнитное поле – силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом. Источниками магнитного поля могут быть электрическое поле, меняющееся во времени, либо подвижные заряды, либо постоянные магниты и др. Датчик магнитного поля – это устройство, предназначенное для определения параметров контролируемого объекта посредством преобразования воздействия магнитного поля контролируемого объекта в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации. Принцип работы магниточувствительных преобразователей основан на изменении характеристик его чувствительного элемента при изменении внешнего магнитного поля. Магниточувствительные датчики разделяются на две группы: датчики на основе герметичного механического контакта (геркона) и датчики на основе электронных компонентов. Рассмотрим некоторые из них.

### 4.3.1 Герконы

Герконовые магниточувствительные датчики имеют в своем составе магнитоуправляемый герметический контакт, который изменяет состояние контактов при воздействии управляющего магнитного поля. Приближение магнитного поля (например, постоянного магнита на поршне цилиндра) к геркону приводит к замыканию его контактов и к изменению электрического сигнала. Возможны два способа применения геркона. Первый (рисунок 4.19) заключается в том, что при уменьшении расстояния между магнитом и датчиком, увеличивается напряженность поля в зоне чувствительности датчика и происходит срабатывание геркона.

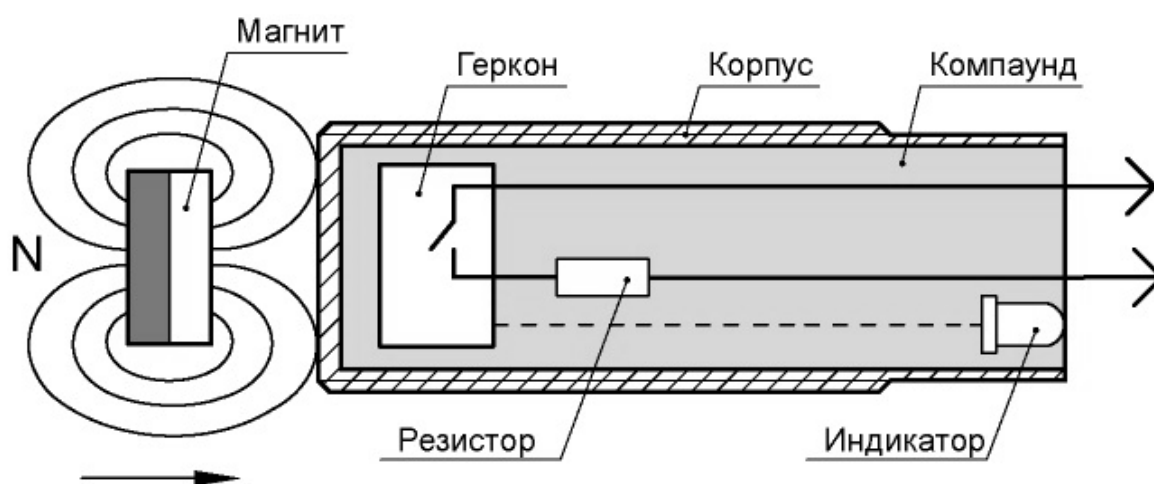


Рисунок 4.19 – Применение геркона при приближении магнитного поля

Геркон выполняет функцию одновременно чувствительного и коммутирующего элемента. Резистор устанавливается для ограничения тока в измерительной цепи. Индикатор может отсутствовать, но при его наличии обеспечивается визуальный контроль срабатывания датчика. Компаунд обеспечивает необходимую степень защиты от вредного воздействия среды применения датчика. Корпус обеспечивает возможность монтажа датчика и его защиты от механических воздействий. Он выполняется из латуни, нержавеющей стали, ударопрочного пластика и т.п.

Второй способ применения геркона связан с тем, что при постоянном расстоянии между магнитом и датчиком изменяется магнитное поле в зазоре

путем введения пластины из ферромагнитного материала (рисунок 4.20). При этом напряженность поля в зоне чувствительности датчика уменьшается и происходит срабатывание геркона.

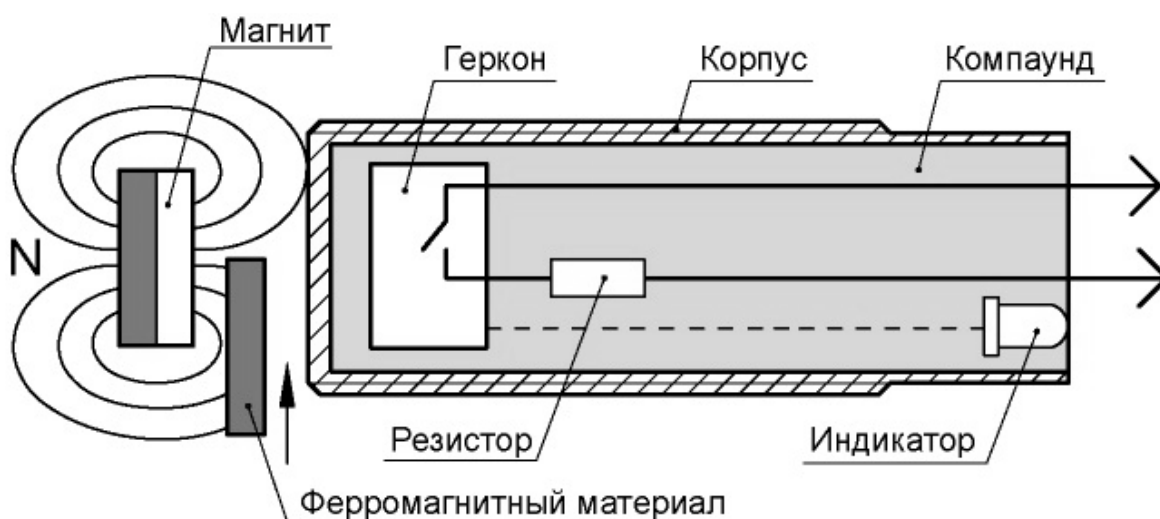


Рисунок 4.20 – Применение геркона путем введения пластины из ферромагнитного материала

Герконовые датчики нашли самое широкое применение, например, при контроле положения и перемещения поршня пневмоцилиндра, контроле положения детали – «зажата не зажата», контроле вентиля (клапан) «открыт-закрыт», контроле детали «вставлена-извлечена», контроле положения механизма «выдвинут-задвинут» и т.п. Основными достоинствами герконовых датчиков являются простота конструкции, возможность его работы при коммутации переменного и постоянного напряжения (от 0,05 до 5000 В), малое сопротивление контактов (не более 0,15 Ом), независимость характеристик от температуры (от – 60 °С до +155 °С). К недостаткам можно отнести относительно невысокое (до 10<sup>7</sup>) количество рабочих циклов и невысокая частота коммутации (до 400 Гц).

### 4.3.2 Датчики Виганда

Датчики Виганда относят к датчикам параметрического типа. Принцип действия датчика основан на зависимости магнитной поляризации чувствительного элемента от воздействия магнитного поля объекта. Эффект

Виганда заключается в том, что если ферромагнитную проволоку внести в магнитное поле, то произойдет самопроизвольное изменение ее магнитной поляризации, как только напряженность поля превысит некоторое пороговое значение. Это явление наблюдается при выполнении двух условий. Первое – проволока должна иметь специальный химический состав и двухслойную структуру. Второе – напряженность магнитного поля должна быть выше определенного порогового значения – порога зажигания.

Момент изменения поляризации проволоки можно наблюдать с помощью катушки индуктивности, намотанной вокруг проволоки или размещенной рядом с ней. Конструкция датчика Виганда показана на рисунке 4.21 и содержит катушку индуктивности и проволоку Виганда. Индукционный импульс напряжения на ее выводах при этом достигает нескольких вольт. При изменении направления магнитного поля полярность индуцируемых импульсов изменяется.

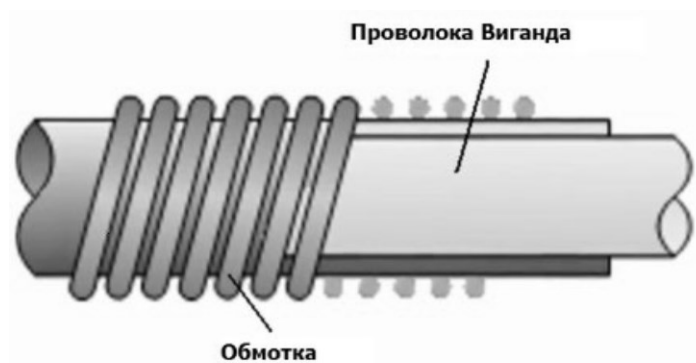


Рисунок 4.21 – Конструкция датчика Виганда

Проволока Виганда изготавливается из сплава «Викалой» (10 % V, 52 % Co, 38 % Fe), однако точный состав материала проволоки, как правило, является секретом фирмы. Достоинствами датчика является простота, независимость его характеристик от влияния внешних электрических и магнитных полей, широкий температурный диапазон работы (от  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), отсутствие необходимости в источнике питания. Датчики Виганда часто применяются в расходомерах, датчиках скорости, датчиках угла поворота и положения, системах считывания идентификационных карт и др.

### 4.3.3 Датчики Холла

Датчики Холла относятся к датчикам генераторного типа. Их принцип действия основан на зависимости разности потенциалов чувствительного элемента от воздействия магнитного поля объекта. Этот эффект открыл американский физик Эдвин Холл (E. Hall) в 1879 г.

Через полупроводниковую пластину протекает ток от внешнего источника  $E$  (рисунке 4.22). Пластина находится в магнитном поле с потоком магнитной индукции  $B$ , пронизывающем ее в направлении, перпендикулярном движению тока. В магнитном поле под действием силы Лоренца электроны отклоняются от прямолинейного движения. Эта сила сдвигает их в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля и направлению тока. У верхнего края пластины электронов будет больше, чем у нижнего, т.е. возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов обуславливает появление выходного напряжения  $U_{\text{Холла}}$  – напряжения Холла.

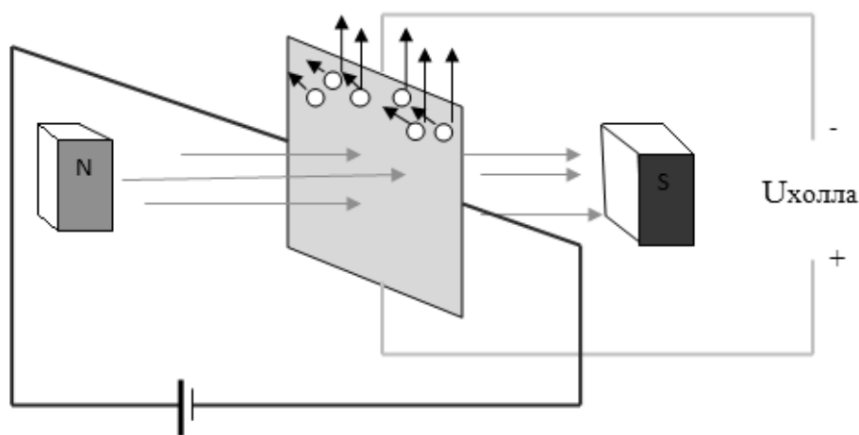


Рисунок 4.22 – Принцип действия датчика Холла

Напряжение Холла пропорционально току и индукции магнитного поля. При постоянном значении тока через пластину оно определяется только значением индукции магнитного поля.

$$U_{\text{Холла}} = k_n EB,$$

где  $k_n$  – постоянная Холла,

$E$  – напряжение на пластине,

$B$  – магнитная индукция постоянного магнита.

ЭДС датчика Холла, как правило, необходимо усиливать. Чувствительную пластину изготавливают из полупроводника, который наклеивают или напыляют на подложку, снабженную выводами для внешних подключений напряжения питания. Достоинствами датчиков Холла является простота, отсутствие механического износа, низкая стоимость.

В настоящее время нашли применение интегральные датчики Холла, в которых осуществляется обработка измерительных сигналов. Первая группа интегральных датчиков Холла представляет собой линейные измерители напряжённости магнитного поля. Они могут содержать схемы усиления, схемы температурной компенсации стабилизаторы питающего напряжения и др (рисунок 4.23).

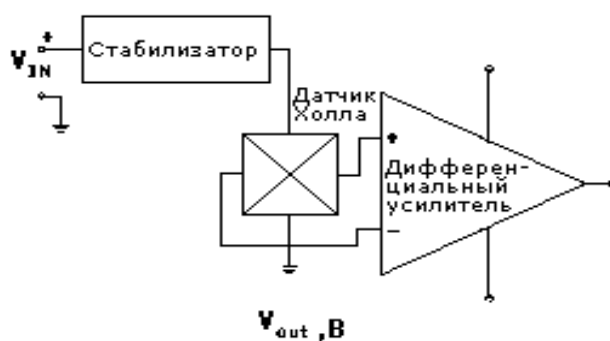


Рисунок 4.23 – Интегральный датчик Холла

При отсутствии магнитного поля выходное напряжение датчика должно быть равно нулю, поэтому здесь обычно применяется дифференциальный усилитель.

Вторая группа датчиков Холла включает в себя микросхемы компараторного типа с логическими уровнями напряжения на выходе (рисунок 4.24).

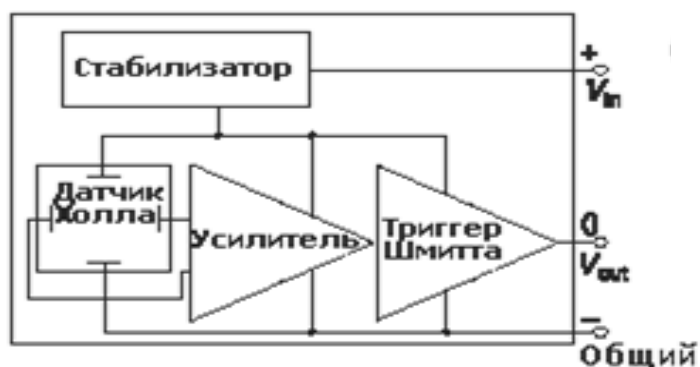


Рисунок 4.24 – Датчик Холла компараторного типа

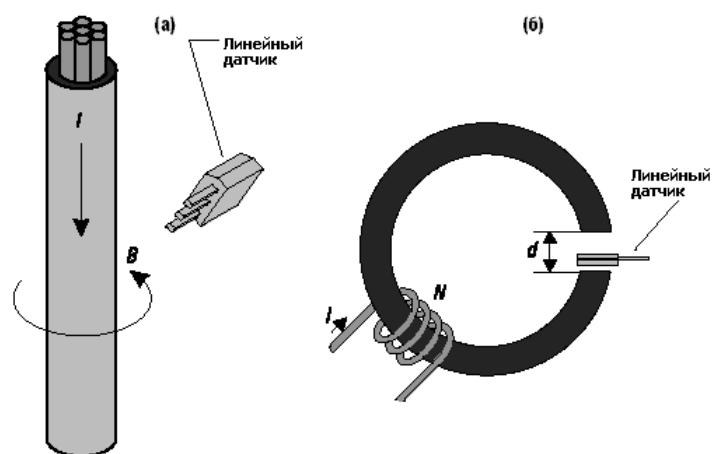
Такие датчики срабатывает только при наличии магнитного поля. Например, они переходят во включенное состояние при наличии магнитного поля, а выключаются при снижении его до определенного уровня.

Современные технологии позволяют ввести в состав интегральных датчиков Холла сложные цифровые системы обработки информации, что позволяет программировать чувствительность и смещение датчика, осуществлять фильтрацию помех и механических воздействий.

Датчики Холла повсеместно используются в таких измерительных системах, как системы измерения угла поворота и направления движения, системы определения координат объекта, системы распознавания «свой-чужой», в системах автоматики, управления и защиты электродвигателей. Кроме того, датчики Холла могут применяться как детекторы ферромагнитных тел, датчики вибрации, тахометры, бесколлекторные двигатели, датчики частоты вращения и др.

На рисунке 4.25 показан пример использования датчика Холла как индикатор наличия тока (от миллиампер до тысячи ампер).





а – датчик Холла расположен вблизи проводника, б – датчик Холла расположен в магнитопроводе

Рисунок 4.25 – Индикатор тока

Важнейшим достоинством таких индикаторов является полное отсутствие электрической связи с измеряемой цепью. Если линейный датчик Холла расположен вблизи проводника с током, то выходное напряжение датчика пропорционально индукции магнитного поля, окружающего проводник. Величина индукции, в свою очередь, пропорциональна проходящему току. Значит, напряжение датчика пропорционально току. В простейшем случае датчик тока представляет собой конструкцию, в которой датчик Холла устанавливается около провода, по которому течет измеряемый ток (рисунок 4.25, а). Чувствительность датчика тока может быть значительно увеличена путем использования концентратора магнитного потока в виде магнитопровода с прорезью, в которую помещается линейный датчик Холла (рисунок 4.25, б).

#### 4.3.4 Магниторезистивные датчики

Магниторезистивные датчики относят к датчикам параметрического типа. Их принцип действия основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента от воздействия магнитного поля объекта. Наиболее сильно этот эффект проявляется в полупроводниковых материалах. Изменение их сопротивления может быть на несколько порядков больше, чем у металлов.

При нахождении полупроводникового элемента с протекающим током в магнитном поле на электроны действуют силы Лоренца (рисунок 4.26).

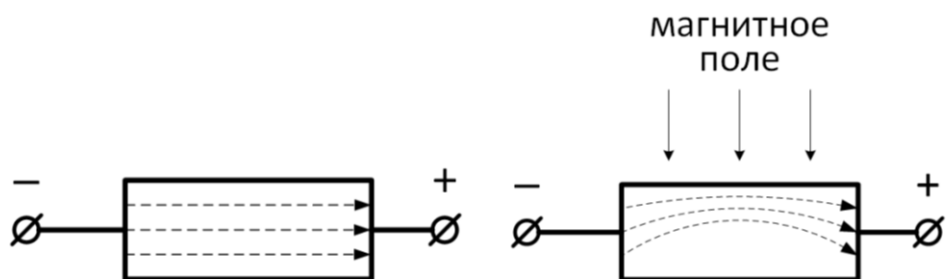
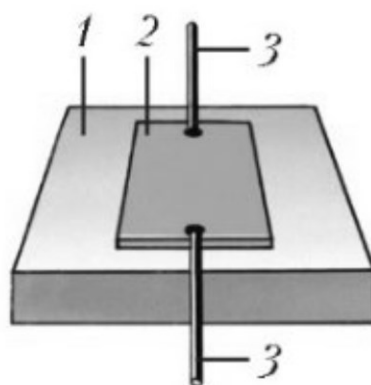


Рисунок 4.26 – Принцип работы магниторезистивного датчика

Эти силы вызывают отклонение движения носителей заряда от прямолинейного, искривляют его и, следовательно, удлиняют его. А удлинение пути между выводами полупроводникового элемента равносильно изменению его сопротивления. Таким образом, зная величину сопротивления датчика, можно судить о количественной характеристике магнитного поля.

Конструктивно датчик состоит из подложки 1 (круглой или прямоугольной пластины толщиной от 0,1 до 0,5 мм из радиокерамики, феррита, пермаллоя и др.), магниточувствительного резистивного элемента 2 (в виде пластинки толщиной от 10 до 80 мкм) и электродов 3 для подключения к электрической цепи (рисунок 4.27).



1 – подложка; 2 – магниточувствительный резистивный элемент; 3 – электрод

Рисунок 4.27 – Конструкция магниторезистивного датчика

Для защиты от механических повреждений и воздействия влаги резистивный элемент и часть электродов покрывают защитной эпоксидной плёнкой.

Преимуществами магниторезисторов являются малые габариты и низкая стоимость, практически неограниченный срок службы, плавностью изменения

сопротивления. К недостаткам магниторезисторов относятся низкая чувствительность, нелинейность характеристики преобразования, высокая зависимость от температуры, изменение чувствительности магниторезистивного элемента при изменении угла между вектором магнитной индукции и плоскостью элемента, достаточно большая рассеиваемая мощность. Магниторезисторы применяются в основном в качестве датчиков магнитного поля в измерительных системах.

#### **4.4 Электромагнитные датчики**

Принцип действия электромагнитных датчиков основан на зависимости параметров электромагнитной цепи от измеряемого перемещения объекта. В качестве измеряемой величины могут служить перемещение элемента магнитной цепи (сердечника или якоря), перемещение элемента электрической цепи (обмотки). В результате таких перемещений изменяется индуктивность обмотки или ее взаимоиנדуктивность с обмоткой возбуждения. Поэтому в технической литературе электромагнитные датчики часто называют индуктивными. Индуктивные датчики обычно рассматривают как параметрические.

Электромагнитные датчики с изменяющейся взаимоиנדуктивностью относят к генераторному типу, поскольку в них изменяется ЭДС обмотки. Так как ЭДС в выходной обмотке появляется за счет изменения коэффициента взаимоиנדукции с обмоткой возбуждения, то такие электромагнитные датчики называют трансформаторными. Магнитная индукция – характеристика магнитного поля, единицей измерения которой в СИ является «тесла» (Тл).

##### **4.4.1 Индуктивные датчики**

Простейшими индуктивными датчиками являются преобразователи с переменным магнитным сопротивлением. Они являются датчиками параметрического типа. В индуктивных датчиках их параметр – индуктивность зависит от магнитного сопротивления:

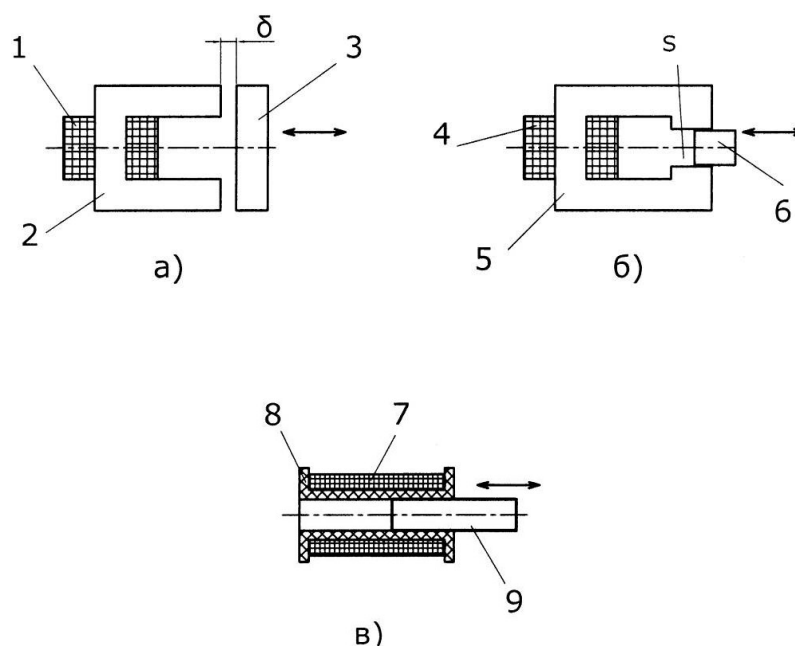
$$L = W^2 / Z_m,$$

где  $L$  – индуктивность обмотки датчика;

$W$  – число витков обмотки;

$Z_m$  – магнитное сопротивление.

На рисунке 4.28 показаны схемы датчиков с переменным магнитным сопротивлением с изменяемой длиной  $\delta$  зазора (рисунок 4.28, а) и изменяемой площадью  $s$  воздушного зазора (рисунок 4.28, б). На схемах обозначено: 1, 4 – катушка; 2, 5 – сердечник; 3, 6 – якорь.



а – с изменяемой длиной зазора, б – с изменяемой площадью зазора,

в – соленоид

Рисунок 4.28 – Индуктивные датчики

К индуктивным также относятся соленоидные преобразователи. Их индуктивность изменяется вследствие перемещения ферромагнитного сердечника 9 внутри катушки 7, намотанной на каркас 8 (рисунок 4.28).

В измерительных системах также широко используются индуктивные датчики с перемещением якоря. Датчик с вертикальным перемещением якоря представляет из себя дроссель с переменным воздушным зазором в магнитопроводе (рисунок 4.29).

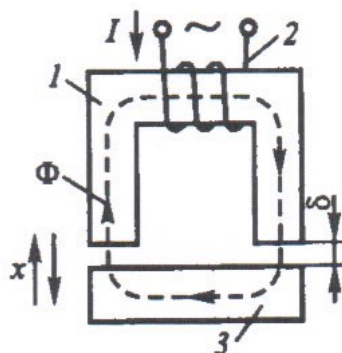


Рисунок 4.29 – Индуктивный датчик с вертикальным перемещением якоря

На сердечнике 1 из электротехнической стали размещена обмотка 2, подключаемая к источнику переменного напряжения. Магнитный поток в сердечнике замыкается через якорь 3, который может перемещаться относительно сердечника. Якорь механически связан с деталью (на рисунке не показано), перемещение  $x$  которой в вертикальном направлении необходимо измерить. Перемещение якоря изменяет магнитное сопротивление магнитной цепи, состоящей из сердечника, якоря и воздушного зазора  $\delta$ . Следовательно, изменится индуктивность обмотки 2. Поскольку на эту обмотку подается переменное напряжение, то ток в ней будет определяться ее полным сопротивлением, в которое входит и индуктивное сопротивление. С увеличением воздушного зазора  $\delta$  магнитное сопротивление будет увеличиваться, а индуктивность будет уменьшаться. Следовательно, ток в обмотке увеличивается. Таким образом, ток в обмотке 2 будет пропорционален величине воздушного зазора  $\delta$ .

Существуют и другие конструкции индуктивных датчиков: одинарные с горизонтальным перемещением якоря, дифференциальные, плунжерные и др. Их основными достоинствами являются простота конструкции и дешевизна. Они нашли широкое применение в различных измерительных системах, например, в качестве бесконтактных датчиков положения концевых выключателей при управлении механизмами, имеющими сравнительно большие перестановочные усилия.

#### 4.4.2 Трансформаторные датчики

Как отмечалось ранее трансформаторные датчики относятся к электромагнитным датчикам генераторного типа. Принцип действия трансформаторных датчиков основан на изменении коэффициента взаимоиנדукции обмоток при перемещении якоря. В зависимости от назначения, трансформаторные датчики изготавливаются для измерения линейных или угловых перемещений. Рассмотрим устройство трансформаторного датчика – линейного дифференциального трансформатора.

Линейные дифференциальные трансформаторы (ЛДТ) являются точным и надежным средством для измерения линейного перемещения. Конструкция простейшего ЛДТ показана на рисунке 4.30.

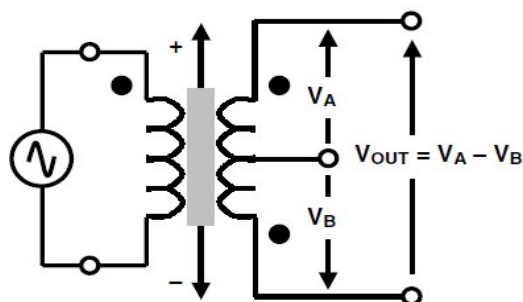


Рисунок 4.30 – Линейный дифференциальный трансформатор

Датчик представляет из себя трансформатор с перемещающимся ферромагнитным сердечником. На первичную обмотку трансформатора подается переменное возбуждающее напряжение (от 1 до 24 В, с частотой от 50 до 20000 Гц). Выходное напряжение ЛДТ  $V_{out}$ , снимаемое со вторичной обмотки, пропорционально положению перемещающегося вдоль оси внутри трансформатора ферромагнитного сердечника, связанного с объектом измерения. Обычно, сердечник снабжается изнутри резьбой. К сердечнику крепится штока. Шток прикрепляется к объекту, перемещение и смещение которого будет измеряться. Вторичные обмотки наматываются встречно. Когда сердечник находится в центре, напряжения на вторичных обмотках  $V_A$  и  $V_B$  равны и противоположны по знаку. При этом выходное результирующее напряжение равно нулю. Когда сердечник смещается от центра, напряжение во

вторичной обмотке, в сторону которой этот сердечник смещается, возрастает, в то время как напряжение на противоположной обмотке уменьшается. В результате выходное дифференциальное напряжение меняется линейно в зависимости от положения сердечника. Линейность такой системы в рабочем диапазоне перемещения сердечника весьма высока – 0,5 % или лучше.

Достоинствами ЛДТ являются хорошая точность, линейность, чувствительность и разрешение, возможность работы без трения элементов преобразователя, надежность и механическая прочность. Диапазон измерений составляет широкий спектр перемещения – от 0,01 до 250 мм.

На практике в обычной схеме ЛДТ трудно добиться нулевого значения выходного напряжения при расположении сердечника в центре. Это связано с рассогласованием вторичных обмоток и наличия индуктивности рассеяния. Кроме того, простое измерение выходного напряжения не дает информацию о том, в какую сторону от нулевой позиции движется сердечник. Для устранения этих недостатков используют дополнительные цепи преобразования измерительного сигнала. Схема одного из вариантов датчика линейных перемещений на основе ЛТД показана на рисунке 4.31. В состав датчика дополнительно включены выпрямители, фильтры и дифференциальный операционный усилитель.

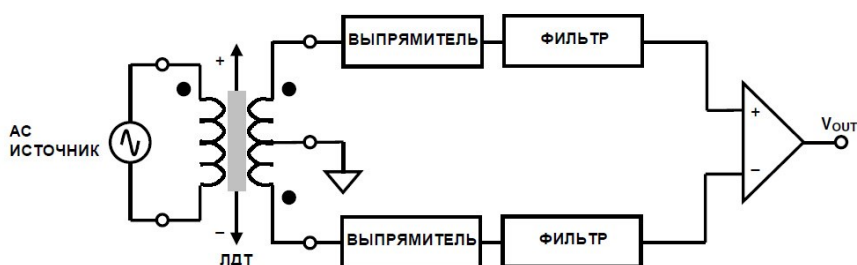


Рисунок 4.31 – Датчик на основе ЛТД

Существуют и другие алгоритмы преобразования измерительных сигналов в ЛДТ. Например, известной фирмой Analog Devices выпускается микросхема AD598 индустриального стандарта, которая выполняет всю необходимую обработку сигналов, поступающих с ЛДТ. Ее функциональная схема показана на рисунке 4.32.

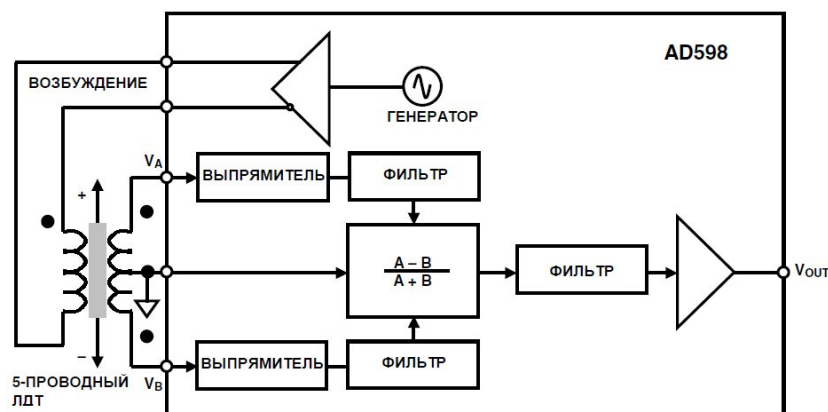


Рисунок 4.32 – Функциональная схема микросхемы AD598

В этой микросхеме частоту возбуждения внутреннего генератора можно менять от 20 Гц до 20 КГц. Для формирования функции  $[A - B]/[A + B]$  используются специальные аналоговые преобразователи. Поскольку данная функция не зависит от амплитуды напряжения возбуждения на первичной обмотке, сумма выходных напряжений ЛДТ остается постоянной по всему рабочему диапазону.

#### 4.4.3 Вращающиеся трансформаторы

Вращающимися (ВТ) или поворотными трансформаторами называют электрические микромашины переменного тока, предназначенные для преобразования угла поворота  $\Theta$  в напряжение, пропорциональное некоторым функциям угла (например,  $\sin\Theta$  или  $\cos\Theta$ ) или самому углу поворота ротора. Они широко применяются в аналого-цифровых преобразователях «угол – амплитуда – код» и «угол – фаза – код», в измерительных системах дистанционной передачи угла повышенной точности и т.п. По конструкции и наличию скользящего контакта ВТ разделяют на контактные и бесконтактные. На рисунке 4.33 представлена принципиальная схема контактного ВТ.



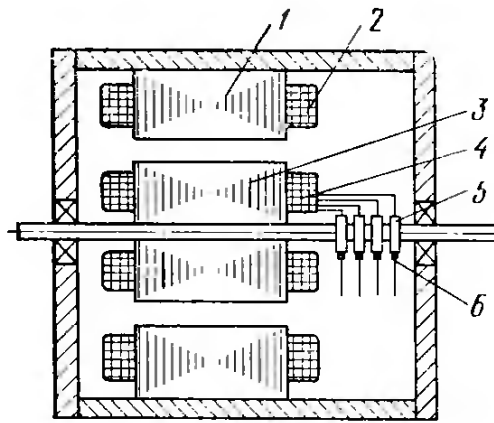


Рисунок 4.33 – Контактный вращающийся трансформатор

Вращающийся трансформатор состоит из статора 1 и ротора 3. Они выполнены из набранных и изолированных между собой пластин из электротехнической, в которых сделаны пазы для укладки обмоток: двух взаимно перпендикулярных на роторе – 4, и двух взаимно перпендикулярных на статоре – 2. Обмотки статора выполняют с одинаковым числом витков, с одним сечением обмоточного провода и по одной схеме. Одинаковыми изготавливают и роторные обмотки. Пространственное размещение обмоток показано на рисунке 4.34. На рисунке обозначено:  $B_1B_2$  – обмотка возбуждения,  $B_3B_4$  – квадратурная обмотка,  $C_1C_2$  и  $K_1K_2$  – синусная и косинусная обмотки.

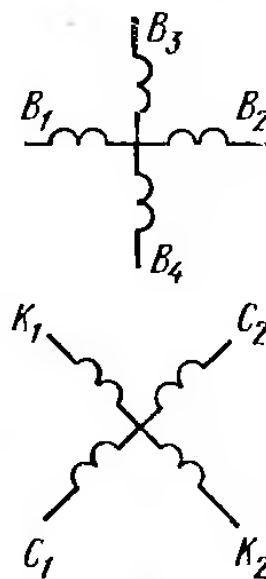


Рисунок 4.34 – Пространственное положение обмоток ВТ

Возможны два варианта расположения обмоток. Обмотки возбуждения и квадратурная (первичные) располагаются на статоре, а синусная и косинусная (вторичные) – на роторе. Второй вариант – наоборот. Концы статорных обмоток подводят непосредственно к соединительным колодкам. Концы роторных обмоток ВТ выводят через токосъемное устройство (четыре контактных кольца 5 и щетки 6 на рисунок 4.33).

Во вращающихся трансформаторах взаимоиндуктивность между первичными и вторичными обмотками при повороте ротора изменяется строго по синусоидальному (или косинусоидальному) закону в зависимости от угла поворота, что обеспечивает такой же закон изменения амплитуды ЭДС вторичных обмоток. При этом возможна реализация различных режимов работы ВТ в зависимости от схемы включения их обмоток. Название ВТ определяется его режимом работы. Рассмотрим некоторые из них.

Синусно-косинусные (СКВТ), у которых выходное напряжение одной обмотки пропорционально синусу угла поворота ротора, а другой обмотки – косинусу угла поворота ротора.

Линейные (ЛВТ), у которых выходное напряжение пропорционально углу поворота ротора.

Масштабные (МВТ), у которых выходное напряжение пропорционально входному и коэффициент пропорциональности (масштаб) определяется углом поворота ротора.

Датчики и приемники трансформаторных дистанционных передач угла (ДПВТ), выполняющие функции, аналогичные функциям трансформаторных сельсинов.

Преобразователи координат, осуществляющие поворот осей декартовой системы координат или переход к полярной системе координат (построители).

Первичные преобразователи угла для индукционных фазовращателей, осуществляющих преобразование пространственного угла во временной.

Для работы ВТ необходимы дополнительные усилительные устройства с большим коэффициентом усиления, так как их выходная мощность сигнала незначительная.

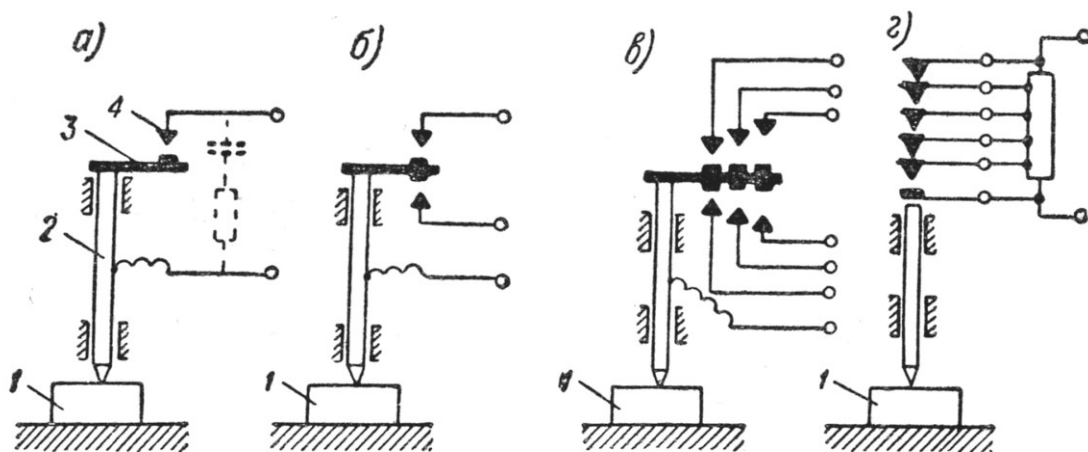
Вращающиеся трансформаторы применяются в аналого-цифровых преобразователях, системах передачи угла высокой точности, в качестве датчиков обратной связи в следящих системах, бортовой аппаратуре.

## 4.5 Резистивные измерительные преобразователи

Резистивные датчики относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления резистора от измеряемого механического перемещения объекта. В зависимости от назначения резистивные датчики разделяют на контактные и реостатные.

### 4.5.1 Контактные датчики

В контактных датчиках механическое перемещение объекта преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих далее электрической измерительной цепью. Принцип построения контактных датчиков иллюстрируется рисунком 4.35.



а – однопредельный, б – двухпредельный, в – многопредельный,  
г – работающий на замыкание

Рисунок 4.35 – Контактные датчики

Работа простейшего однопредельного контактного датчика с одной парой контактов (рисунке 4.35, а) заключается в замыкании контактов 3 и 4 в результате изменения размера изделия 1. Если размер изделия увеличится, то измерительный щуп 2 переместится вверх, в результате чего контакты 3 и 4 придут в соприкосновение. При этом активное сопротивление между контактами 3 и 4 изменится от бесконечности до ничтожно малой величины, определяемой значением контактного сопротивления. Выводы датчика подключаются к сигнальному устройству.

На рисунке 4.35, б – изображена схема двухпредельного контактного датчика с двумя парами контактов. Он способен реагировать на перемещение щупа в обе стороны от начального («нулевого») положения. На рисунке 4.35, в – показан многопредельный контактный датчик с несколькими парами контактов. У него контакты замыкаются последовательно друг за другом в зависимости от размеров деталей. Измерительный прибор, включенный на выходе датчика, покажет три размера. На рисунке 4.35, г – показан датчик, работающий на замыкание части одного из сопротивлений резистора цепи.

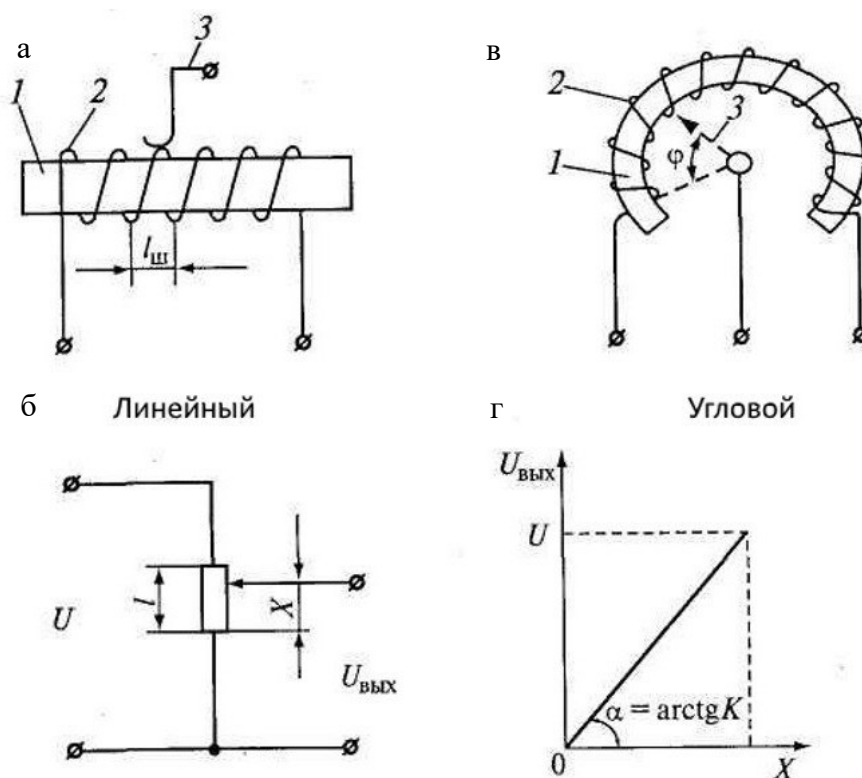
Выбор материала для контактов определяется исходя из контактного давления. Для высокочувствительных маломощных контактных датчиков контакты изготавливаются из серебра, платины и золота, которые почти не окисляются в нормальных атмосферных условиях. Однако их износостойкость и твердость невелики. При значительных контактных давлениях контакты выполняются из родия, вольфрама, молибдена или их сплавов. Они обладают большой твердостью и не подвергаются разрушению.

Достоинствами контактных датчиков являются их простота и дешевизна, простота регулировки чувствительности, возможность работы на постоянном и переменном токе, возможность контролирования размеров деталей с очень высокой точностью (менее 1 мкм). К недостаткам контактных датчиков можно отнести наличие электрической дуги и искрения на контактах, что снижает надежность их работы, а также возможность получения ложных срабатываний в цепи сигнала при наличии вибраций или резких сотрясений установок.

Контактные датчики широко применяются в системах автоматического контроля и сортировки размеров и в системах автоматической сигнализации различных физических величин.

#### 4.5.2 Реостатные датчики

Линейные реостатные измерительные преобразователи предназначены для измерения линейного или углового механического перемещения и преобразования его в изменения электрического сопротивления цепи и далее – в электрический сигнал. Они представляют собой проволочные реостаты с непрерывной намоткой (рисунок 4.36).



а – реостатный датчик линейного перемещения, б – электрическая схема реостатного датчика линейного перемещения, в – Реостатный датчик углового перемещения, г – статическая характеристика реостатного датчика

Рисунок 4.36 – Реостатные датчики.

Реостатный датчик линейного перемещения (рисунке 4.36, а) представляет собой провод 2 с высоким удельным сопротивлением, навитый в один ряд на плоский или кольцевой каркас 1 из диэлектрического материала. По частично

очищенной от изоляции поверхности витков провода скользит ползунок (движок) 3. Ползунок механически связан с каким-либо устройством, не показанном на рисунке (клапаном, рулем, режущим инструментом и т.д.). При перемещении ползунок скользит непосредственно по обнаженной от изоляции поверхности провода. При этом происходит изменение сопротивления датчика. К зажимам обмотки реостата (рисунок 4.36, б) подключается постоянное или переменное напряжение  $U$ . При перемещении ползунка выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  меняется пропорционально входной величине – перемещению  $X$ . Таким образом, осуществляется преобразование перемещения  $X$  в напряжение  $U$ . Функция преобразования описывается выражением:

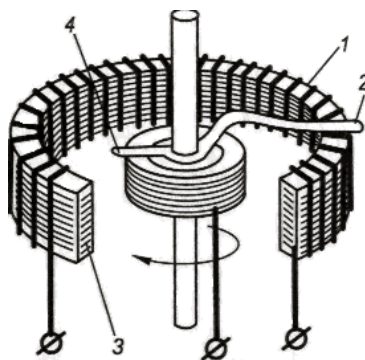
$$U_{\text{ВЫХ}} = (U/l)X,$$

где  $l$  – длина намотки обмотки;

$X$  – перемещение движка реостата.

На рисунке 4.36, в – показана конструкция углового реостатного датчика. Здесь входной величиной является угол поворота  $\varphi$ . На рисунке 4.36, г – представлена статическая характеристика реостатных датчиков.

В качестве обмотки сопротивления реостатных датчиков используются константан, нихром и манганин, обладающие низкой стоимостью, высоким удельным сопротивлением. Эти материалы стойки к износу и коррозии, что обеспечивает хороший контакт с ползунком. Ползунок часто изготавливается из платины с иридием, иногда из платины с бериллием или платины с серебром в виде пластинчатых щеток. На рисунке 4.37 в качестве примера приведен рисунок углового реостатного датчика, на котором обозначено: 1 – обмотка, 2 – ползунок, 3 – каркас, 4 – подвижный контакт.



1 – обмотка, 2 – ползунок, 3 – каркас, 4 – подвижный контакт

Рисунок 4.37 – Реостатный угловой датчик

Основными характеристиками реостатных датчиков являются статическая характеристика, порог чувствительности, входное усилие на ползунке, мощность сигнала на выходе, потребляемая мощность.

Статическая характеристика реостатных измерительных преобразователей близка к линейной, поскольку они имеют равномерную намотку (рисунок 4.36, г). Для датчиков линейных перемещений и датчиков угловых перемещений статическая характеристика определяется, соответственно, выражениями:

$$U_{\text{вых}} = k \cdot X_{\text{вх}} \text{ и } U_{\text{вых}} = k \cdot \varphi,$$

где  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение датчика,

$k = (U/l)$  – чувствительность датчика,

$l$  – длина намотки обмотки,

$\varphi$  – угол поворота оси углового датчика.

Порог чувствительности  $\Delta X_{\text{порог}}$  определяется ошибкой ступенчатости обмотки (из-за дискретности намотки провода на каркас):

$$\Delta X_{\text{порог}} = l/W,$$

где  $W$  – число витков намотки.

Входное усилие на движке, которое зависит от силы нажатия ползунка на намотку (контактное усилие) и от коэффициента трения.

Мощность сигнала на выходе

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^2 / R_{\text{н}},$$

где  $R_{\text{н}}$  – нагрузка датчика.

Потребляемая мощность

$$P_{\text{потр}} = U_{\text{пит}}^2 / R_{\text{обм}},$$

где  $U_{\text{пит}}$  – напряжение питания датчика,

$R_{\text{обм}}$  – полное сопротивление обмотки датчика.

Реостатные датчики применяются для измерения как больших, так и малых перемещений (до десятков миллиметров) с точностью до 0,1 мм. При этом контролируемая величина может изменяться не только по абсолютному значению, но и по направлению (знаку). На погрешность реостатных преобразователей оказывает значительное влияние число витков обмотки  $W$ . Так, с увеличением числа витков погрешность уменьшается.

Достоинствами реостатных датчиков являются простота их конструкции, возможность получения прямолинейной характеристики, отсутствие необходимости последующего усиления измерительного сигнала. К недостаткам относятся низкая надежность из-за наличия скользящего электрического контакта, подгорание контактов, относительно большое перемещение движка и необходимость большого усилия для его перемещения. В качестве примера на рисунке 4.38 показаны выпускаемые промышленностью некоторые конструкции резистивных датчиков.



Рисунок 4.38 – Конструкции резистивных датчиков

### 4.5.3 Тензорезисторы

Тензорезистивные датчики относят к датчикам параметрического типа. Их принцип действия основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента от его механического напряжения, вызываемого деформацией. При механической деформации чувствительного элемента



изменяется ее активное сопротивление. Это происходит вследствие изменения ее сечения и длины, а также изменения удельного сопротивления материала.

В области упругих деформаций справедлив закон Гука:

$$\sigma = E\varepsilon = E\Delta l/l,$$

где  $\sigma$  – напряжения в материале, Н/м<sup>2</sup>

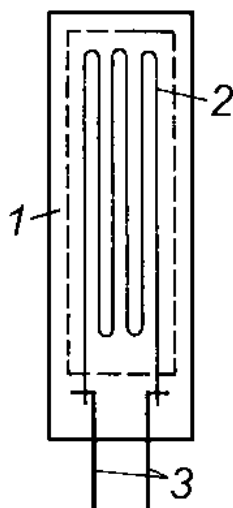
$E$  – модуль упругости материала, Н/м<sup>2</sup>

$\varepsilon$  – деформация

$\Delta l$  – линейное удлинение, м

$l$  – первоначальный размер, м.

Напряжение материала приводит к его деформации, которая приводит к изменению его сопротивления. Датчик состоит из подложки 1, на которой при помощи клея укреплен чувствительный элемент 2. К нему присоединены выводные проводники 3 (рисунок 4.39). Сверху чувствительный элемент покрыт тонким защитным слоем. Количество нитевидных проводников составляет от 10 до 20. Диаметр проводника составляет 20 мкм, толщина подложки составляет от 0,03 мм для пластика до 0,1 мм для бумаги.



1 – подложка, 2 – чувствительный элемент; 3 – выводные проводники

Рисунок 4.39 – Внешний вид тензорезистивного датчика

Датчик располагают на контролируемом объекте в направлении действия деформирующего усилия. Он плотно крепится к объекту измерения таким

образом, чтобы чувствительный элемент мог удлиняться или сокращаться в соответствии с деформацией, вызванной измерительным объектом.

Обычно с целью увеличения чувствительности тензодатчика его тензорезистор (как чувствительный элемент) включают в мостовую схему, применение которой рассматривалось ранее (рисунке 4.40).

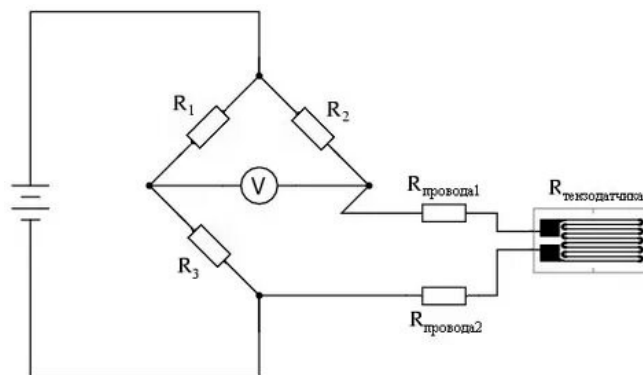


Рисунок 4.40 – Мостовая схема включения тензорезистора

При условии баланса моста  $R_1(R_{\text{тензодатчика}} + R_{\text{провода1}} + R_{\text{провода2}}) = R_2R_3$  напряжение, фиксируемое вольтметром  $V$  равно нулю. При деформации тензорезистора он меняет свое сопротивление, нарушается баланс моста и вольтметр  $V$  показывает пропорциональное напряжение.

По конструктивным параметрам тензодатчики подразделяются на датчики с малой базой (длиной от 0,4 до 4 мм, с сопротивлением от 5 до 100 Ом), средней (длиной от 4 до 25 мм, с сопротивлением от 100 до 400 Ом) и большой (длиной от 3 до 60 мм, до 1000 Ом).

Основной характеристикой тензодатчика является тензочувствительность:

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L},$$

где  $R$  и  $L$  – соответственно сопротивление и длина тензочувствительного элемента;

$\Delta R$  и  $\Delta L$  – соответственно их изменения.

Основным требованием к материалу изготовления тензорезистора является возможно большее значение чувствительности. В настоящее время широко применяются тензорезисторы из металлической резистивной фольги медно-никелевого сплава толщиной от 4 до 12 мкм.

Следует отметить, что одной из проблем измерения деформации термодатчиками является тепловой эффект, проявляющийся в том, помимо внешней силы, на удлинение или сокращение объекта измерения влияют изменяющиеся температуры. Соответственно, тензорезистор, прикрепленный к объекту, также будет деформироваться. Решение данной проблемы – температурная компенсация. Одним из таких вариантов является применение тензорезисторов с автокомпенсацией температурных деформаций. Такие тензорезисторы имеют строго определенный ТКС, соответствующий материалу объекта, на котором они устанавливаются. Принцип заключается в том, что изменение сопротивления, вызванное температурной деформацией, компенсируется противоположным по знаку изменением сопротивления тензорезистора. Это осуществляется за счет специально подобранного под материал объекта температурного коэффициента сопротивления. Кроме этого, решается вопрос температурной компенсации проводов. Например, для длинных проводов в мостовых схемах для компенсации влияния сопротивления соединительных проводов применяется трехпроводная схема включения, которая рассматривалась ранее.

Достоинствами тензодатчиков являются их простота, невысокая стоимость, низкий температурный коэффициент сопротивления в рабочем диапазоне температур, линейная зависимость сопротивления от деформации в широком диапазоне деформаций, химическая стойкость к материалу и окислению. К недостаткам относятся малая механическая прочность (хрупкость), сильное влияние окружающей температуры, большой разброс параметров датчиков внутри партии (до 20 %).

Основными источниками погрешностей тензодатчиков являются температурная зависимость сопротивления и коэффициента деформации исследуемой детали, снижение чувствительности с ростом частоты изменения измеряемой деформации, влияние сопротивления соединительных проводов. Большинство из этих факторов могут быть учтены и скомпенсированы путем включения в состав датчика микропроцессора. На рисунке 4.41 в качестве

примера показана схема тензометрической измерительной системы, работа которой понятна из названия блоков.

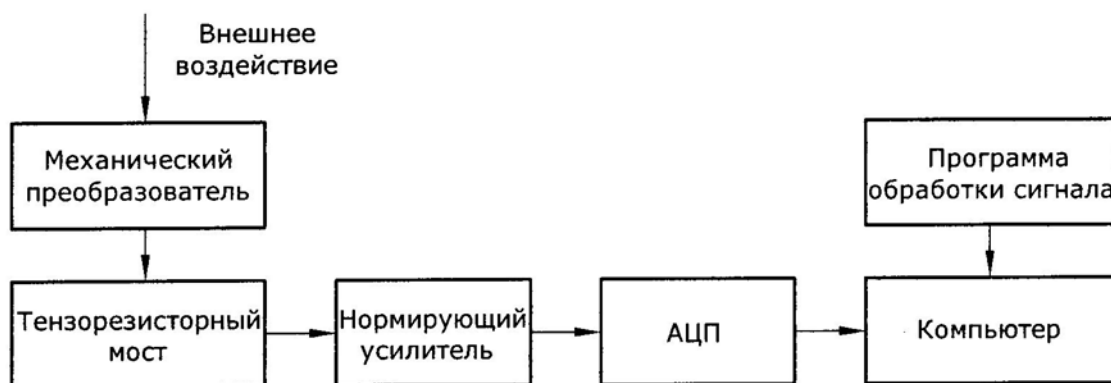


Рисунок 4.41 – Тензометрическая измерительная система

Вместо АЦП может быть применен микроконтроллер с многоканальным входом (имеющий встроенный АЦП), что дает возможность увеличения числа каналов. Микроконтроллер через интерфейс соединяется с сервером (персональным компьютером).

Тензорезистивные датчики применяют для измерения веса, давления, силы, перемещения, момента, ускорения, вибрации, натяжения, крутящего момента, остаточных напряжений в механических конструкциях и деталях машин после их обработки и т.д.

Погрешность приборов с тензопреобразователями достигает 1,5%. При непосредственной градуировке и при возможности установки нуля перед каждым измерением погрешность может быть снижена до 0,2-0,5%.

#### 4.6 Емкостные измерительные преобразователи

Емкостные датчики относят к датчикам параметрического типа. Их принцип действия основан на зависимости емкости конденсатора от изменения расстояния между его пластинами, либо от изменения площади перекрытия пластин, либо от диэлектрической проницаемости вещества между пластинами. По конструкции бывают датчики с плоскопараллельными пластинами, датчики с цилиндрической формой конденсатора, датчики с наличием диэлектрика

между пластинами и др. Чувствительным элементом емкостного датчика является конденсатор, его электрическая емкость.

Электрическая емкость – характеристика проводника, мера его способности накапливать электрический заряд. Емкость конденсатора измеряется в фарадах. 1 фарад равен емкости конденсатора, при которой заряд 1 кулон создает между его пластинами напряжение 1 вольт. Емкость конденсатора  $C$  определяется выражением:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / \delta$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды,

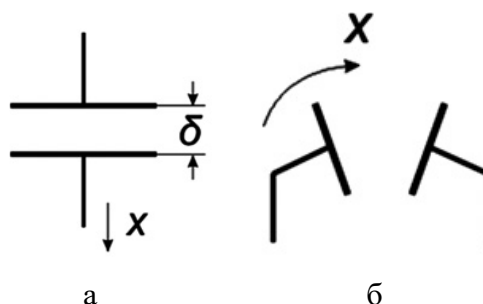
$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,

$S$  – площадь перекрытия пластин,

$\delta$  – расстояние между пластинами.

Изменение одного из перечисленных параметров конденсатора ( $\varepsilon$ ,  $S$  или  $\delta$ ) приводит к изменению его емкости. В связи с этим по виду изменяемого параметра конденсатора различают датчики с изменяемым зазором между пластинами конденсатора, датчики с изменяемой площадью перекрытия пластин конденсатора и датчики с изменяемой диэлектрической проницаемостью конденсатора. Рассмотрим их устройство.

В емкостных датчиках с изменяемым зазором его емкость  $C$  изменяется в зависимости от зазора  $\delta$  между пластинами (рисунок 4.42, а и б).



а – датчик поперечного смещения, б – датчик углового разведения

Рисунок 4.42 – Емкостные датчики с изменяемым зазором

Датчик представляет собой конденсатор, одна из пластин которого испытывает поперечное смещение или угловое разведение  $X$  относительно другой, вызывая изменение емкости. Их статическая характеристика нелинейная

(рисунок 4.43), поэтому они используются, когда диапазон изменения контролируемой величины составляет не более 1 мм.

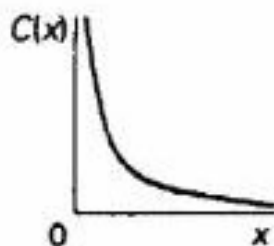
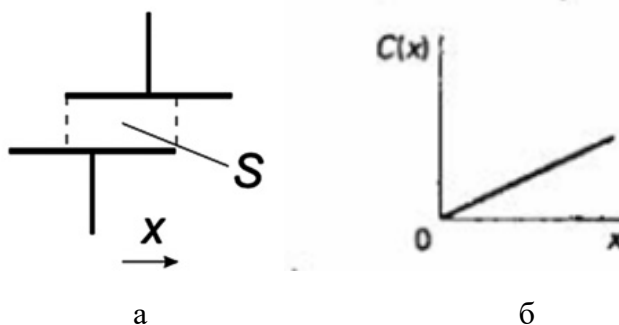


Рисунок 4.43 – Статическая характеристика емкостных датчиков с изменяемым зазором

В емкостных датчиках с изменяемой площадью перекрытия обкладок емкость  $C$  изменяется в зависимости от площади  $S$  перекрытия пластин. Датчик представляет собой конденсатор, одна из обкладок которого испытывает продольное или угловое смещение  $X$  относительно другой, вызывая изменение емкости (рисунок 4.44, а).



а – Устройство датчика, б – Статическая характеристика

Рисунок 4.44 – Емкостной датчик с изменяемой площадью перекрытия обкладок конденсатора

Его статическая характеристика линейная (рисунок 4.44, б). Датчики с изменяемой площадью используют для измерения угловых механических перемещений и сравнительно больших линейных перемещений.

В емкостных датчиках с изменяемой диэлектрической проницаемостью емкость  $C$  изменяется в зависимости от диэлектрической проницаемости диэлектрика  $\epsilon$ . Датчик представляет собой конденсатор, в котором пластины и

диэлектрик испытывают взаимное смещение  $X$  вызывая изменение емкости  $C$  (рисунок 4.45).

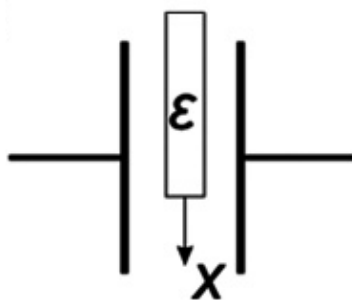


Рисунок 4.45 – Датчик с изменяемой диэлектрической проницаемостью емкости конденсатора

Его статическая характеристика также линейная.

Следует отметить, что изменение емкости конденсатора может происходить и при влиянии на диэлектрическую проницаемость диэлектрика внешних воздействий, например, температуры, влажности. В связи с этим разрабатываются соответствующие датчики. Например, на рисунке 4.46 показано устройство емкостного датчика уровня жидкости.

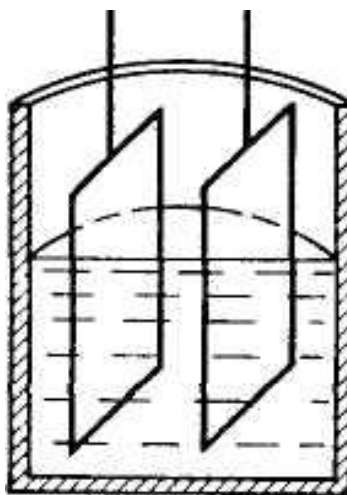


Рисунок 4.46 – Емкостной датчик уровня жидкости

В таком датчике при изменении уровня жидкости в стакане изменяется диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора, а, значит, и емкость конденсатора. Датчики могут быть с плоскими пластинами и цилиндрические.

Для изготовления обкладок (пластин) конденсаторов емкостных датчиков используется тонкая металлическая фольга примерно от 5 до 6 мкм из алюминия, меди, свинцово-оловянная. Также используют тонкие слои металла, нанесенные на подложку металлизацией, из цинка, алюминия, серебра и др. Толщина слоя в этом случае составляет от нескольких микрон до десятых и сотых долей микрометров. Сами диэлектрики в зависимости от области применения датчиков могут изготавливаться из слюды, стекла, керамики, бумаги, оксидных пленок, тефлона, полистирола и др.

При использовании емкостных датчиков обычно применяют мостовые схемы их включения. На рисунке 4.47 показана мостовая схема включения емкостного датчика в устройстве измерения силы  $F$ .

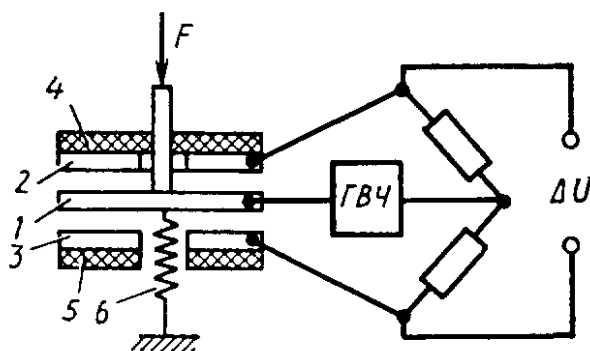


Рисунок 4.47 – Мостовая схема включения емкостного датчика измерения силы

Датчик имеет и подвижную обкладку 1 и две неподвижные – 2 и 3. На обкладку 1 конденсатора емкостного датчика действует сила  $F$ . Обкладка 1 закреплена на пружине 6. Под действием силы  $F$  обкладка конденсатора перемещается параллельно самой себе. Имеются изоляторы – 4 и 5. Генератор высокой частоты (ГВЧ), включенный в одну из диагоналей моста, питает его переменным напряжением. Необозначенные на схеме резисторы являются плечами моста. При отсутствии силы  $F$  обкладка 1 занимает симметричное положение относительно неподвижных обкладок 2 и 3. При этом емкость конденсатора  $C_{1-2}$  между пластинами 1 и 2 равна емкости конденсатора  $C_{1-3}$  между пластинами 1 и 3:



$$C_{1-2} = C_{1-3} = C.$$

Под воздействием силы  $F$  обкладка 1 перемещается и емкости  $C_{1-2}$  и  $C_{1-3}$  изменяются, получая приращения  $\Delta C$  с обратными знаками:

$$C_{1-2} = C - \Delta C \text{ и } C_{1-3} = C + \Delta C$$

При этом баланс моста нарушается и во второй диагонали моста появляется напряжение  $\Delta U$ , пропорциональное силе  $F$ . Емкости  $C_{1-2}$  и  $C_{1-3}$  включены в смежные плечи моста, поэтому чувствительность датчика возрастает вдвое.

На рисунке 4.48 в качестве примера показана структура преобразователя на основе емкостного датчика – бесконтактного выключателя.

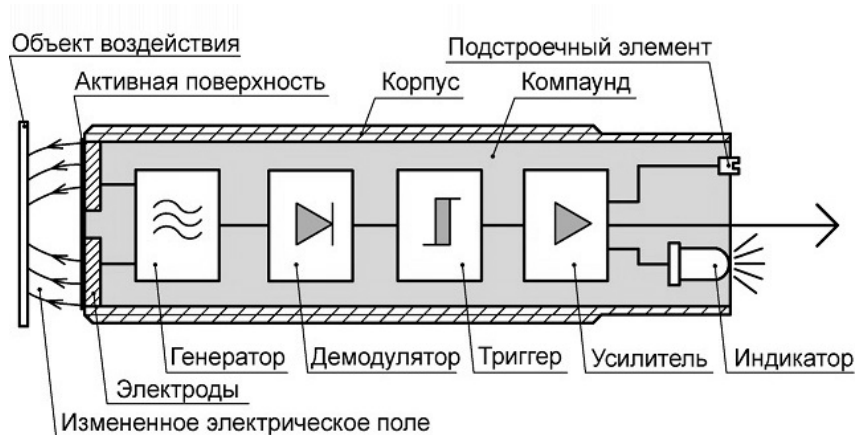


Рисунок 4.48 – Емкостной бесконтактный преобразователь

Чувствительная поверхность образуется электродами. При приближении к ним объекта воздействия емкость чувствительного элемента изменяется. При этом амплитуда колебаний генератора изменяется. Это регистрируется оценочной схемой (демодулятор, триггер, усилитель) и приводит к выработке сигнала включения. Срабатывание преобразователя показывает индикатор.

Достоинствами емкостных датчиков является простота их конструкций, высокая чувствительность, отсутствие подвижных контактов, не требуется больших усилий для передвижения чувствительного компонента, возможность длительной эксплуатации, возможность совмещать форму датчика с разными конструкциями, небольшие габаритные размеры и масса, малый расход электроэнергии, относительная дешевизна. К недостаткам следует отнести его

работу на высоких частотах электрического питающего напряжения, необходимость экранирования его элементов, малый коэффициент преобразования. Кроме того, при использовании емкостных датчиков необходимо обеспечивать защиту от ложных срабатываний. Они возникают из-за случайного касания, воздействия атмосферных осадков, различных жидкостей. Промышленностью выпускается большое разнообразие емкостных преобразователей, внешний вид которых представлен на рисунке 4.49.



Рисунок 4.49 – Емкостные преобразователи

#### **4.7 Пьезоэлектрические преобразователи**

Пьезоэлектрические датчики относят к датчикам генераторного типа. Работа пьезоэлектрических датчиков основана на пьезоэлектрическом эффекте (пьезоэффекте). Его суть заключается в возникновении зарядов в некоторых материалах при приложении к ним механической нагрузки. Эффект был открыт в 1880 г. братьями Жаком и Пьером Кюри. Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на зависимости поляризации чувствительного элемента от его механического напряжения, вызываемого деформацией.

Пьезоэффектом обладают материалы, имеющие ярко выраженные анизотропные свойства, т. е. различные свойства по различным направлениям кристаллографических осей. Естественными материалами является турмалин, кварц и др., искусственными – пьезоматериалы, получаемыми путем спекания смеси порошков (например, оксидов полупроводников) и получения при остывании пьезокерамики. В последнее время в качестве чувствительных

элементов датчиков используются пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, сегнетоэлектрические пьезокерамики и др.

Простейший искусственный ПЭ представляет собой прямоугольный параллелепипед из кристалла пьезоматериала, на гранях которого находятся проводящие электроды (рисунок 4.50).

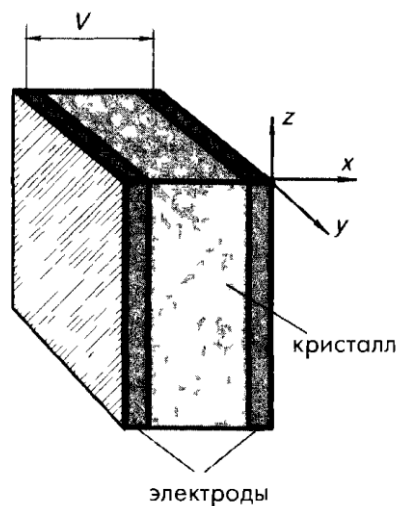


Рисунок 4.50 – Пьезоэлемент

При приложении силы к пьезоэлементу с его электродов снимается выходное напряжение  $V$ . Построенный таким образом датчик можно считать конденсатором, в котором в качестве диэлектрика выступает сам кристалл, работающий как генератор электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения на электродах. Хотя заряд формируется только в местах приложения силы, металлические электроды выравнивают заряды вдоль всей их поверхности.

Заряд  $Q$ , который генерируется ПЭ, в общем случае пропорционален прикладываемой силе  $F$ :

$$Q = d F,$$

где  $d$  – пьезомодуль (коэффициент пропорциональности).

Величина пьезомодуля зависит от материала ПЭ. Для кварца  $d = 2 \times 10^{-12}$  Кл/Н, для керамики –  $d = (80 \dots 250) 10^{-12}$  Кл/Н. В общем случае деформирование кристалла ПЭ приводит к смещению его граней пропорционально силе  $F$ , поэтому:

$$Q = KF$$

где  $K$ —коэффициент пропорциональности.

Наряду с преобразователями, в которых пьезоэлемент работает на сжатие-растяжение, применяются конструкции, в которых элемент работает на изгиб и сдвиг. Конструкция пьезоэлемента, работающий на изгиб (рисунок 4.51), представляет собой две одинаковые пластины, склеенные между собой.

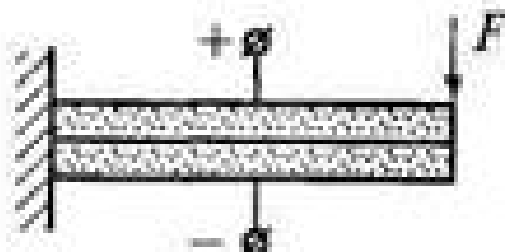


Рисунок 4.51 – Конструкция пьезоэлемента, работающего на изгиб

Между пластинами располагается металлическая фольга. При изгибе такого элемента (при приложении силы  $F$ ) одна пластина удлиняется, а другая укорачивается. Напряжение, пропорциональное изгибу, снимается с пластин.

На рисунке 4.52 показана конструкция пьезоэлемента, работающего на сдвиг.

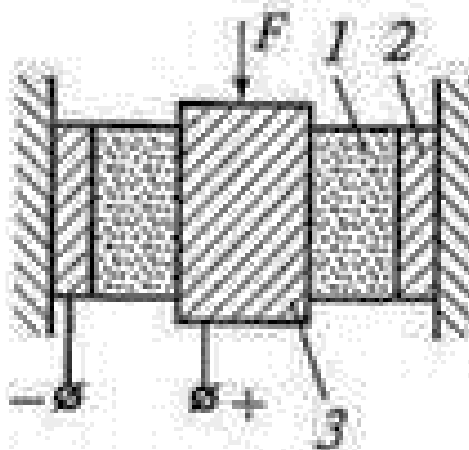


Рисунок 4.52 – Конструкция пьезоэлемента, работающий на сдвиг

Он представляет собой кольцо из керамики 1, в которое вклеен внутренний электрод 3 и которое само вклеено во внешний электрод 2.

Под действием силы  $F$  происходит деформация сдвига плоскостей, что приводит к появлению пропорционального напряжения на электродах пьезоэлемента.

Достоинствами пьезодатчиков являются надежность и простота конструкции, малые габариты, возможность измерения быстропеременных нагрузок. К недостаткам можно отнести малую пьезоэлектрическую постоянную (особенно у кварца), температурную зависимость.

Области применения пьезоэлектрических датчиков довольно широкая: измерение вибраций, деформаций, давлений, усилий, сосредоточенных сил, ускорений, в весовых и сортировочных (по весу) устройствах и т.д.

На рисунке 4.53 в качестве примера показана конструкция осевого пьезодатчика давления.

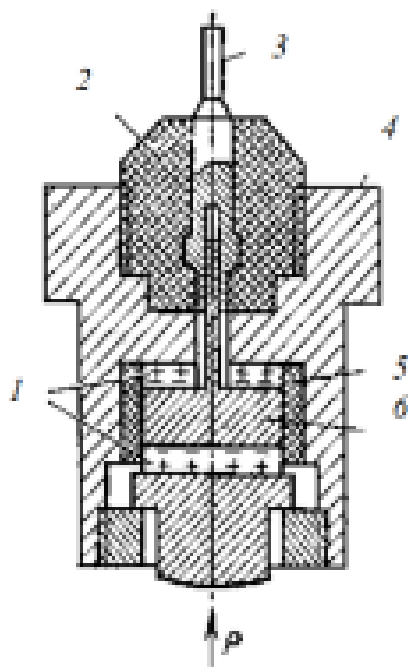


Рисунок 4.53 – Пьезодатчик давления

Его работа заключается в следующем. Под действием измеряемого давления  $P$  на внешней и внутренней сторонах пары пьезопластин 1 возникают электрические заряды, приводящие к возникновению напряжения между выводом 3 и корпусом 4. Это напряжение изменяется пропорционально давлению. На схеме также обозначена гайка из диэлектрика 2, изолятор 5 и

металлический электрод б. В дальнейшем электрические сигналы, полученные с помощью датчика, подвергаются последующей обработке и регистрации различными приборами. Такие датчики применяются для измерения быстроменяющегося давления. При медленном изменении давления возрастает погрешность преобразования из-за «стекания» электрического заряда с пластин на корпус. Конструкции пьезодатчиков, выпускаемых промышленностью, показаны на рисунке 4.54.



Рисунок 4.54 – Пьезодатчики

В заключение следует отметить, что сегодня, в результате бурного развития микроэлектроники и технологий микрообработки появляются новые типы устройств, в том числе преобразователей, называемых датчиками на основе MEMS-технологий. MEMS означает Micro Electro Mechanical Systems (микроэлектромеханические системы).

Например, большее распространение в различных областях техники получают акселерометры-инклинометры. Их принцип действия основан на изменении емкости под действием входной величины. Датчики исполняются в виде интегральных электромеханических устройств и др (рисунок 4.55).

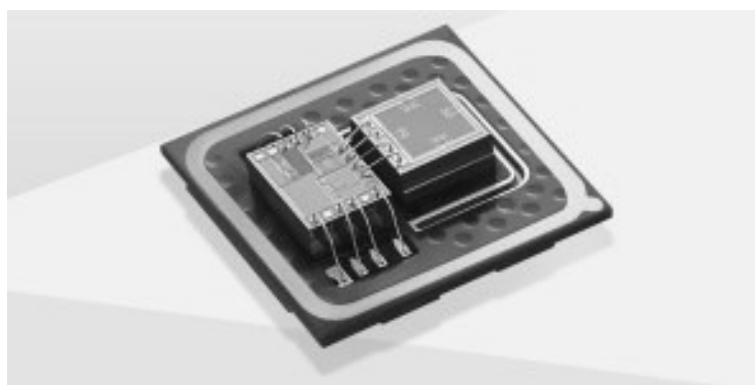


Рисунок 4.56 – Интегральное электромеханическое устройство

Они широко используются для измерения угла крена, сил инерции, ударов и вибрации в автомобилестроении, медицине, промышленном контроле и других приложениях. Ведущими фирмами, выпускающими такие устройства, являются Analog Devices, Freescale Semiconductor и др.

## 4.8 Индукционные датчики

Индукционные датчики относят к датчикам генераторного типа. Принцип их действия основан на явлении электромагнитной индукции, которое было открыто М. Фарадеем в 1831 г. Эффект электромагнитной индукции заключается в том, что при изменении магнитного поля, пронизывающего проводник, в проводнике возникает пропорциональная ЭДС. В индукционных датчиках, в отличие от индуктивных, создается постоянное магнитное поле с помощью постоянного магнита либо катушки, питаемой постоянным напряжением. В стационарном магнитном поле магнитный поток не изменяется. Для создания в замкнутой цепи индукционного тока необходимо перемещать либо проводник в магнитном поле, либо магнитное поле относительно проводника. В качестве проводника применяется катушка индуктивности. Бывают датчики с подвижной и неподвижной катушками.

### 4.8.1 Датчики с подвижной катушкой

Схема датчика с подвижной катушкой и постоянным магнитом показана на рисунке 4.57.

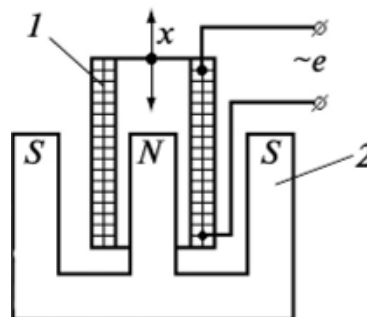


Рисунок 4.57 – Датчик с постоянным магнитом и подвижной катушкой

Согласно схеме, постоянный магнит 2 неподвижен (жестко закреплен). Катушка 1 закреплена на движущейся детали и может перемещаться. Относительное перемещение  $X$  магнита и катушки наводит в катушке ЭДС  $e$ , величина которой пропорциональна скорости перемещения детали:

$$e = lBV,$$

где  $l$  – длина проволоки катушки,

$B$  – величина индукции поля магнита,

$V$  – скорость перемещения катушки.

Такие датчики используются для измерения малых перемещений деталей (нескольких миллиметров).

В электродинамических датчиках для создания постоянного магнитного поля вместо постоянного магнита используется катушка с числом витков  $W_1$ , питаемая постоянным напряжением (рисунке 4.58).

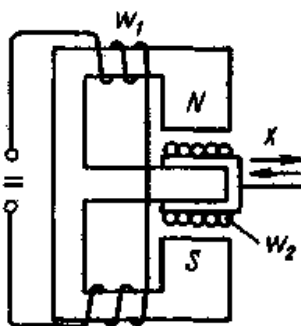


Рисунок 4.58 – Электродинамический датчик с подвижной катушкой

При перемещении  $X$  подвижной катушки с числом витков  $W_2$ , размещенной в воздушном зазоре, в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения.

Индукционные датчики могут также использоваться для измерения угла поворота и скорости вращения катушки. На рисунке 4.59 в качестве примера показана схема индукционного датчика с постоянным магнитом для измерения скорости вращения катушки.



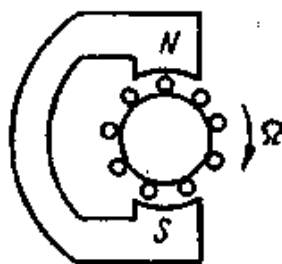


Рисунок 4.59 – Индукционный датчик с постоянным магнитом для измерения скорости вращения катушки

В таких датчиках катушка индуктивности вращается в постоянном магнитном поле. В ней индуцируется ЭДС  $e$ , пропорциональная скорости вращения катушки  $\Omega$ .

Помимо измерения линейных и угловых перемещений, а также скоростей вращения индукционные датчики можно использовать для определения параметров переменных и стационарных магнитных полей. Для этого катушку индуктивности располагают на валу электродвигателя (рисунке 4.60).

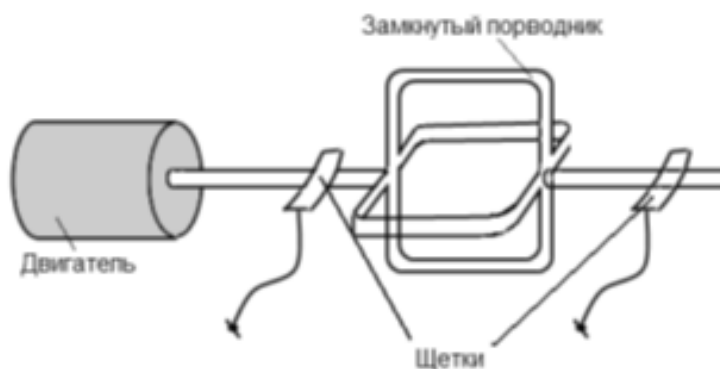


Рисунок 4.60 – Датчик определения параметров магнитных полей

Съем напряжения с вращающейся катушки осуществляется с помощью щеток. При постоянной частоте вращения двигателя напряжение на щетках будет пропорционально интенсивности магнитного поля, пронизывающего катушку.

## 4.8.2 Датчики с неподвижной катушкой

В датчиках с неподвижной катушкой перемещается магнит 1, связанный с перемещающейся деталью, относительно неподвижной катушки 2 (рисунке 4.61). Катушка запитывается переменным напряжением  $e$ .

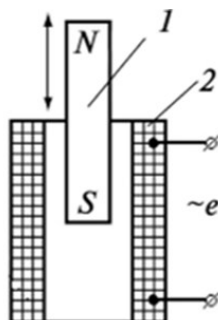


Рисунок 4.61 – Датчик с неподвижной катушкой

Такие датчики часто используют для измерения частоты вращения ротора. Он состоит из катушки с обмоткой, сердечника из магнитомягкого железа и магнита (рисунке 4.62). Эти три компонента составляют статор датчика. Со статором взаимодействует ротор в виде зубчатого диска с определенным количеством зубцов.

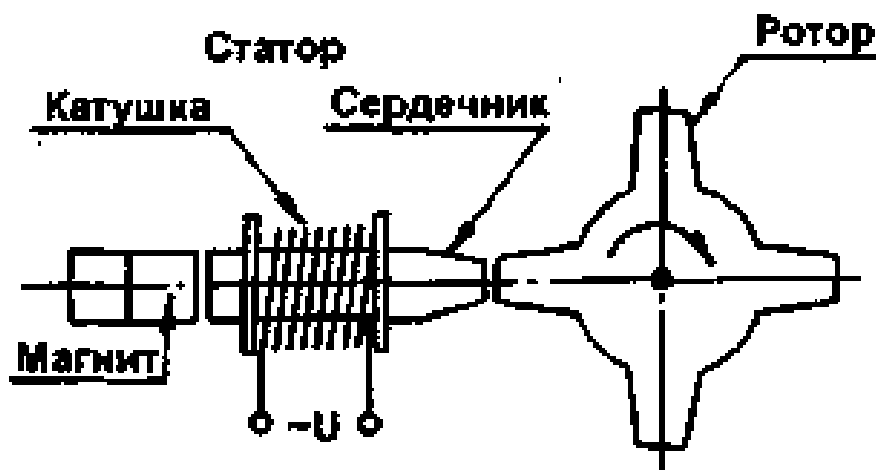


Рисунок 4.62 – Схема для измерения частоты вращения ротора

При вращении ротора, в обмотке статора возникает переменное напряжение  $U$ . Когда один из зубцов ротора приближается к обмотке, напряжение в ней быстро возрастает. При совпадении со средней линией обмотки оно достигает максимума (рисунке 4.63).



Рисунок 4.63 – Напряжение на выходе катушки

Частота этого напряжения зависит от частоты вращения ротора, числа витков катушки и величины магнитного потока постоянного магнита. Поскольку число витков катушки и величина магнитного потока постоянны, то величина индуцируемого напряжения  $U$  пропорциональна скорости вращения ротора.

Индукционные датчики также применяются для измерений вибрации, качания или удара. В автомобильной автоматике они используются как датчики скорости, системы зажигания, системы впрыска топлива, антиблокировочные системы управления тормозами и т.д.

### 4.8.3 Тахогенераторы

Тахогенераторы относятся к генераторным преобразователям. Они представляют собой маломощную электрическую машину, преобразующую частоту вращения какого-либо вала в электрический сигнал. Тахогенераторы применяются для измерения угловой скорости вращения валов, а также в качестве корректирующих элементов стабилизации частоты вращения. Различают тахогенераторы постоянного и переменного тока.

Тахогенераторы постоянного тока бывают с магнитоэлектрическим и электродинамическим возбуждением. Устройство тахогенератора с магнитоэлектрическим возбуждением показано на рисунке 4.64.

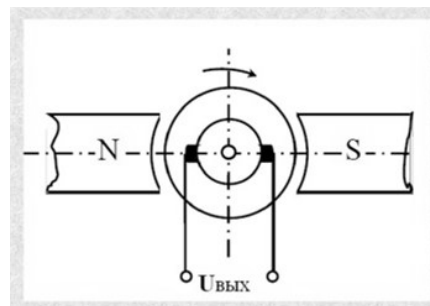


Рисунок 4.64 – Тахогенератор с магнитоэлектрическим возбуждением

Он состоит из постоянного магнита, расположенного на статоре, и измерительной обмотки, расположенной на роторе. Измерительная ЭДС ( $U_{\text{ВЫХ}}$ ) наводится в обмотке ротора тахогенератора и оказывается прямо пропорциональна угловой скорости вращения ротора. Величина и полярность  $U_{\text{ВЫХ}}$  зависят от частоты и направления вращения ротора:

$$U_{\text{ВЫХ}} = F_{\text{rot}} 60 S_t,$$

где  $F_{\text{rot}}$  – частота вращения ротора,

$S_t$  – чувствительность тахогенератора.

Устройство тахогенератора с электродинамическим возбуждением показано на рисунке 4.65.

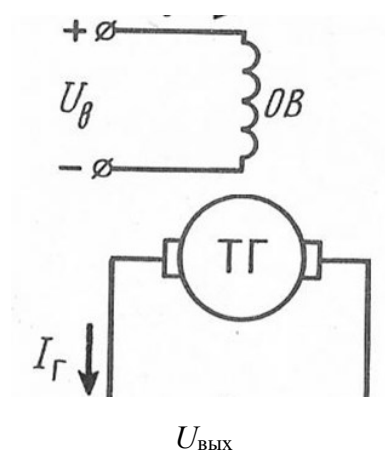


Рисунок 4.65 – Тахогенератор с электродинамическим возбуждением

В отличие от предыдущего в таких тахогенераторах возбуждение осуществляется не от постоянного магнита, а от независимой обмотки ОБ, запитываемой напряжением  $U_B$ .

Достоинствами тахогенераторов постоянного тока являются их надежность, значительная выходная мощность, при относительно малых габаритах и массе, удобная аналоговая форма представления выходного сигнала. Недостатками, прежде всего, является наличие трущихся элементов щёточно-коллекторного узла для снятия выходного напряжения что в свою очередь приводит к появлению дополнительных пульсаций выходного напряжения при вращении ротора, создающие радиопомехи; невозможность измерять медленные вращения (частота вращения ротора обычно от 1500 до 3000  $\text{мин}^{-1}$ ); изменение свойств магнитов из-за старения.

Тем не менее тахогенераторы постоянного тока широко применяются в системах автоматического регулирования, электроприводах, в системах измерений скорости вращения, а также в качестве датчиков обратной связи и т.п.

В конструкциях тахогенераторов переменного тока, в отличие от предыдущих, отсутствует щёточно-коллекторный узел. Это является основным их преимуществом. В зависимости от способа получения выходного сигнала тахогенераторы переменного тока бывают асинхронные и синхронные.

Асинхронные тахогенераторы представляют из себя конструкцию, показанную на рисунке 4.66.

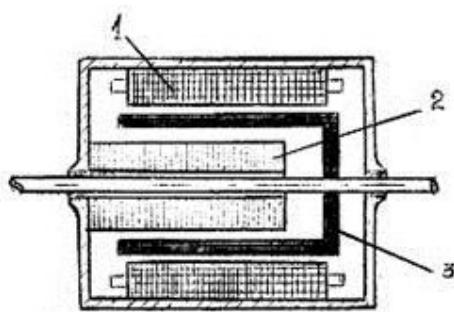


Рисунок 4.66 – Асинхронный тахогенераторы переменного тока

На статоре 1 находятся обмотка возбуждения и сдвинутая относительно нее на  $90^\circ$  выходная (генераторная) обмотка. Между статором 1 и внутренним ферромагнитным сердечником 2 расположен ротор 3, выполненный в виде тонкостенного стакана, который жестко связан с осью вращения тахогенератора. При подаче питающего переменного напряжения на обмотку возбуждения и вращении ротора, в выходной обмотке будет наводиться ЭДС. Ее амплитуда пропорциональна значению угловой скорости вращения ротора. Частота ЭДС равна частоте питания обмотки возбуждения.

В синхронных тахогенераторах, в отличие от асинхронных, ротор представляет собой постоянный магнит (рисунок 4.67).

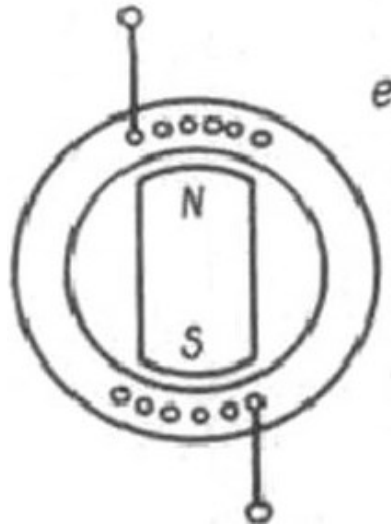


Рисунок 4.67 – Синхронный тахогенератор

Выходная обмотка размещена в пазах статора. При вращении ротора в выходной обмотке тахогенератора индуцируется переменное напряжение, амплитуда и частота зависят от скорости его вращения.

Достоинствами синхронных тахогенераторов является отсутствие необходимости внешнего источника возбуждения. К недостаткам относятся непостоянство частоты выходного сигнала (зависит от скорости вращения), а также нечувствительность к изменению направления вращения вала двигателя.

Тахогенераторы в основном используются для измерения скорости двигателей и других вращающихся устройств. В качестве примера на рисунке 4.68 показан внешний вид тахогенераторов, выпускаемых промышленно.

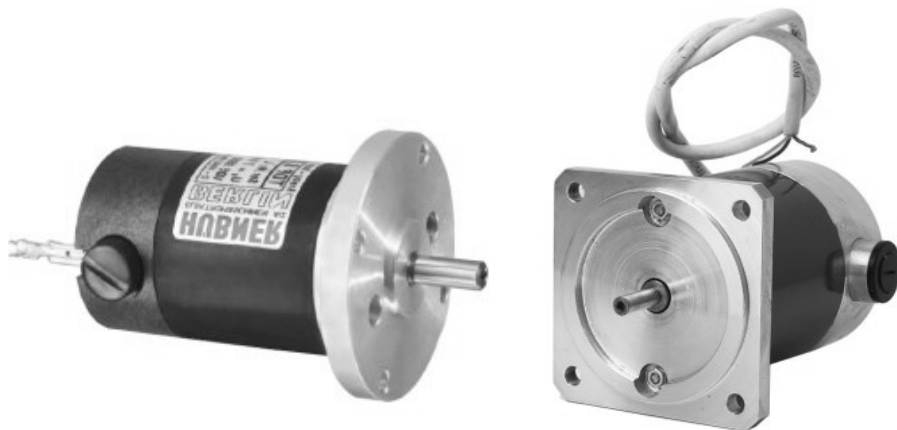


Рисунок 4.68 – Внешний вид тахогенераторов

## 4.9 Струнные датчики

В струнных датчиках в качестве чувствительного элемента применяется электромеханический струнный преобразователь. Принцип действия струнных датчиков основан на зависимости собственной частоты колебаний  $f$  натянутой струны от приложенной к ней силы натяжения  $F$ :

$$f = 0,5 \sqrt{\frac{F}{ml}}$$

Где  $m$  и  $l$  – соответственно масса и длина струны.

Простейшая конструкция струнного датчика показана на рисунке 4.69 и представляет собой вибрирующую струну, один конец которой жестко закреплен в основании, а другой растягивается измеряемой силой.

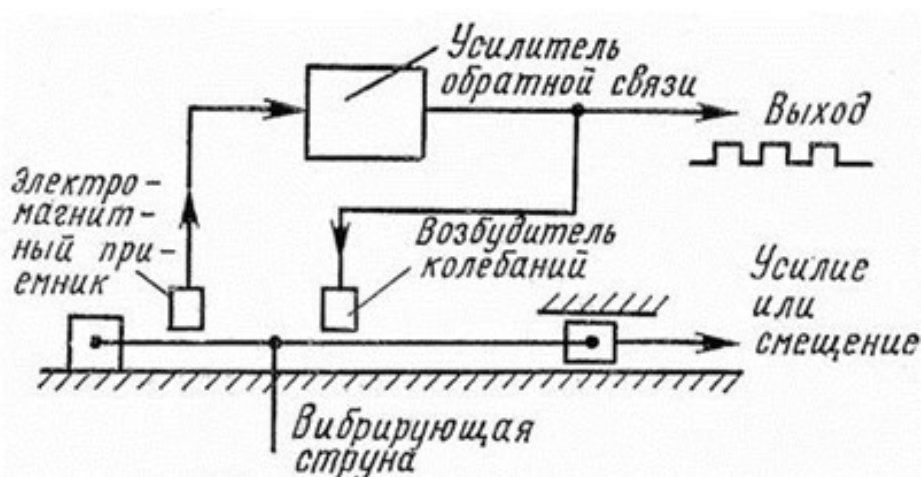
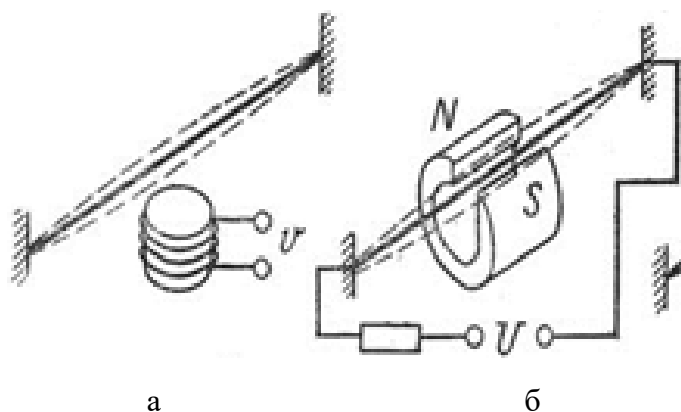


Рисунок 4.69 – Принцип действия струнного датчика

Вблизи струны размещен электромагнитный приемник, сигнал с выхода которого поступает на усилитель с обратной связью. На выходе усилителя снимается сигнал, частота которого пропорциональна измеряемой силе. Этот же сигнал по цепи обратной связи поступает на возбудитель колебаний струны, который необходим для стимулирования ее колебаний. Любые изменения нагрузки на струну будут изменять её натяжение и длину, а, следовательно, и собственную частоту колебаний. Поэтому частота сигналов на выходе усилителя однозначно связана с измеряемым усилием. В качестве возбудителей колебаний чаще всего применяют электромагнитные и магнитоэлектрические возбудители (рисунке 4.70).



а – электромагнитный, б – магнитоэлектрический  
 Рисунок 4.70 – Возбудители колебаний струны

При электромагнитном возбуждении возбуждающее напряжение  $U$  подается на электромагнит. Струны должны обладать высокой прочностью при вибрационных нагрузках, а их упругость не должна зависеть от температуры. Струны изготавливают из ферромагнитных материалов: техническое железо, низкоуглеродистая сталь и т.п. Наибольшее распространение в струнных датчиках получили стальные струны из круглой рояльной проволоки диаметром от 0,1 до 0,3 мм. При длине от 40 до 60 мм в таких струнах возбуждаются колебания с частотой 700-2000 Гц.

При магнитоэлектрическом возбуждении возбуждающее напряжение  $U$  подается непосредственно на струну. Струны изготавливают из неферромагнитного материала: стали, бериллиевой бронзы, вольфрамовых и железокобальтовых сплавов и др.

Погрешность струнных датчиков зависит от длины струны  $L$ : чем она меньше, тем меньше габариты, больше чувствительность и виброустойчивость, но тем больше погрешность. Для обеспечения малой погрешности необходимо чтобы

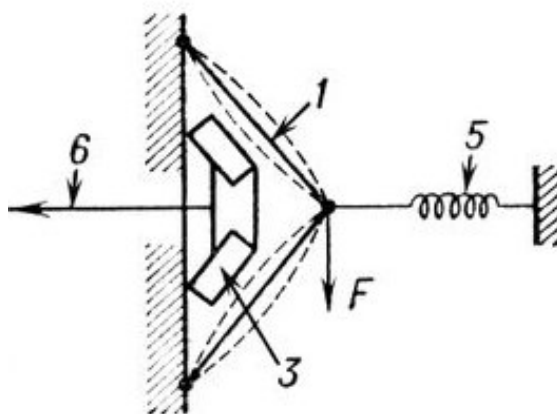
$$L/d \geq 300 \div 500,$$

где  $d$  – диаметр круглой или толщина ленточной струны.

Обычно длина струны не менее 20 мм. Сечение струны выбирается в зависимости от предела изменения натяжения. Например, для бронзы рекомендуется выбирать напряжение не более 0,5% от модуля упругости.



Струнные датчики обеспечивают высокую точность измерений, их погрешность не превышает 0,4%. Для увеличения чувствительности, линейности статической характеристики и точности датчика применяют дифференциальные схемы соединения струн. На рисунке 4.71 показана дифференциальная схема подключения струнного датчика.



1 – две идентичные струны, 2 – корпус, 3 – выходной преобразователь, 4 – мембрана,  
5 – пружина, 6 – выходной сигнал, F – измеряемая сила.

Рисунок 4.71 – Дифференциальная схема соединения струн

Достоинствами струнных датчиков являются их высокая точность, устойчивость к механическим воздействиям, устойчивость влиянию факторов окружающей среды, высокая надежность, длительный срок эксплуатации, низкая стоимость. Струнные датчики используют для измерения силы, давления, перемещения, ускорения, температуры и других неэлектрических величин.

В качестве примера рассмотрим применение струнного датчика для измерения некоторых физических величин.

На рисунке 4.72 показана схема струнного датчика давления.

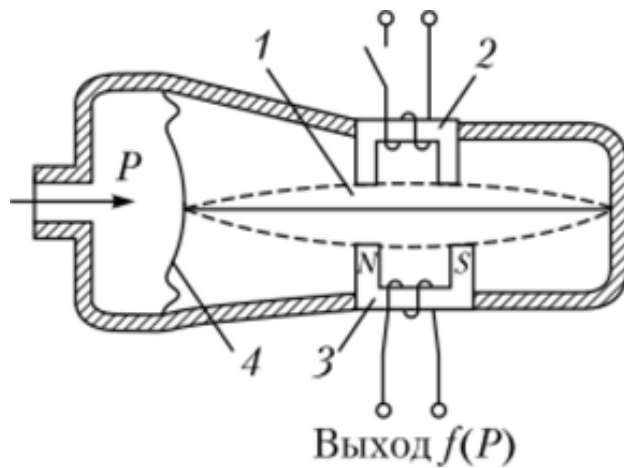


Рисунок 4.72 – Струнный датчик давления

Датчик состоит из струны 1, электромагнитного возбудителя 2 и приемника 3. Одним концом струна жестко закреплена с корпусом, а вторым концом соединена с чувствительным элементом – мембраной-преобразователем 4. При изменении давления  $P$ , действующего на мембрану, меняется натяжение струны. С помощью электромагнитного возбудителя струна выводится из состояния покоя и начинает колебаться с частотой  $f(P)$ , зависящей от давления  $P$ . Приемник 3 преобразует колебания струны в электрический сигнал, той же частоты. В качестве приемника чаще всего используют электромагнитный датчик.

Схема струнного датчика деформации показана на рисунке 4.73.

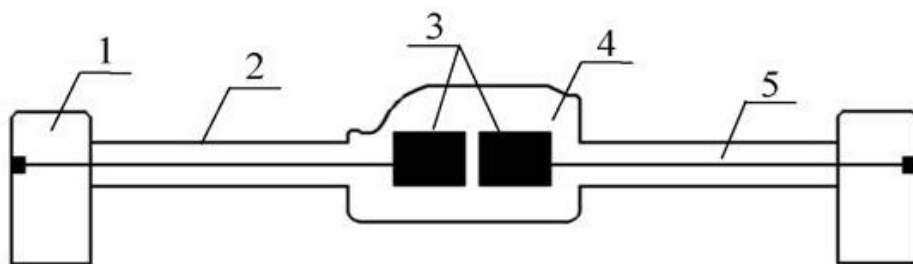


Рисунок 4.73 – Схема струнного датчика деформации

Такой датчик предназначен для измерения деформаций, возникающих в элементах различных строительных конструкций (зданий, сооружений). Он состоит из концевых блоков 1, металлической трубы 2, индукционных катушек 3, защитного корпуса 4 и измерительной струны 5. Струна из высокопрочной металлической проволоки закреплена по обоим концам датчика в концевых

блоках. Блоки жестко крепятся на поверхности контролируемой конструкции (привариваются, приклеиваются). Таким образом, струна находится в механическом контакте с поверхностью конструкции. При деформации поверхности концевые блоки перемещаются относительно друг друга, изменяя силу натяжения струны. Струна возбуждается катушками 3. Частота колебаний струны зависит от ее натяжения. Измерительный сигнал также считывается с электромагнитных катушек, которые поочередно возбуждают струну и снимают сигнал.

На рисунке 4.74 показан внешний вид струнных датчиков, выпускаемых промышленностью.

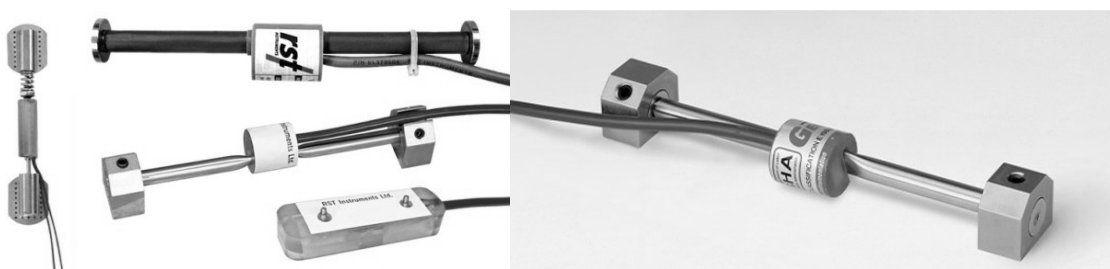


Рисунок 4.74 – Внешний вид струнных датчиков

#### 4.10 Выбор первичных преобразователей

Как уже отмечалось, измерительные преобразователи являются средствами измерений и имеют нормированные метрологические характеристики. По своей сути они являются промежуточным звеном обработки измерительной информации в канале информационно-измерительной системы. Выбор необходимого измерительного преобразователя является довольно сложным процессом, требующим четкого представления об измерительной задаче, решаемой ИИС. В литературе нет общей методики выбора требуемых преобразователей, однако можно выделить ряд общих критериев, которые позволят решить поставленную задачу более успешно при различных подходах. Общим является то, что при выборе первичных измерительных преобразователей следует учитывать ряд факторов метрологического и технологического характера, наиболее существенными из которых являются следующие:

- допускаемая погрешность измерительных устройств и измерительной системы в целом;
- предел измерения первичного измерительного преобразователя, в котором гарантирована необходимая точность измерения;
- инерционность первичного измерительного преобразователя, характеризующаяся постоянной времени;
- влияние на работу первичного измерительного преобразователя параметров контролируемой и окружающей сред (температуры, давления, влажности);
- разрушающее влияние на первичный измерительный преобразователь контролируемой и окружающей сред вследствие абразивных свойств, химического воздействия и других факторов;
- наличие в месте установки первичного измерительного преобразователя недопустимых для его функционирования магнитных и электрических полей, вибраций и др.;
- возможность применения первичного измерительного преобразователя с точки зрения требований пожаро и взрывобезопасности;
- расстояние, на которое должна быть передана информация, полученная с помощью первичного измерительного преобразователя;
- предельные значения измеряемой величины и других параметров, влияющих на работу первичного измерительного преобразователя и др.

Обычно выбор первичных измерительных преобразователей осуществляют в два этапа. На первом этапе выбирают возможные разновидности первичных измерительных преобразователей, способных выполнять аналогичные функции. Например, для измерения температуры можно выбрать термопреобразователь сопротивления или термоэлектрический преобразователь. На втором этапе определяют типоразмер (совокупность технических характеристик) выбранной разновидности первичного измерительного преобразователя. В нашем примере – это, допустим, термопреобразователь сопротивления платиновый с типом термопреобразователя ТСП-0193, т.е. выбор

первичных измерительных преобразователей сводится в основном к выбору первичных измерительных преобразователей с соответствующими техническими характеристиками. Как правило информация об областях и условиях применения первичных измерительных преобразователей наиболее полно приведена в их инструкциях по эксплуатации.

В самом общем случае методика выбора первичных преобразователей сводится к решению следующих измерительных задач.

1. Измерительный преобразователь в составе информационно-измерительной системы должен осуществить возможность преобразования измерительной информации согласно ее структуры, т.е. соответствовать своему функциональному назначению. При этом необходимо рационально выбрать форму обработки измерительной информации: аналоговую или цифровую. Несмотря на то, что цифровые измерительные преобразователи обладают преимуществами: высокая точность, быстродействие, скорость передачи данных и т.п., преобразователи с аналоговым выходным сигналом наиболее дешевы и очень распространены. Современные ИИС нередко оснащаются и цифровыми и аналоговыми измерительными преобразователями.

2. Пределы измерения преобразователя должны охватывать все возможные значения измерительной информации.

3. Измерительный преобразователь должен обеспечивать требуемую точность преобразования. Следует обратить внимание не только на класс выбираемого измерительного преобразователя, но и на факторы, влияющие на дополнительную погрешность: отклонение положения при установке, влияние внешних условий, влияние магнитных и электрических полей, не синусоидальность токов и напряжений т. п.

4. Экономичность (потребление) измерительного преобразователя, его масса, габариты, быстродействие и пр.

5. Функционирование преобразователя не должно влиять на работу ИИС.

6. Преобразователь должен удовлетворять общим техническим требованиям техники безопасности, а также техническим условиям или стандартам.

## 5 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

### 5.1 Задачи преобразования измерительных сигналов

Задачи преобразования измерительных сигналов в информационно-измерительных системах разнообразны и зависят от многих факторов. Основными из них являются: характер контролируемой физической величины, тип и характеристики применяемого первичного преобразователя, параметры самого измерительного сигнала, свойства измерительных каналов, наличие влияющих факторов, вносящих помехи и шумы в измерительные сигналы, требуемая форма представления измерительной информации на выходе измерительной системы и др. Рассмотренные ранее примеры измерительных преобразователей различных физических величин показывают, что у них существуют большие различия в форме и характеристиках измерительных сигналов, в их природе, в уровнях, в характере, в зависимости от внешних факторов и т.п.

Как правило, большинство видов преобразователей, как генераторных, так и параметрических, имеют в своих рабочих диапазонах весьма малые изменения параметров выходных сигналов: напряжения, тока, сопротивления, емкости и т.д. Т.е. выходные сигналы «слабые» и требуют дальнейшей обработки и применения дополнительных цепей преобразования. Основными функциями таких цепей, как правило, являются: преобразование переменного напряжения в постоянное; преобразование сопротивления, емкости, индуктивности в напряжение или ток; масштабирование (деление или усиление); сдвиг уровня; линеаризация; фильтрация; гальваническая развязка и т.п. А поскольку в реальном измерительном сигнале всегда присутствуют шумы, то требуется также решать задачи фильтрации и выделения полезного сигнала. Кроме этого, одной из важнейших функций преобразователей измерительных сигналов является уменьшение погрешностей измерения. Решается эта задача путем использования специальных схемных решений, постоянным совершенствованием электронных компонентов измерительных систем,

конструктивными способами подавления внешних и внутренних помех. В последнее время уменьшение погрешностей измерения решается программными методами с использованием в измерительных каналах микроконтроллеров, а также преобразованием измерительных сигналов в цифровую форму.

Несмотря на широкое разнообразие устройств преобразования сигналов, выделяют ряд типовых функциональных узлов, осуществляющих обработку измерительных сигналов. К ним, в частности, относятся: масштабирующие устройства; выпрямители; генераторы и формирователи импульсов; электронные фильтры; функциональные преобразователи; аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи и др. В настоящее время перечисленные и не перечисленные устройства обработки измерительной информации выпускаются также в интегральном исполнении, что позволяет создавать высококачественные и высокоточные измерительные системы. В данном разделе будут рассмотрены простейшие преобразователи измерительной информации, используемые в ИИС наиболее часто. При этом в зависимости от способов обработки измерительных сигналов различают аналоговые и цифровые преобразователи.

## **5.2 Преобразователи аналоговых сигналов**

Аналоговый сигнал – это сигнал измерительной информации, у которого каждый из представляющих его параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений. Основными операциями преобразования аналогового сигнала являются масштабирование, усиление, фильтрация, сравнение, перемножение и т.д. Название соответствующего преобразователя следует исходя из названия его назначения.

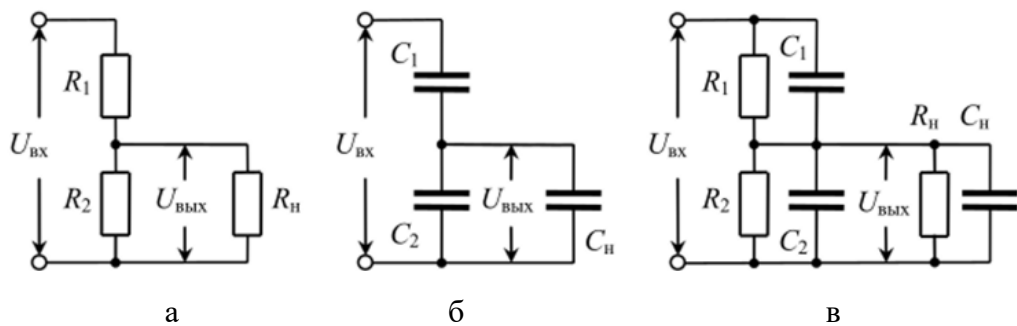
### **5.2.1 Масштабные преобразователи**

Масштабные измерительные преобразователи предназначены для изменения размера измеряемой физической величины в заданное число раз – уменьшения и увеличения. Различают пассивные и активные масштабные преобразователи. К пассивным, не требующим дополнительных источников



питания, относятся делители напряжения, шунты, добавочные сопротивления, трансформаторы тока и напряжения и т.п. К активным – электронные усилители. Рассмотрим некоторые из них.

Делители напряжений. Они предназначены для уменьшения (деления) напряжения в определенное число раз. Основными показателями делителей напряжения являются коэффициент деления (коэффициент передачи) КД; частотный диапазон, в котором сохраняется постоянство КД; допустимая мощность рассеивания; погрешность деления. Простейшими делителями напряжений являются резистивно-емкостные (рисунок 5.1).



а – резистивный делитель напряжения; б – емкостной делитель напряжения; в – резистивно-емкостной частотно-независимый делитель напряжения

Рисунок 5.1 – Резистивно-емкостные делители напряжений

Коэффициент деления резистивного делителя (рисунок 5.1, а) определяется выражением:

$$K_{д} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Такие делители используются, как правило, только для преобразования постоянного напряжения, поскольку при преобразовании переменного напряжения на его коэффициент деления сильное влияние оказывают паразитные емкости (емкости проводов, пайки) (рисунок 5.2).

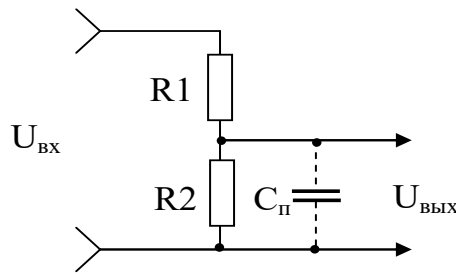


Рисунок 5.2 – Влияние паразитной емкости

При увеличении частоты  $f$  входного переменного напряжения реальный коэффициент деления  $K'$  будет равен

$$K'_{Д} = \sqrt{K_{Д}^2 + (fC_{П}R_1)^2}.$$

Так, если  $R_1 = 9$  МОм,  $R_2 = 1$  МОм,  $C_{П} = 10$  пФ, то на частоте  $f = 1$  кГц коэффициент  $K' = K = 10$ ; на частоте 10 кГц коэффициент  $K' = 11,5$ ; на частоте 100 кГц коэффициент  $K' = 57,5$ . Т.е. с увеличением частоты входного напряжения коэффициент деления резко увеличивается.

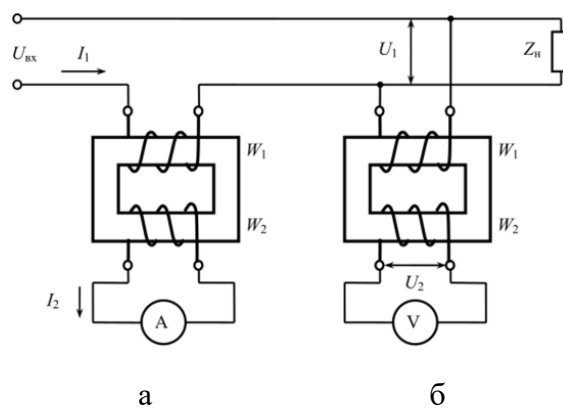
Для преобразования высокочастотных измерительных сигналов используют емкостные делители напряжений (рисунок 5.1, б). У них коэффициент деления неизменен в диапазоне частот до сотен мегагерц:

$$K_{д} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

На рисунке 5.1, в – показана схема частотно-независимого делителя напряжений. Его параметры выбираются из условия

$$R_1C_1 = R_2C_2.$$

*Измерительные трансформаторы.* Они также предназначены для преобразования больших напряжений и токов в относительно малые напряжения и токи в целях. Измерительный трансформатор представляет собой замкнутый сердечник из магнитомягкого материала, на котором размещены две изолированные обмотки с числом витков  $W_1$  и  $W_2$  (рисунок 5.3).



а – трансформатор тока; б – трансформатор напряжения  
 Рисунок 5.3 – Измерительные трансформаторы

В трансформаторах тока (рисунок 5.3, а) обычно первичный ток  $I_1$  больше вторичного  $I_2$ , поэтому  $W_1 < W_2$ , а в трансформаторах напряжения (рисунок 5.3, б) первичное напряжение  $U_1$  больше вторичного  $U_2$ , поэтому у них  $W_1 > W_2$ . Коэффициенты деления измерительных трансформаторов определяются их коэффициентами трансформации, поэтому значения токов и напряжений связаны соотношениями:

$$I_1 = K_I I_2$$

$$U_1 = K_U U_2,$$

где  $K_I$  и  $K_U$  – коэффициенты трансформации по току и напряжению соответственно.

В реальных условиях эксплуатации измерительных трансформаторов номинальные значения коэффициентов трансформации  $K_{Iн}$  и  $K_{Uн}$  отличаются от реальных. Это объясняется характером и значением нагрузки во вторичной цепи, конструкцией трансформатора и другими причинами. Поэтому при преобразовании измерительные трансформаторы вносят методические погрешности по току и по напряжению соответственно:

$$\delta_I = \frac{K_{Iн} - K_I}{K_I}$$

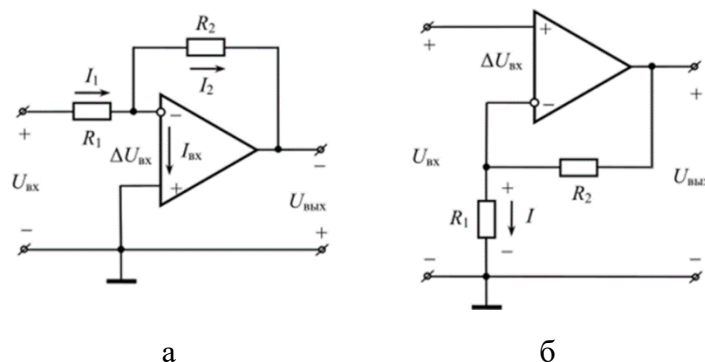
$$\delta_U = \frac{K_{Uн} - K_U}{K_U}$$

Кроме этих погрешностей у измерительных трансформаторов имеется также угловая методическая погрешность, вызванная неточностью передачи фазы напряжения или тока из одной обмотки в другую.

*Усилители.* Измерительные усилители – преобразователи измерительной информации, имеющие калиброванный стабильный коэффициент усиления по напряжению или мощности. Они предназначены для увеличения масштаба измерительного сигнала. Кроме того, усилители обеспечивают согласование входов функциональных узлов измерительного канала с выходами предыдущих каскадов. В зависимости от назначения коэффициент усиления измерительных усилителей может варьироваться в пределах от 1 до  $10^6$ . Измерительный усилитель должен удовлетворять следующим требованиям: стабильными метрологическими характеристиками; линейностью и стабильностью преобразования; обеспечением заданного диапазона усиления; заданным частотным диапазоном; высоким входным и низким выходным сопротивлением. По роду усиливаемого сигнала измерительные усилители делятся на усилители постоянного и переменного тока (напряжения).

*Усилители постоянного тока (УПТ).* Непосредственное усиление сигналов постоянного тока (при малой величине этих сигналов) затруднительно. Это связано с наличием у УПТ дрейфа (нестабильности) выходного уровня напряжения или тока. Дрейфом нуля (нулевого уровня) называется самопроизвольное отклонение напряжения или тока на выходе усилителя от начального значения. Этот эффект наблюдается и при отсутствии сигнала на входе. Поскольку дрейф нуля проявляется таким образом, как будто он вызван входным сигналом УПТ, то его невозможно отличить от истинного измерительного сигнала. Основными причинами дрейфа нуля в УПТ являются: нестабильность источников питания, температурная и временная нестабильности параметров используемых радиоэлементов, низкочастотные шумы, помехи и наводки. При этом наибольшую нестабильность вносят изменения температуры. В связи с этим УПТ обычно используют при больших уровнях измерительных сигналов (единицы и десятки милливольт).

Простейшие УПТ, схемы которых представлены на рис.???, строятся на базе операционных усилителей (ОУ).



а – инвертирующие, б – не инвертирующие

Рисунок 5.4 – Схемы УПТ на базе ОУ

Выходные напряжения этих УПТ определяются соответствующими выражениями:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(1 + R_2/R_1)U_{\text{ВХ}},$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = (1 + R_2/R_1)U_{\text{ВХ}}$$

Как следует из этих выражений коэффициент усиления УПТ определяется соотношением резисторов R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> и может достигать десятки тысяч раз. Кроме того, такие УПТ обладают большим входным сопротивлением (сотни мегаом) и малым выходным (единицы ом).

Однако наилучшими УПТ, построенными на базе ОУ, являются дифференциальные усилители. Они реализуются в виде монолитных ИС и широко выпускаются промышленностью. Такие УПТ отличаются высокой стабильностью работы, малым дрейфом нуля, большим коэффициентом усиления дифференциального сигнала и большим коэффициентом подавления синфазных помех. Дифференциальный усилитель имеет два входа (рисунок 5.5).

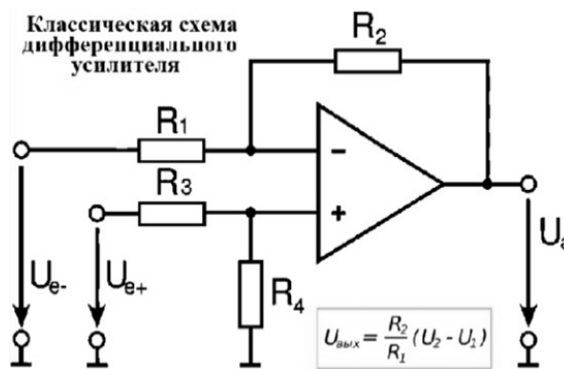


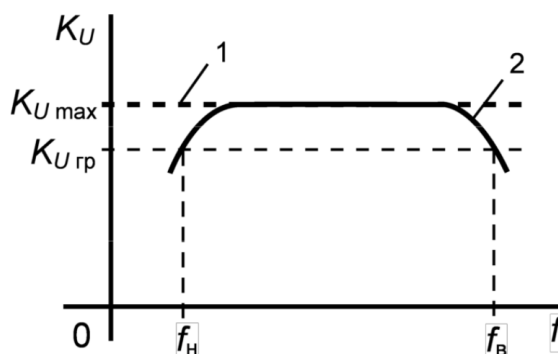
Рисунок 5.5 – Схема дифференциального УПТ на базе ОУ

Его выходной сигнал определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$

Дифференциальные усилители также широко применяются для выполнения различного рода математических операций.

*Усилители переменного тока.* Эти усилители различаются по частотам (низкой и высокой частоты) и по ширине полосы пропускания (избирательные, усиливающие сигналы фиксированной частоты или в узком спектре частот, широкополосные). Типовая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя переменного тока показана на рисунке 5.6.



1 – АЧХ идеального усилителя; 2 – АЧХ реального усилителя

Рисунок 5.6 – АЧХ усилителя переменного тока

На рисунке обозначено:

$K_U$  – коэффициент усиления;

$f$  – частота;

$K_{U_{\text{max}}}$  – максимальный коэффициент усиления;

$K_{U_{гр}}$  – граничный коэффициент усиления,

$$K_{U_{гр}} = \frac{K_{U_{max}}}{\sqrt{2}} \cong 0,707 K_{U_{max}}.$$

$f_{н-}$  – нижняя граничная частота;

$f_{в}$  – верхняя граничная частота.

Для усилителей переменного тока диапазон частот, в пределах которого  $K_U \geq K_{U_{гр}}$ , называется полосой пропускания (усиления) или рабочим диапазоном частот. А диапазон, где  $K_U \leq K_{U_{гр}}$  называется диапазоном подавления. Из рисунка 5.6 также видно, что АЧХ реального усилителя неравномерная. Поэтому для каждого типа усилителя, рассчитанного на усиление сигнала в определенном диапазоне частот, задаются требования в отношении частотной характеристики усиления. Они должны обеспечивать постоянство коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот. Наибольшее применение в измерительных системах нашли широкополосные быстродействующие операционные интегральные усилители.

### 5.2.2 Детекторы

В радиотехнике преобразователи переменного напряжения в постоянное называют также детекторами. Форма переменного, или как еще говорят гармонического, напряжения может быть самой разнообразной: синусоидальной, типа «меандр», колоколообразной, треугольной, в виде последовательности прямоугольных импульсов и т.п. Общим является то, что колебания гармонического напряжения  $U$  характеризуются определенной повторяемостью во времени, т.е.  $U = f(t)$ . На рисунке 5.7 представлен вид произвольного гармонического напряжения и указаны его параметры, установленные ГОСТ 16465-70.

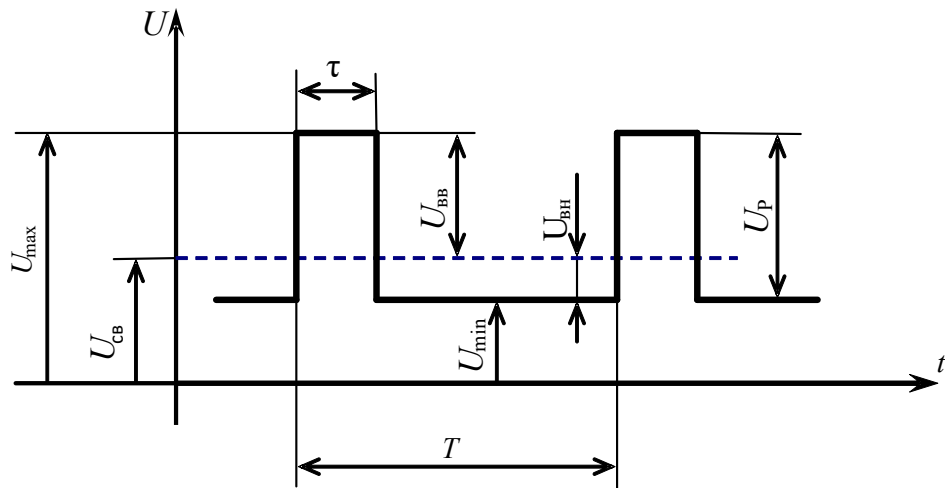


Рисунок 5.7 – Параметры гармонического напряжения

На рисунке обозначено.

Максимальное значение сигнала  $U_{max}$  – наибольшее мгновенное значение сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Минимальное значение сигнала  $U_{min}$  – наименьшее мгновенное значение сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Длительность импульса  $\tau$ .

Период повторения  $T$ .

Средневыпрямленное значение сигнала  $U_{CB}$  – среднее значение модуля сигнала:

$$U_{CB} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt.$$

Пиковое отклонение вверх  $U_{BB}$  – наибольшее мгновенное значение переменной составляющей сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Пиковое отклонение вниз  $U_{BH}$  – наименьшее мгновенное значение переменной составляющей сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Размах сигнала  $U_p$  – разность между максимальным и минимальным значениями сигнала на протяжении заданного интервала времени:

$$U_p = U_{BB} + U_{BH} = U_{max} - U_{min}.$$



Кроме того, в ГОСТ 16465-70 устанавливает следующие характеристики переменного напряжения.

Постоянная составляющая сигнала  $\bar{U}$  (среднее значение за период):

$$\bar{U} = U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$$

Для гармонического сигнала  $\bar{U} = 0$ .

Переменная составляющая сигнала  $U_{\approx}$  – разность между сигналом и его постоянной составляющей:

$$U_{\approx} = U(t) - \bar{U}.$$

Среднеквадратическое (эффективное, действующее) значение сигнала  $U_{\text{ск}}$  – корень квадратный из среднего значения квадрата сигнала:

$$U_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}.$$

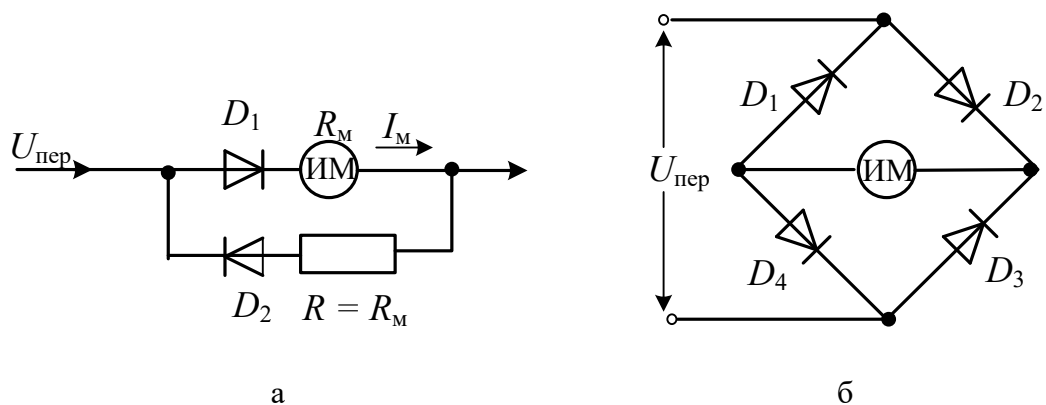
Взаимосвязь указанных параметров определяется коэффициентами амплитуды  $K_a$ , формы  $K_\phi$  и усреднения  $K_y$ :

$$K_a = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{ск}}}; \quad K_\phi = \frac{U_{\text{ск}}}{U_{\text{св}}}; \quad K_y = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{св}}} = K_a K_\phi.$$

В зависимости от того, какому параметру пропорционально напряжение на выходе преобразователя, бывают преобразователи средневыпрямленных значений (СВЗ), пиковые детекторы (амплитудные), среднеквадратических значений (СКЗ) и др.

Детекторы СВЗ – это преобразователи переменного напряжения в постоянное напряжение на выходе которых пропорциональны  $U_{\text{св}}$ .

Они строятся на базе полупроводниковых диодов  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  и  $D_4$  (рисунок 5.8).



а- показана однополупериодная схема, б – двухполупериодная

Рисунок 5.8 – Детекторы СВЗ

В однополупериодной схеме (рисунок 5.8, а) при подаче на вход переменного напряжения  $U_{\text{пер}}$  через измерительный механизм ИМ ток  $I_M$  будет протекать только в одном направлении. При этом сопротивление  $R$  выбирают равным внутреннему сопротивлению измерительного механизма  $R_M$ .

Для увеличения чувствительности детекторов СВЗ применяют мостовые схемы включения (рисунок 5.8, б).

Недостатками детекторов СВЗ являются нелинейная вольтамперная характеристика, временная нестабильность характеристик детектора, температурная нестабильность характеристик детектора, обратные токи диодов.

Пиковые детекторы – это детекторы, выходное напряжение которых соответствует  $U_{\text{max}}$ . Пиковые детекторы относятся к линейным преобразователям. На рисунке 5.9 показана схема пикового детектора с закрытым входом по постоянной составляющей.

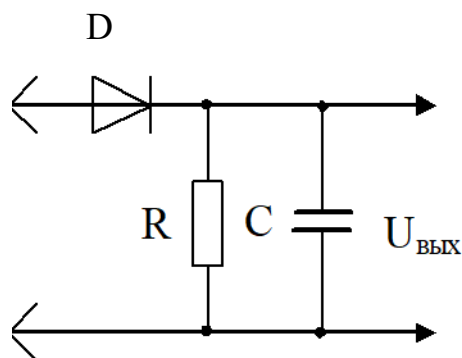


Рисунок 5.9 – Пиковый детектор с закрытым входом

Его принцип работы состоит в заряде конденсатора  $C$  через диод  $D$  до максимального значения напряжения с последующим медленным разрядом через резистор  $R$ . Значение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  будет пропорционально амплитуде входного переменного напряжения.

Детектор СКЗ – это преобразователь на выходе которого напряжение пропорционально  $U_{\text{ск}}$ . Характеристика детектирования в этом случае квадратичная. Наилучшими характеристиками обладают детекторы, построенные с использованием термоэлектрических преобразователей – термопар ТП (рисунок 5.10).

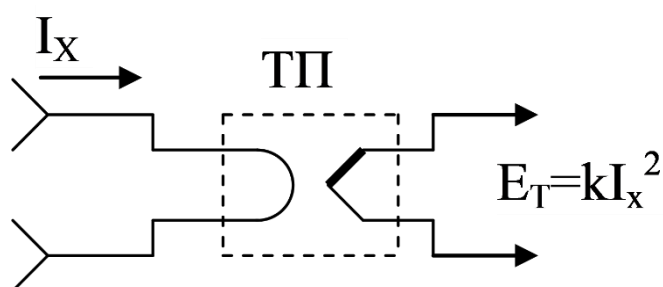


Рисунок 5.10 – Детектор СКЗ

Выходное напряжение  $E_T$  такого детектора будет определяться выражением:

$$E_T = kI_X^2$$

Недостатками термоэлектрических преобразователей являются значительная потребляемая мощность, инерционность, низкая перегрузочная способность.

Зная коэффициенты  $K_a$ ,  $K_\phi$  и  $K_y$  для различных форм гармонических сигналов, а также типы детекторов можно рассчитать некоторые параметры выходных сигналов детекторов.

### 5.2.3 Функциональные преобразователи

Функциональные преобразователи предназначены для реализации определенной математической зависимости между входными и выходными величинами (логарифмической, экспоненциальной, линейно-ломанной функции и т.п.). Правило преобразования (функция преобразования) может

быть задано аналитически, графически или таблично. В качестве примера рассмотрим функциональный преобразователь типа «логарифм».

Логарифмический преобразователь представляет собой электронное устройство, в котором выходное напряжение пропорционально логарифму входного сигнала. На рисунке 5.11 показана схема логарифмического преобразователя на ОУ.

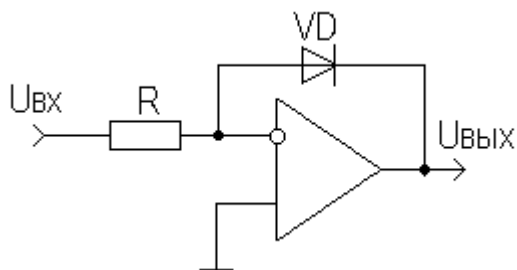


Рисунок 5.11 – Схема логарифмического преобразователя

Выходное напряжение логарифмического преобразователя определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{U_{\text{вх}}}{R I_0}\right)$$

где  $U_{\text{вх}}$  – входное напряжение;

$U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура, К;

$q$  – заряд электрона;

$R$  – входное сопротивление;

$I_0$  – обратный ток диода.

При температуре  $T = 20^\circ\text{C}$  коэффициент  $kT/q = 25$  мВ.

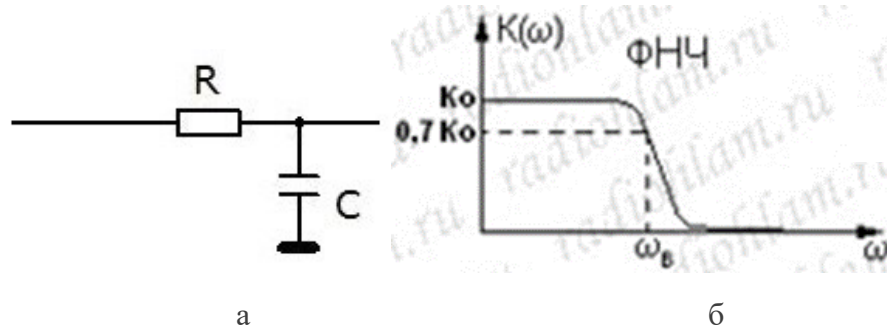
Таким образом, схема с ОУ осуществляет логарифмирование входного сигнала. Недостатком данной схемы является резкое увеличение коэффициента передачи при значении входного сигнала, близком к нулю. Для устранения этого недостатка применяют более сложные схемы, например, с двумя диодами.

## 5.2.4 Электрические фильтры

Электрические фильтры применяются для простейших преобразований измерительных сигналов путем выделения определенных диапазонов частот и подавления других. Использование фильтров позволяет решать различные задачи: подавления помех (выделение частотной области, соответствующей полезному сигналу, и подавление сигналов помех на других частотах), нормирования измерительных сигналов (например, при подаче на вход АЦП), дифференцирования и интегрирования сигналов, частотного анализа и др. Различают пассивные и активные фильтры. Пассивные реализуют на основе RC и LRC цепей. Активные строят с использованием активных электронных компонентов (транзисторов, микросхем и т.п.).

Рассмотрим основные виды простейших пассивных электрических фильтров.

Электрическая схема пассивного RC фильтра нижних частот (ФНЧ) и его амплитудно-частотная характеристика  $K(\omega)$  показаны на рисунке 5.12.

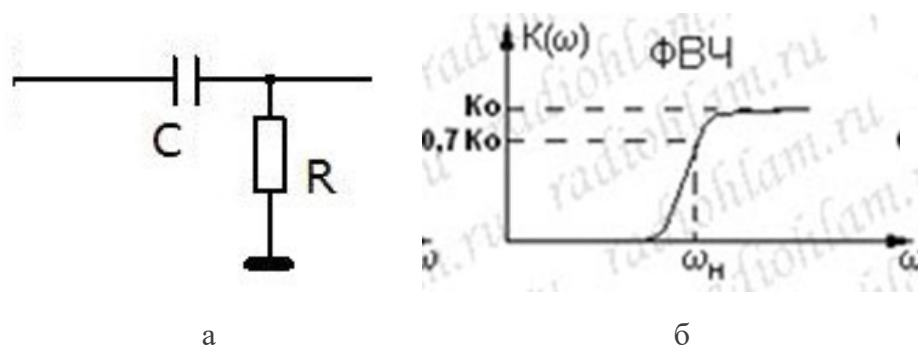


а – электрическая схема, б – амплитудно-частотная характеристика

Рисунок 5.12 – Фильтр нижних частот

Как видно из рисунка, ФНЧ подавляет высокие и пропускает низкие частоты.

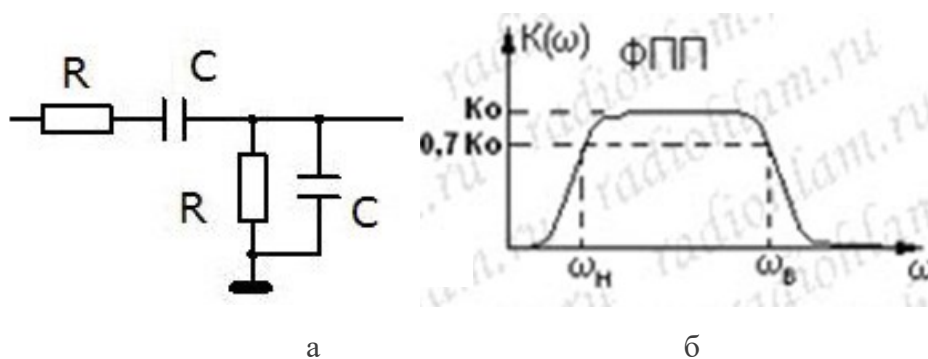
Пассивный фильтр верхних частот (ФВЧ) подавляет низкие и пропускает высокие частоты (рисунок 5.13).



а – электрическая схема, б – амплитудно-частотная характеристика

Рисунок 5.13 – Фильтр верхних частот

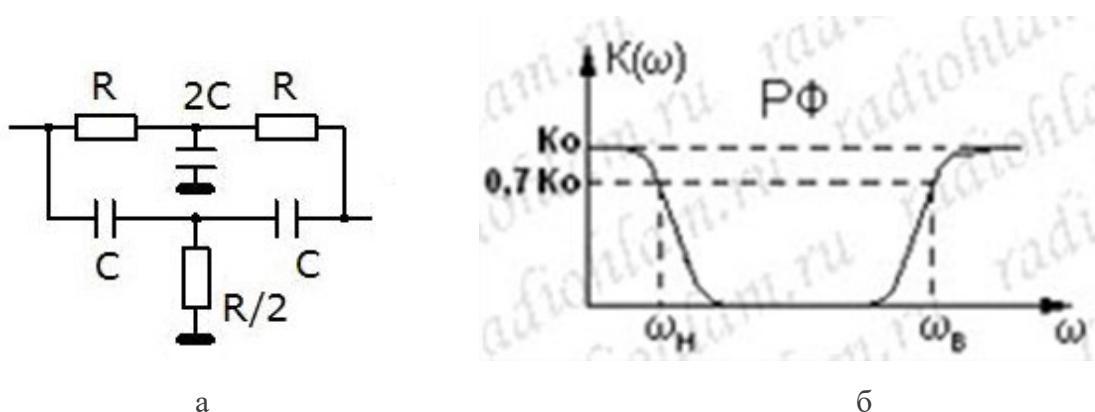
Пассивный полосовой фильтр (ФПП) пропускает частоты в полосе от нижней граничной частоты  $\omega_H$  до верхней граничной частоты  $\omega_B$  рисунок 5.14



а – электрическая схема, б – амплитудно-частотная характеристика

Рисунок 5.14 – Фильтр пассивный полосовой

Пассивный режекторный фильтр, или фильтр-пробка не пропускает частоты в диапазоне от  $\omega_H$  до  $\omega_B$  рисунок 5.15.



а – электрическая схема, б – амплитудно-частотная характеристика

Рисунок 5.15 – Режекторный фильтр

На всех рисунках  $K_0$  – коэффициент преобразования фильтра. Полосы частот отсчитывают от  $0,7 K_0$ . Резонансные частоты  $f_r$  (частоты среза) для всех перечисленных типов фильтров рассчитывается по формуле:

$$f_r = 1/2\pi RC$$

На практике реализовать фильтры с идеальными АЧХ, показанными на рисунках, нереально. Поэтому при проектировании фильтров стараются как можно ближе приблизиться к идеальной характеристике. Чем ближе реальные характеристики АЧХ фильтров к идеальным, тем лучше они будут исполнять функции фильтрации сигналов.

## **6 АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

### **6.1 Структуры аналоговых измерительных приборов**

Как отмечалось ранее, по своему устройству измерительные приборы бывают аналоговые и цифровые. Сегодня, в связи с интенсивным развитием науки и производства цифровая техника завоевывает все большие ниши. Однако, несмотря на интенсивное развитие цифровой техники аналоговая не теряет своей актуальности. Это касается и аналоговых измерительных приборов. Так, существует ряд измерительных задач, где применение аналоговых приборов предпочтительней, например, при наблюдении качественного изменения измерительного сигнала. Аналоговые измерительные приборы, как правило, обеспечивают выполнение прямых измерений. Отсчет результата измерений производится по шкале. Режим измерений, выполняемых аналоговыми средствами измерений – статический. Большинство аналоговых измерительных приборов – стрелочные с неподвижной шкалой и подвижного указателя (стрелки). Иногда шкала перемещается относительно неподвижной стрелки. В любом случае взаимное перемещение функционально связано со значением измеряемой величины.

Поскольку в большинстве случаев измерительная информация представляется в виде электрических сигналов, то рассмотрим измерительные приборы именно этого класса, называемые аналоговыми электроизмерительными приборами (АЭП).

Аналоговые приборы делят на четыре основные группы, предназначенные для различных измерительных целей. В первую входят приборы для измерения параметров и характеристик сигналов (например, осциллографы, вольтметры, частотомеры, анализаторы спектра и т. д.). Вторую группу образуют приборы для измерения параметров и характеристик элементов электрических цепей (измерители сопротивления, емкости, индуктивности и т.п.). Третью группу составляют измерительные генераторы, являющиеся источниками сигналов



различной амплитуды, формы и частоты. В четвертую группу входят преобразователи измерительной информации. Их мы рассматривали ранее.

По принципу действия аналоговые приборы бывают прямого действия (прямого преобразования) и приборы сравнения (компенсационного преобразования).

Прибором прямого действия называется измерительный прибор, в котором производится одно или несколько преобразований измеряемой информации в одном направлении, т.е. без применения обратной связи (рисунок 6.1).

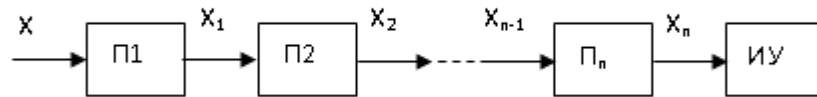


Рисунок 6.1 – Прибор прямого преобразования

Схема состоит из  $n$  последовательно соединенных преобразователей  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$  и индикаторного устройства (ИУ). Измеряемая величина  $X$  последовательно преобразуется в преобразователях в выходной сигнал  $X_n$ , который отображается на ИУ. С учетом поступления помех на входы преобразователей структурную схему измерительного прибора прямого действия можно представить в виде, показанном на рисунок 6.2.

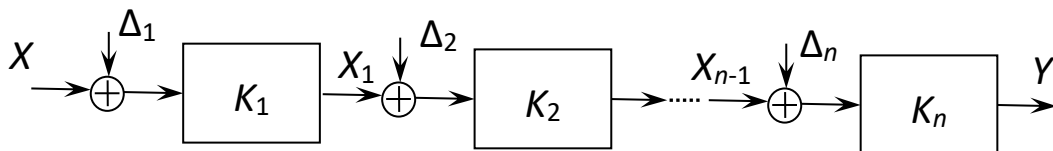


Рисунок 6.2 – Влияние помех на погрешность прибора прямого преобразования

На схеме также показаны погрешности  $\Delta_i$ , вносимые каждым  $i$  – тым преобразователем. Коэффициент усиления  $K_i$  каждого преобразователя определяется выражением:

$$K_i = \frac{X_i}{X_{i-1}}.$$

А коэффициент преобразования  $K$  всего прибора записывается как:

$$K = \prod_{i=1}^n K_i.$$

Таким образом, исходя из вышесказанного суммарная погрешность прибора, учитывающая погрешности, вносимые каждым преобразователем, определяется выражением:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_1 + \frac{\Delta_2}{K_1} + \frac{\Delta_3}{K_1 K_2} + \frac{\Delta_n}{\prod_{i=1}^{n-1} K_i}.$$

Как следует из этого выражения, суммарная погрешность прибора зависит от погрешностей  $\Delta_i$ , вносимых каждым преобразователем и от их коэффициентов усиления.

Прибором сравнения (компенсационного преобразования) называется измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно. Известная величина воспроизводится с помощью меры. Схема прибора сравнения показана на рисунок 6.3.

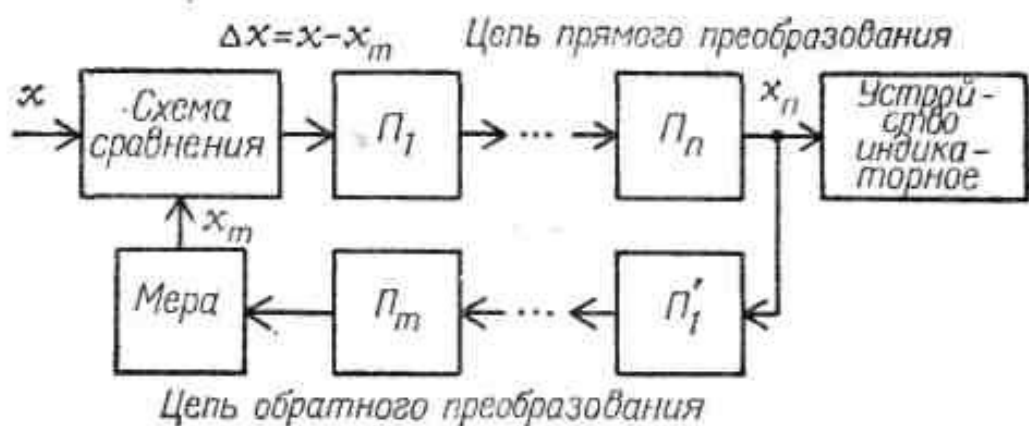


Рисунок 6.3 – Схема прибора сравнения

Согласно рисунку, приборы сравнения имеют цепи прямого и обратного преобразования. Измеряемая величина подвергается прямому преобразованию в преобразователях  $\Pi_1 \dots \Pi_n$  и по цепи обратной связи сигнал  $X_n$  через преобразователи  $\Pi'_1 \dots \Pi'_m$  управляет значением меры. При полной компенсации в установившемся режиме, когда  $\Delta X = X - X_m$ , индикаторное устройство будет показывать «0».

При этом результат измерения снимается с показаний меры  $X = X_m$ . Это, в частности, реализация нулевого метода измерений. Поскольку некоторые разновидности и принципы работы измерительных преобразователей были рассмотрены ранее, то интерес представляет рассмотрение принципов построения индикаторных устройств аналоговых измерительных приборов.

## 6.2 Индикаторные устройства

В аналоговых измерительных приборах качестве индикаторных устройств используют электромеханические измерительные механизмы (ЭМИМ). Они являются основными элементами электроизмерительных приборов прямого действия. Отсчетное устройство ЭМИМ состоит из шкалы и указателя. В большинстве случаев подвижная часть осуществляет вращательное движение, поэтому результат измерения однозначно связан с углом поворота. Угол поворота определяется моментами, которые действуют на подвижную часть. Момент, возникающий над действием токов и напряжений, функционально связанных с измеряемой величиной, называют вращающим. Вращающий момент связан с энергией, накопленной в измерительном механизме. В самом общем случае эта энергия равна:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i U_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m L_i I_i^2 + \sum_{i,j=1}^k M_{ij} I_i I_j$$

где  $n$  – количество изолированных частей, накапливающих электрический заряд;

$U_i, C_i$  – потенциалы и емкости этих частей;

$m$  – количество замкнутых контуров;

$I_i, L_i$  – токи и индуктивности контуров;

$k$  – количество взаимосвязанных контуров;

$M_{ij}$  – коэффициенты взаимной индукции.

Если ЭМИМ включить в цепь постоянного или переменного тока, то под действием вращающего момента подвижная часть повернется по отношению к неподвижной. Вращающий момент определяется для любой конструкции из общего уравнения динамики:

$$M_B = \frac{\partial W}{\partial \alpha},$$

где  $\alpha$  – угол поворота подвижной части.

Если на подвижную часть измерительного механизма будет действовать только вращающий момент, то подвижная часть повернется до упора.

Помимо вращающего момента на подвижную часть механизма действует противодействующий момент, который направлен на встречу вращающему. Чаще всего вращающий момент создается противодействующими пружинами спиральной формы. В этом случае противодействующий момент определяется углом поворота и коэффициентом упругости пружины:

$$M_{\Pi} = K_y \alpha,$$

где  $K_y$  – коэффициент упругости пружины.

Если измеряемый сигнал на измерительный механизм не подается, то  $M_B=0$ . В этом случае стрелка должна находиться на нулевой отметке шкалы. Корректировка начального положения стрелки осуществляется перемещением точки закрепления пружины. У измерительных механизмов эта регулировка осуществляется специальным корректирующим винтом.

При воздействии двух моментов (вращающего и противодействующего) подвижная часть устанавливается в положении, при котором выполняется условие равновесия

$$|M_B| = |M_{\Pi}|$$

Обычно стараются обеспечить, чтобы вращающий момент не зависел от угла поворота подвижной части. В общем случае угол поворота подвижной части ИМ определяется выражением

$$\alpha = \frac{1}{K_y} \frac{\partial W}{\partial \alpha}.$$

Его называют уравнением измерения.

Таким образом, при подаче сигнала измерительной информации на ЭМИМ на подвижную часть одновременно начинают действовать два момента. Поскольку подвижная часть обладает определенной массой (т.е. инерционна), то состояние равновесия наступает не сразу, а сопровождается определенным переходным процессом, который может иметь колебательный характер. Для уменьшения длительности переходных процессов в состав измерительных механизмов вводят специальные устройства – успокоители. А из-за наличия трения в подвижной части, а также потерь в успокоителе имеет место вариация показаний ЭМИМ.

В зависимости от принципа действия различают следующие основные ЭМИМ:

- магнитоэлектрические (МЭИМ);
- электродинамические (ЭДИМ) и ферродинамические;
- электромагнитные (ЭМИМ);
- электростатические (ЭСИМ);
- индукционные и др.

Приборы, измеряющие отношения двух электрических измеряемых величин  $X_1$  и  $X_2$ , называются логометрами. В логометрах в обесточенном состоянии подвижная часть может находиться в любом положении. Угол поворота подвижной части логометра определяется выражением:

$$\alpha = F (K X_2 / X_1),$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Логометры могут реализовываться на базе различных ЭМИМ.

Рассмотрим принцип действия наиболее распространенного механизма – магнитоэлектрического (МЭИМ).

Принцип действия основан на взаимодействии токов, протекающих в контуре с полем постоянного магнита (рисунок 6.4). Подвижными могут быть как контуры с током, так и постоянные магниты.

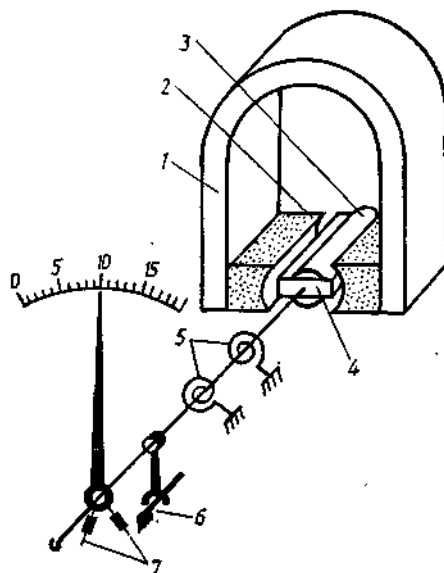


Рисунок 6.4 – Магнитоэлектрический измерительный механизм с подвижным контуром

Обычно постоянный магнит неподвижен. Магнитная система МЭИМ образуется постоянным магнитом 1, полюсными наконечниками 2 с цилиндрической расточкой и неподвижным сердечником 3 цилиндрической формы из магнитомягкого материала. Благодаря такой конструкции в воздушном зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается практически равномерное радиальное магнитное поле, в котором свободно поворачивается катушка 4. Она образуется тонким медным проводом, намотанным на бумажный или алюминиевый каркас прямоугольной формы. К катушке приклеивают алюминиевые буксы, в которых закрепляются полуоси (или растяжки) подвижной части механизма. Противодействующий момент создается спиральными пружинами 5, через которые в обмотку катушки подается измеряемый ток. Для создания успокоительного момента  $M_y$  используется короткозамкнутый виток, размещаемый на катушке. Эксцентрический винт 6

образует корректор (для начальной установки стрелки на нуль), а грузики-противовесы 7 служат для балансирования подвижной части МЭИМ.

Важно то, что МЭИМ является «измерителем» постоянного тока, причем небольшого: от 50 до 100 мкА. Его уравнение измерения определяется выражением:

$$\alpha = \frac{Bs\omega}{k_y} I_x = S_I I_x,$$

где  $B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре;

$s$  – площадь катушки,

$\omega$  – число витков обмотки катушки.

$\alpha$  – угол отклонения стрелки

$k_y$  – коэффициент упругости пружины.

$I_x$  – измеряемый ток.

Величина  $S_I = \frac{Bs\omega}{k_y}$  называется чувствительностью механизма по току.

Особенности свойств магнитоэлектрических приборов, определяющих возможности их применения, приведены ниже.

1. Магнитоэлектрические приборы по принципу работы ИМ являются амперметрами. При изменении направления  $I_x$  изменяется и направление отклонения подвижной части МЭИМ. Из-за инерционности подвижной части отклонение стрелки прибора при включении его в цепь переменного тока будет равно нулю. Поэтому область применения магнитоэлектрических приборов без преобразователей рода тока ограничивается измерением постоянного тока и напряжения.

2. Чувствительность по току магнитоэлектрических приборов постоянна, а, следовательно, шкала приборов является равномерной. Это большое достоинство магнитоэлектрических приборов, обеспечивающее не только удобство при работе с ними, но и высокую точность. Другими факторами, позволяющими изготавливать магнитоэлектрические приборы самых высоких классов точности, являются сильное собственное магнитное поле (исключающее

влияние на показания прибора посторонних полей), высокая стабильность элементов ИМ, возможность компенсации температурной погрешности и др.

3. Наличие сильного собственного магнитного поля определяет еще одно важное достоинство магнитоэлектрических приборов — высокую чувствительность по току. В этом отношении они не имеют себе равных. Хотя магнитоэлектрические приборы в принципе являются амперметрами, с помощью простой измерительной цепи они легко трансформируются в вольтметры.

4. Регулировка чувствительности (т.е. установление ее номинального значения), осуществляется изменением магнитной индукции в воздушном зазоре. Это осуществляется путем перемагничивания постоянных магнитов, либо с помощью магнитных шунтов. Через магнитный шунт замыкается часть силовых линий магнитного поля. При перемещении шунта изменяется индукция в воздушном зазоре.

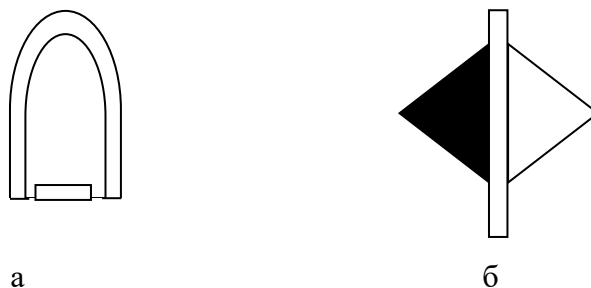
Источниками погрешностей МЭИМ являются трение в опорах, старение постоянного магнита и противодействующих пружин, градуировка шкалы, изменение температуры окружающей среды и др.

К основным достоинствам МЭИМ относятся высокая чувствительность и точность (погрешность составляет до 0,05%), малое собственное потребление мощности, равномерность шкалы, слабое влияние внешних магнитных полей, хорошее успокоение подвижной части.

Недостатками являются сложность конструкции и относительно высокая стоимость, пригодность для измерения только в цепях постоянного тока, невысокая перегрузочная способность (т.к. ток к рамке подводится через противодействующие пружины).

Тем не менее МЭИМ наиболее широко применяются в различных измерительных приборах. На рисунке 6.5 показаны условные обозначения, наносимые на их шкалах.

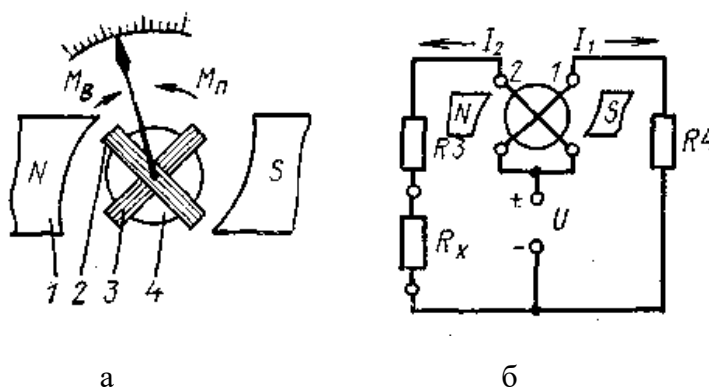




а – с неподвижным магнитом, б – с подвижным магнитом

Рисунок 6.5 – Обозначения, наносимые на шкалы МЭИМ

На базе магнитоэлектрических измерительных механизмов могут строиться логометры. Магнитоэлектрические логометры имеют подвижную часть, состоящую из двух катушек 1 и 2, укрепленных на общей оси (рисунок 6.6).



а – конструкция, б – электрическая схема

Рисунок 6.6 – Магнитоэлектрический логометр

Токи к катушкам подводятся через мягкие проводники, не создающие противодействующие моменты. Особенностью магнитной системы является нецилиндрическая расточка полюсных наконечников магнита. За счет этого магнитная индукция в зазоре  $B$  зависит от угла поворота  $\alpha$  подвижной части:

$$M_B = B_1(\alpha)S_1w_1I_1 \quad \text{и} \quad M_P = B_2(\alpha)S_2w_2I_2,$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – соответственно магнитная индукция в воздушном зазоре для 1-ой и 2-ой катушек;

$S_1$  и  $S_2$  – площади катушек;

$w_1$  и  $w_2$  – число витков обмоток катушек;

$I_1$  и  $I_2$  – токи, протекающие в катушках.

Направления токов в катушках выбирается так, чтобы моменты имели встречное направление. В момент равновесия  $M_B = M_P$ , уравнение измерения логометра имеет вид:

$$\alpha = F_1(I_2 / I_1).$$

Из этого выражения следует, что отклонение подвижной части магнитоэлектрического логометра пропорционально отношению токов, протекающих через катушки. Обычно логометры используются для измерения больших сопротивлений, например в мегаомметрах. Так, при подключении логометра по схеме, показанной на рисунок 6.6, б – токи будут определяться следующими выражениями:

$$I_2 = U / (R_2 + R_3 + R_x), \quad I_1 = U / (R_1 + R_4).$$

Поскольку сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_4$  постоянны, то угол отклонения стрелки  $\alpha$  логометра будет зависеть только от значения измеряемого сопротивления  $R_x$  и не зависеть от напряжения  $U$  и его стабильности:

$$\alpha = F_2 [(R_2 + R_4) / (R_1 + R_4 + R_x)].$$

В измерительных приборах также широко используются электродинамические (ЭДИМ) и ферродинамические измерительные механизмы. Их принцип действия основан на взаимодействии магнитных полей подвижной и неподвижной катушек с токами. Они отличаются от магнитоэлектрических механизмов тем, что магнитное поле создается не постоянным магнитом, а током  $I_{x1}$ , протекающим по неподвижной катушке. Неподвижная катушка обычно выполняется из двух частей, что позволяет изменять структуру магнитного поля (рисунок 6.7).

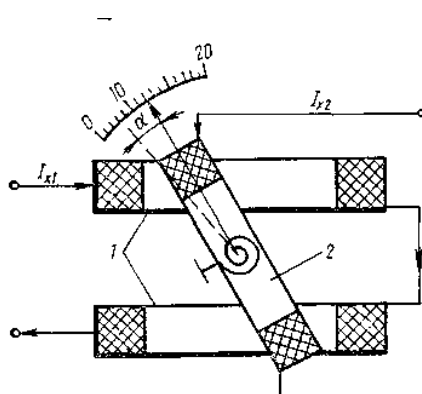


Рисунок 6.7 – Электродинамический измерительный механизм

К подвижной катушке ток  $I_{x2}$  подводится также через противодействующие пружины. Уравнение измерения ЭДИМ имеет вид:

$$\alpha = \frac{1}{K_y} \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} I_{x1} I_{x2}$$

где  $M_{12}$  – коэффициент взаимоиндукции катушек.

Как следует из этого уравнения угол отклонения подвижной части механизма пропорционален произведению токов, подаваемых на катушки. Если подать на измерительный механизм переменные токи, то условие равновесия будет выполняться для среднего вращающего момента. Уравнение измерения в этом случае будет иметь вид:

$$\alpha = \frac{1}{K_y} \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} I_1 I_2 \cos \phi,$$

где  $I_1, I_2$  – действующие или среднеквадратические значения токов в катушках,

$\phi$  – угол сдвига фаз между токами в катушках.

Особенностями ЭДИМ является следующее.

1. Угол отклонения подвижной части определяется произведением токов в катушках. Поэтому шкала неравномерная. Кроме того, неравномерность шкалы определяется изменением коэффициента взаимоиндукции.

$$\frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} \neq const$$

2. ЭДИМ обладает фазочувствительными свойствами.

3. На переменном и постоянном токе показания ЭДИМ одинаковые.

Достоинствами таких механизмов является достаточно высокая точность и стабильность показаний, возможность использования в цепях постоянного и переменного тока.

К недостаткам относятся малая чувствительность, большая потребляемая мощность (до нескольких десятков ватт), зависимость показаний от внешних магнитных полей (на показания может оказывать влияние даже магнитное поле

земли), неравномерность шкалы, чувствительность к перегрузкам, зависимость показаний от частоты.

В зависимости от подключения обмоток ЭДИМ применяются для измерения токов, напряжений и мощности в цепях постоянного и переменного токов (в частотном диапазоне до 5 кГц). На шкалах ИМ наносится условное обозначение, показанное на рисунке 6.8.

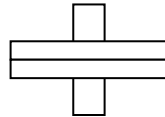


Рисунок 6.8 – Условное обозначение ЭДИМ

Механизмы ферродинамической системы отличаются от электродинамических тем, что неподвижная катушка имеет магнитопровод из магнитомягкого листового материала, благодаря чему обеспечивается большой магнитный поток, (а, следовательно, и вращающий момент) и равномерность магнитного поля в воздушном зазоре. При этом

$$\frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} = const$$

Уравнение измерения ферродинамического механизма имеет вид:

$$\alpha = \frac{C}{K_y} I_1 I_2 \cos \varphi$$

где  $C$  – постоянный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами.

Достоинствами такого механизма по сравнению с ЭДИМ являются меньшая восприимчивость к внешним магнитным полям, большая чувствительность и меньшее собственное потребление мощности. К недостаткам можно отнести более низкую точность и ухудшение частотных свойств. На шкале ферродинамических механизмов наносится обозначение, показанное на рисунке 6.9.

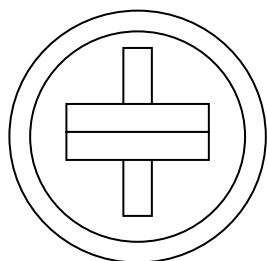


Рисунок 6.9 – Ферродинамический измерительный механизм

Принцип работы электромагнитного измерительного механизма основан на взаимодействии магнитного поля катушки с током и ферромагнитного сердечника. Подвижным элементом является ферромагнитный сердечник, перемещающийся в магнитном поле катушки, по обмотке которой протекает измеряемый ток. На рисунке 6.10 показан один из наиболее распространенных конструктивных вариантов такого механизма – с плоской катушкой 1, в зазор которой при протекании измеряемого тока втягивается сердечник 2, эксцентрично укрепленный на оси.

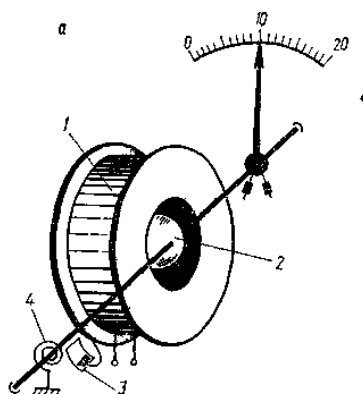


Рисунок 6.10 – Схема ЭМИМ

Для создания успокоения подвижной части механизма используется воздушный успокоитель 3. Это самый простой тип измерительных механизмов, имеющий к тому же хорошую перегрузочную способность (измеряемый ток подается в катушку не через спиральные пружины 4).

Уравнение измерения ЭМИМ имеет вид:

$$\alpha = \frac{1}{2K_y} \frac{\partial L}{\partial \alpha} I^2$$

Как следует из уравнения угол отклонения подвижной части  $\alpha$  и измеряемый ток  $I$  связаны квадратичной зависимостью. Выбором формы сердечника можно получить почти равномерную шкалу.

Достоинствами ЭМИМ являются пригодность для измерения как постоянного, так и переменного тока, слабая чувствительность к токовым перегрузкам (т.к. ток через противодействующие пружины не протекает), простота конструкции и невысокая стоимость.

К недостаткам относятся низкие чувствительность и точность, значительное собственное потребление мощности, неравномерность шкалы, подверженность влиянию внешних магнитных полей, значительное влияние температуры окружающей среды.

Обозначение, наносимое на шкалах таких приборов, показано на рисунке 6.11.

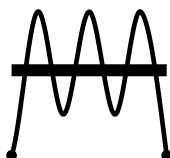


Рисунок 6.11 – Обозначение ЭМИМ

В электростатических измерительных механизмах вращающий момент создается в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых подвижна. Неподвижная система состоит из одной или нескольких камер 1 (рисунке 6.12) в которые входят пластины подвижной системы 2.

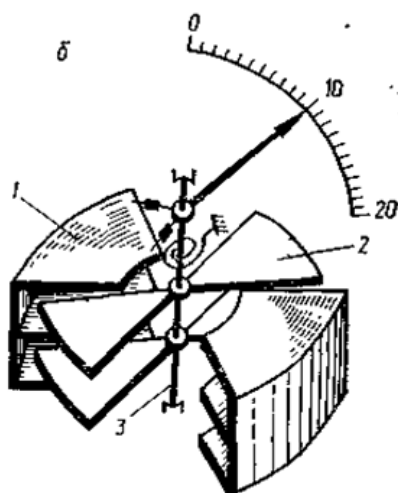


Рисунок 6.12 – Схема ЭСИМ

Если к системам 1 и 2 поднести измеряемое напряжение  $U$ , то они будут заряжаться противоположными по знаку зарядами, и под действием электростатических сил притяжения подвижные пластины будут втягиваться в камеры неподвижных. Таким образом, электростатические приборы по принципу своей работы могут измерять только напряжение. Вращающий момент связан с изменением емкости системы. Уравнение измерения ЭСИМ имеет вид:

$$\alpha = \frac{1}{2K_y} \frac{\partial C}{\partial \alpha} U^2$$

Из уравнения видно, что угол отклонения подвижной части пропорционален квадрату измеряемого напряжения. Изменением формы пластин можно линеаризовать шкалу.

Достоинствами ЭСИМ являются их пригодность для измерения постоянного и переменного напряжения, малая мощность собственного потребления, независимость показаний от частоты и формы измеряемого напряжения, большой диапазон измеряемых напряжений (до нескольких сотен кВ). К недостаткам относятся низкая чувствительность, подверженность влиянию внешних электромагнитных полей и влиянию изменению параметров атмосферы (температурная зависимость незначительна).

ЭСИМ обычно применяются для измерения высоких постоянных и переменных напряжений. На шкалах приборов наносится обозначение, показанное на рисунке 6.13.

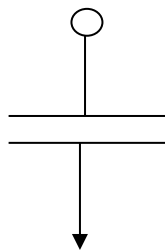


Рисунок 6.13 – Обозначение ЭСИМ

В заключение отметим, что каждый тип измерительного прибора, выпускаемый промышленностью, имеет свое обозначение, которое состоит из буквы и последующим за ней числом, например, М24 (МЭИМ), Э515 (ЭМИМ), С15 (ЭСИМ) и др.



## 7 ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Рассмотренные ранее электромеханические измерительные механизмы являются оконечными устройствами аналоговых измерительных приборов. Они были первыми измерительными устройствами, разработанными более 200 лет назад. Конструкции этих приборов в процессе исторического развития совершенствовались, благодаря чему была достигнута достаточно высокая точность (относительная погрешность до 0,1 %). Измерение с такой точностью и в настоящее время удовлетворяет многим потребностям практики, поэтому аналоговые измерительные приборы и в настоящее время широко распространены и выпускаются промышленностью различных стран в достаточно больших количествах.

Между тем с развитием техники и технологий, прежде всего радиотехники и электроники, ставится задача проводить измерения с более высокой точностью. Однако отсчетные устройства аналоговых приборов (МЭИМ) ограничивают возможность уменьшения погрешностей.

Рассмотрим пример. Пусть требуется разработать аналоговый измерительный прибор с классом точности 0,01 ( $\gamma = 0.01 \%$ ). Поскольку разрешающая способность глаза человека  $\Delta l \approx 0,5$  мм, то для обеспечения заданной точности шкала прибора  $l$  должна составлять  $l = (\Delta l / \gamma) 100 = 0,5$  м, что, вполне понятно, нереально.

Указанные принципиальные ограничения могут быть преодолены в мостовых схемах и компенсаторах. Однако измерения с помощью таких приборов достаточно продолжительны, что во многих случаях нежелательно или недопустимо.

Преодолеть эти трудности (повышение точности и быстродействия измерения) удалось только с помощью цифровых измерительных приборов (ЦИП), которые появились в широком ассортименте в 60-х годах XX века. В настоящее время они получили весьма широкое распространение в различных областях человеческой деятельности. Основными достоинствами цифровых измерительных приборов являются высокая точность, высокое быстродействие,

возможность запоминания, ввода в ЭВМ и обработки измерительной информации, удобство измерений (отсутствует субъективная погрешность).

### 7.1 Обобщенная структурная схема цифрового измерительного прибора

Цифровой измерительный прибор – это средство измерения, автоматически вырабатывающее сигналы измерительной информации в цифровой форме. Его структурная схема приведена на рисунок 7.1.

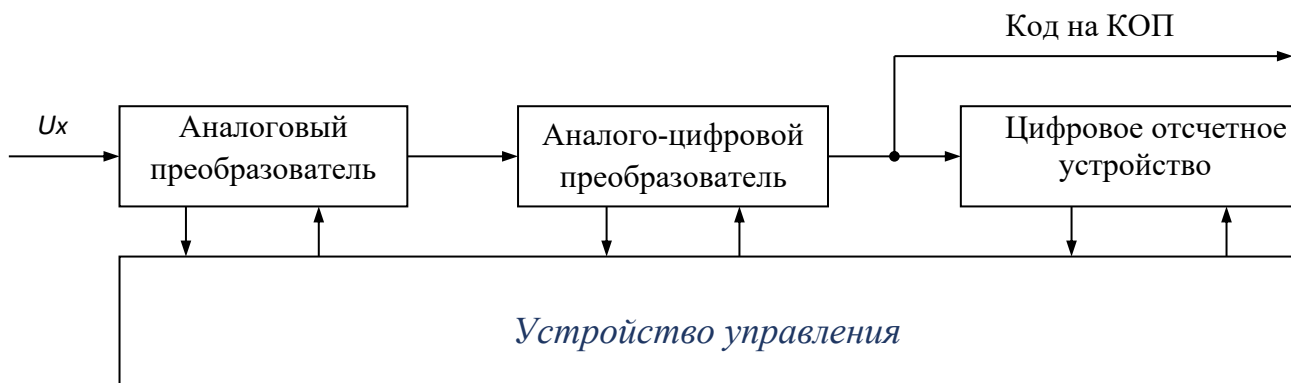


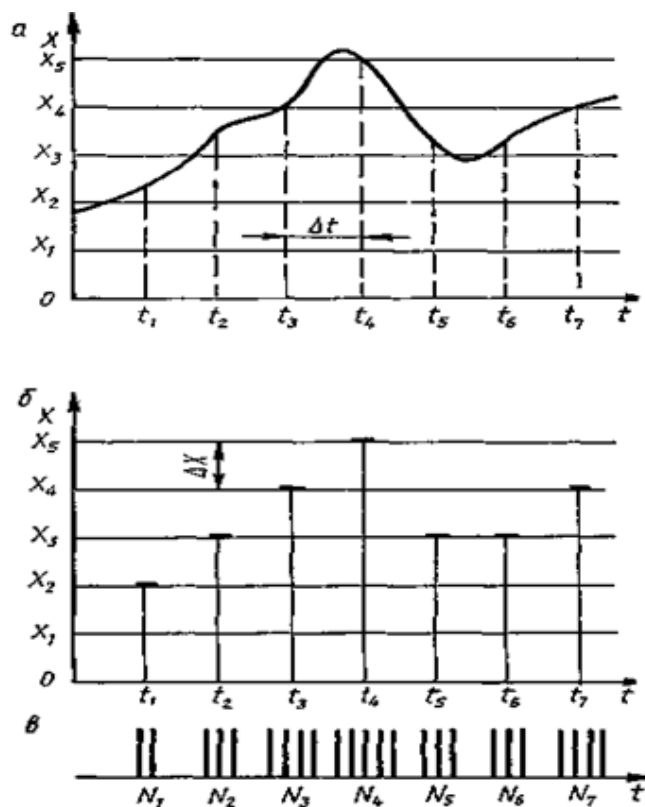
Рисунок 7.1 – Обобщенная структурная схема ЦИП

В состав схемы входят следующие основные узлы: аналоговый преобразователь, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифровое отсчетное устройство (ЦОУ) и устройство управления (УУ). Рассмотрим назначение и основные операции, выполняемые в каждом узле.

Аналоговый преобразователь обеспечивает согласование ЦИП с объектом измерения, а также осуществляет аналоговые преобразования измеряемой аналоговой величины в другую аналоговую величину, удобную для работы АЦП. Конкретные виды преобразований зависят от измеряемой физической величины. Общим является то, что при большом многообразии измеряемых физических величин они в конечном счете преобразуются: в частоту следования коротких импульсов  $f$ ; во временной интервал  $\Delta T$ ; в постоянное напряжение  $U$ ; в пространственное (угловое или линейное) положение и т.п.

Аналого-цифровой преобразователь предназначен для преобразования аналоговой величины в цифровой код. В общем случае этот процесс включает дискретизацию измеряемой величины по времени, квантование по уровню и цифровое кодирование. На вход АЦП подается измеряемая аналоговая величина,

а на выходе получается ее цифровой код. Поскольку входная величина  $X$  может принимать любые значения, то в общем случае она изменяется во времени (рисунок 7.2, а). При этом в АЦП осуществляются следующие преобразования этой величины.



а – дискретизация, б – квантование, в – кодирование

Рисунок 7.2 – Аналого-цифровое преобразование

Дискретизация – операция, в результате которой сохраняются мгновенные значения непрерывной величины в отдельные моменты времени  $t_1 \dots t_n$  (рисунок 7.2, а), называемые моментами дискретизации. Интервал времени между двумя последовательными моментами дискретизации называют шагом дискретизации  $T_{д.} = \Delta t$ .

Квантование – это замена мгновенных значений ближайшим значением из известной совокупности фиксированных уровней квантования (рисунок 7.2, б). Эта операция осуществляется в течение некоторого времени, называемого временем преобразования.

Кодирование – это преобразование квантованных значений в цифровой код. В ЦАП применяется унитарный и двоично-десятичный коды.

Унитарный код – это преобразование квантованных значений в пропорциональное число импульсов (рисунок 7.2, в). Унитарный код всегда преобразуется в двоично-десятичный. Такое преобразование осуществляется с помощью декадных счетчиков. В АЦП, сопрягаемых с ЭВМ, применяют двоичные коды. Следует отметить, что при выполнении дискретизации и квантования появляются специфические погрешности, которые характерны для всех АЦП, а значит и для ЦАП.

Во-первых, так как измерения осуществляются в дискретные моменты времени (моменты дискретизации), то судить об изменяющейся во времени величине по этим значениям можно только приближенно. Преобразование происходит в определенный промежуток времени, в течение которого измеряемая величина изменяет свое значение (рисунок 7.3).

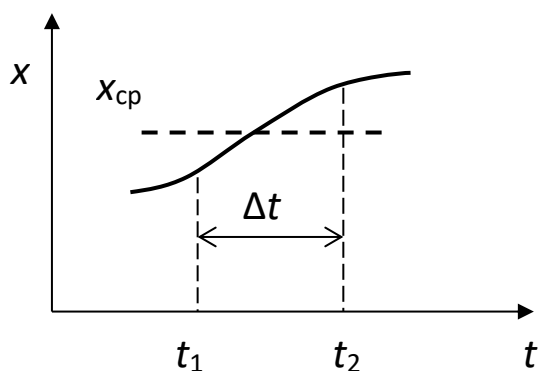


Рисунок 7.3 – Динамическая погрешность преобразования

При этом выходная величина АЦП может определяться либо мгновенным значением измеряемой величины в момент времени  $t_2$ , либо ее средним значением за время  $\Delta t$ . Эти значения приписываются моменту времени  $t_1$ . Такие погрешности называются динамическими. Если измеряемая величина постоянна во времени, то они отсутствуют. Для уменьшения динамической погрешности необходимо уменьшать время преобразования.

Во-вторых, цифровым приборам присуща погрешность квантования (дискретности), которая обусловлена заменой непрерывной величины значением, соответствующим определенному квантованному уровню. Эта погрешность зависит от шага квантования. Минимально достижимые границы

погрешности составляют половину шага квантования. Следует заметить, что при измерении с помощью аналоговых СИ имеет место аналогичная погрешность, которая обусловлена округлением отсчитываемого со шкалы результата измерения. Эти округления (обычно с точностью до половины или четверти деления) производятся оператором, поэтому носят субъективный характер. Это обстоятельство часто не учитывают при проведении измерений с помощью аналоговых приборов. При градуировке шкалы СИ цена деления выбирается такой, чтобы погрешность округления не была определяющей.

В цифровом отсчетном устройстве осуществляется преобразование двоично-десятичного кода, поступающего с выхода АЦП, в сигналы, управляющие работой цифрового индикатора, на котором отображается результат измерения.

Большинство ЦИП дополнительно имеют цифровой выход (КОП – канал общего пользования), на который подается двоично-десятичный код результата измерения.

Устройство управления управляет работой всего прибора. В качестве примера рассмотрим два случая осуществления управления периодичностью измерений, т. е. моментами дискретизации:

1. Моменты дискретизации не зависят от поведения измеряемой величины, а определяются УУ. Такой режим называется циклическим, и он реализован в большинстве современных ЦИП. При этом обычно предусматриваются автоматический и разовый режимы работы. В автоматическом режиме периодичность измерений (шаг дискретизации) определяется УУ. Чаще всего предусматривается плавная регулировка шага дискретизации. В разовом режиме каждое измерение (преобразование) осуществляется при поступлении импульса запуска, который подается на специальный вход прибора с какого-либо внешнего устройства или при нажатии специальной кнопки «Пуск».

2. В следящем режиме каждый очередной отсчет (момент дискретизации) происходит при изменении измеряемой величины на значение шага квантования.

При реализации такого режима применяют специальные АЦП. Этот режим используется редко.

В заключение отметим, что приборы, построенные по схеме, приведенной на рисунке 7.1, называют приборами с жесткой логикой. Однако в последние годы все более широкое распространение получают ЦИП, построенные на основе микропроцессоров. Такие приборы называют приборами с программируемой логикой, и они имеют иную структуру. Главным элементом, определяющим работу и основные технические и метрологические характеристики ЦИП, является его АЦП. По роду преобразуемой величины АЦП подразделяются на следующие виды: Времяимпульсные, частотно-импульсные, кодоимпульсные, пространственного кодирования и др. Принципы, заложенные в работу АЦП, следуют из их названий.

## **7.2 Времяимпульсные АЦП**

Наибольшее распространение получили времяимпульсные АЦП. На их вход с аналогового преобразователя, как правило, подается постоянное напряжение, пропорциональное измеряемой физической величине. Это напряжение преобразуется в пропорциональный временной интервал, который затем заполняется последовательностью счетных импульсов известной частоты (отсюда и название АЦП). Далее идет подсчет числа этих импульсов с помощью счетчика. Такие АЦП бывают двух типов: с линейным развертыванием и с двухтактным интегрированием.

### **7.2.1 Времяимпульсные АЦП с линейным развертыванием**

Структурная схема АЦП с линейным развертыванием приведена на рисунок 7.4.

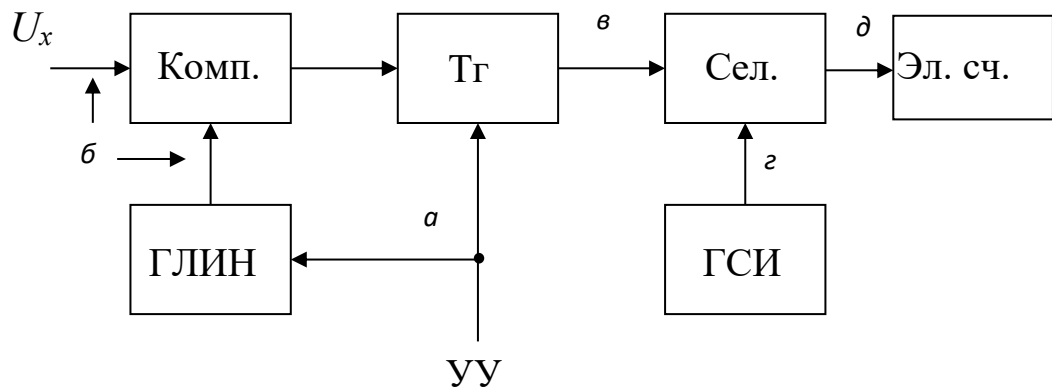


Рисунок 7.4 – Времяимпульсный АЦП с линейным развертыванием

На вход преобразователя поступает постоянное измеряемое напряжение  $U_x$ , а с выхода снимается пачка импульсов. Количество импульсов  $N$  в пачке пропорционально  $U_x$  (унитарный код). Временные диаграммы, поясняющие принцип работы, приведены на рисунке 7.5.

По приходу импульса запуска с устройства управления (рисунок 7.4, *а*) запускается генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), выходное напряжение которого поступает на один из входов компаратора. Кроме того, импульс запуска переводит триггер (ТГ) в единичное состояние (рисунок 7.4, *в*) и открывает селектор. Через селектор на электронный счетчик (Эл. сч.) начинают поступать импульсы счета от генератора счетных импульсов (ГСИ) с периодом  $T_{СИ}$ . Измеряемое напряжение  $U_x$  подается на второй вход компаратора и в момент времени, когда напряжение  $U_{ГЛИН}$  станет равным  $U_x$  (рисунок 7.4?, *б*) на выходе компаратора появляется напряжение, которое опрокидывает триггер в нулевое состояние, селектор закрывается и счет прекращается.

Селектор открыт в течение времени  $\Delta t$ . Таким образом, напряжение преобразовано во временной интервал. Одновременно этот временной интервал преобразуется в унитарный код. На выходе селектора получается пачка из  $N$  импульсов:

$$N = \frac{\Delta t}{T_{СИ}} = \frac{U_x}{ST_{СИ}} = U_x \frac{F_{сч}}{S},$$

где  $F_{СИ} = 1/T_{СИ}$  – частота счетных импульсов;

$S = U_{ГЛИН} \times \text{tg}\alpha$  – крутизна пилообразного напряжения.

Это выражение и есть уравнение измерения, из которого следует, что  $N$  пропорционально  $U_x$ .

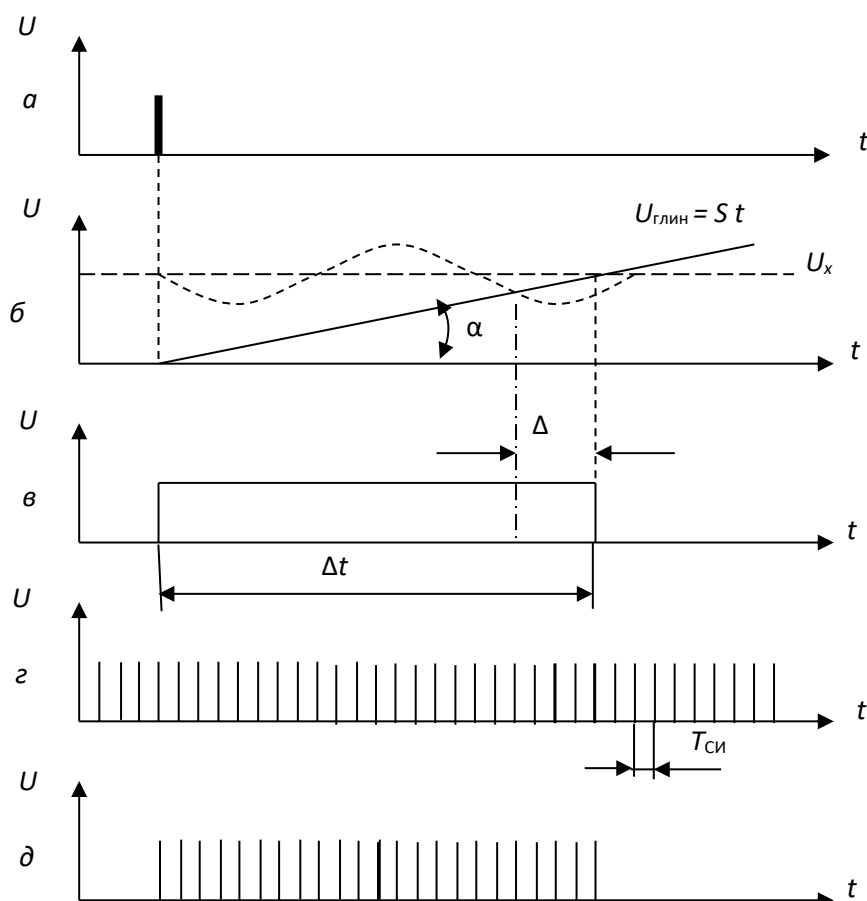


Рисунок 7.5 – Временные диаграммы работы АЦП с линейным развертыванием

Основными источниками погрешностей АЦП данного типа являются нестабильность частоты ГСИ, нелинейность ГЛИН и нестабильность крутизны пилообразного напряжения, погрешность дискретности, равная единице младшего разряда. За один цикл преобразования он позволяет измерять мгновенное значение напряжения. Достоинствами АЦП с линейным развертыванием является его быстродействие (до 10 тыс. преобразований в секунду), а основным недостатком – низкая помехозащищенность. Для защиты от помех на входе АЦП (в аналоговом преобразователе) включают фильтры.

### 7.2.2 Время импульсные АЦП с двухтактным интегрированием

Структурная схема АЦП с двухтактным интегрированием показана на рисунке 7.6. Данный преобразователь состоит из следующих основных



элементов: электронного ключа  $S$ ; интегратора; устройства сравнивающего (компаратора); управляющего устройства; генератора счетных импульсов; селектора, счетчика и индикатора.

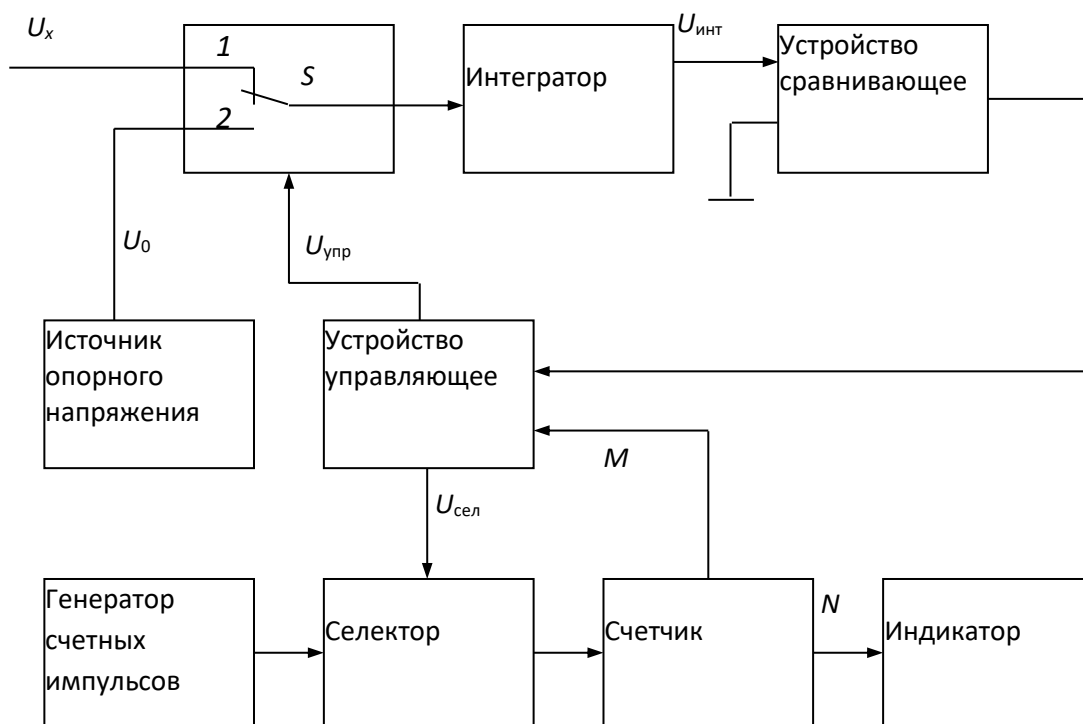


Рисунок 7.6 – Структурная схема АЦП с двухтактным интегрированием

В данном АЦП преобразование происходит в два этапа (два такта интегрирования). Начало очередного цикла измерения начинается с поступлением импульса управления (рисунок 7.7). По этому сигналу ключ  $S$  переводится в положение 1, на входе интегратора начинает действовать напряжение  $U_x$ . Одновременно открывается селектор, и на вход счетчика поступают импульсы ГСИ. Под действием напряжения  $U_x$  напряжение на выходе интегратора  $U_{инт}$  изменяется по линейному закону. Окончание первого такта интегрирования определяется сигналом «Конец». В качестве этого сигнала используется импульс переполнения счетчика (сигнал  $M$ ). Первый такт интегрирования длится время  $T_1 = M T_{сч}$ .

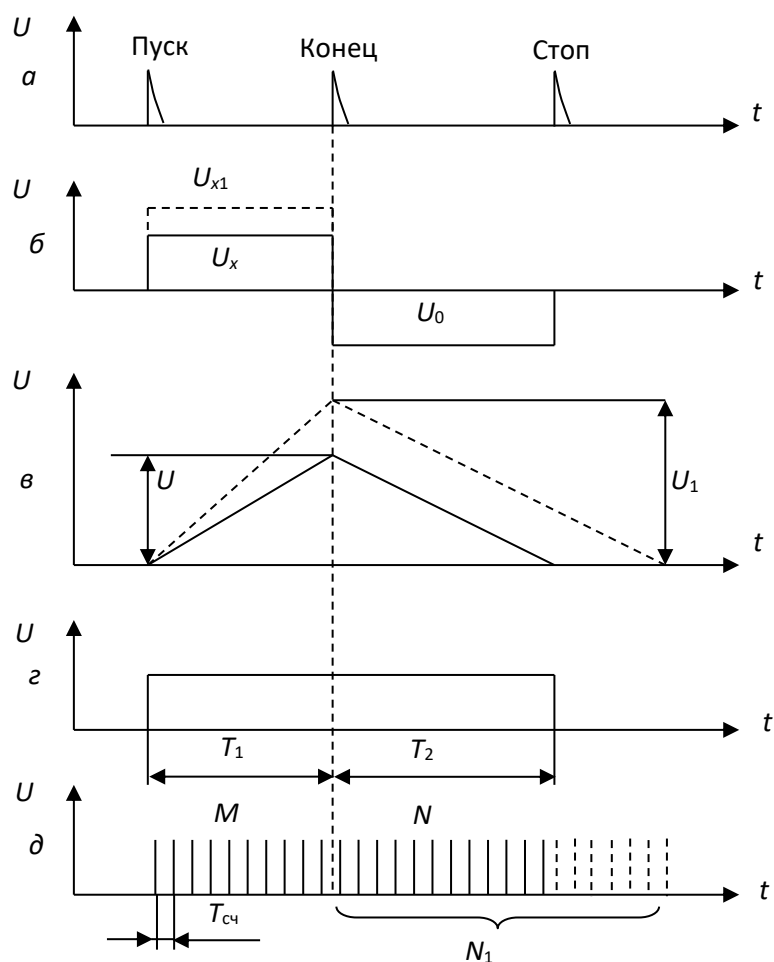


Рисунок 7.7 – Временные графики работы АЦП с двухтактным интегрированием

В конце первого такта интегрирования напряжение на выходе интегратора равно:

$$U_{\text{инт1}} = \int_0^{T_1} \frac{U_x}{\tau_1} dt = \frac{T_1 U_x}{\tau_1},$$

где  $\tau_1$  – постоянная времени интегратора в первом такте интегрирования.

В течение второго такта интегрирования на входе интегратора действует постоянное стабильное напряжение  $U_0$ , так как под действием сигнала  $U_{\text{упр}}$  электронный ключ переводится в положение 2. Полярность  $U_0$  противоположна полярности  $U_x$ . Под действием напряжения  $U_0$  интегратор начинает разряжаться. Остальные элементы схемы своего состояния не меняют, при этом счетчик начинает считать сначала.

Когда напряжение на выходе интегратора достигнет нулевого значения, сработает компаратор и триггер перейдет в нулевое состояние. Вырабатывается сигнал «Стоп», который переводит электронный ключ в среднее положение. Счет импульсов прекращается. На вход ничего не подается, схема находится в исходном состоянии.

В течение второго такта интегрирование  $T_2$  напряжения на выходе интегратора изменялось по закону

$$U_{\text{инт1}} - \int_{T_1}^{T_1+T_2} \frac{U_0}{\tau_2} dt = \frac{T_1 U_x}{\tau_1} - \frac{T_2 U_0}{\tau_2} = 0,$$

где  $\tau_2$  – постоянная времени интегратора во втором такте интегрирования.

Из предыдущего выражения находим

$$T_2 = \frac{\tau_2}{\tau_1} \frac{T_1}{U_0} U_x,$$

а счетчик подсчитает количество импульсов

$$N = \frac{T_2}{T_{\text{сч}}} = \frac{\tau_2}{\tau_1} \frac{M T_{\text{сч}}}{U_0 T_{\text{сч}}} U_x = \frac{M}{U_0} U_x \quad \text{при } \tau_1 = \tau_2.$$

Последнее выражение есть уравнение измерения, из которого следует, что  $N$  пропорционально  $U_x$ . В уравнение измерения входит только одна величина  $U_0$ , которая может служить источником погрешности. Другими источниками погрешности являются: нелинейность интегрирования, погрешность компаратора, погрешность дискретности.

Достоинством АЦП (помимо высокой точности) является хорошая помехозащищенность, особенно от помех, период которых кратен постоянной времени интегрирования. Этот АЦП позволяет измерять среднее значение напряжения. Основной недостаток данного АЦП – низкое быстродействие.

Времяимпульсные АЦП с двухтактным интегрированием в настоящее время получили наиболее широкое распространение при построении цифровых вольтметров.

### 7.2.3 Частотно-импульсные АЦП

В частотно-импульсных АЦП измеряемое напряжение преобразуется в пропорциональную частоту следования импульсов, которая затем измеряется цифровым способом. Структурная схема частотно-импульсного АЦП показана на рисунок 7.8.

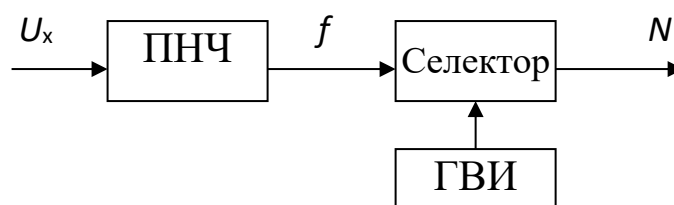


Рисунок 7.8 –Структурная схема частотно-импульсного АЦП

В состав схемы входят: преобразователь «напряжение частота» (ПНЧ), генератор временных интервалов (ГВИ), временной селектор. На вход ПНЧ поступает измеряемое напряжение. Это напряжение преобразуется в частоту следования импульсов:

$$f=kU_x,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Через селектор эти импульсы будут проходить в течение времени действия импульса ГВИ ( $T_0$ ). При этом на выходе формируется пачка импульсов число которых  $N$  пропорционально входному напряжению  $U_x$ :

$$N = T_0 f = k T_0 U_x.$$

Отметим, что выходное количество импульсов  $N$  пропорционально среднему значению напряжения за время  $T_0$ , следовательно, данный АЦП является интегрирующим и обладает хорошей защищенностью от помех период которых кратен времени преобразования. В качестве ПНЧ наибольшее распространение получили схемы на основе интегратора. Основными источниками погрешностей данного АЦП являются погрешность преобразования, погрешность квантования.

### 7.3 Электронно-счетные частотомеры

Частота – физическая величина, характеристика периодического процесса, равная числу полных циклов, совершенных за единицу времени.

Единицей частоты в Международной системе единиц (СИ) в общем случае является Герц (Гц, Hz), названная в честь немецкого учёного-физика XIX века Генриха Герца, который внес важный вклад в развитие электродинамики. Название было учреждено Международной электротехнической комиссией (МЭК) в 1930 году. В 1960 году на генеральной конференции по мерам и весам это название было принято взамен ранее существовавшего термина (число циклов в секунду).

Частота 1 Гц означает одно исполнение (повторение, колебание, реализация) процесса за одну секунду, другими словами – одно колебание в секунду  $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$ . Величина, обратная частоте, называется периодом ( $T$ ). В практике электро-радиоизмерений в большинстве случаев измеряют частоту ( $f$ ), реже измеряют период ( $T$ ), а в диапазоне сверхвысоких частот – длину волны ( $\lambda$ ). Все эти величины однозначно связаны между собой, поэтому, измерив одну из них, легко найти другую:

$$f = 1/T,$$

$$f = c/\lambda,$$

где  $c$  – скорость света.

На практике различают также следующие виды частот.

1. Мгновенная частота и частоты спектральных составляющих. Периодический сигнал характеризуется мгновенной частотой, являющейся скоростью изменения фазы, но тот же сигнал можно представить в виде суммы гармонических спектральных составляющих, имеющих свои частоты. Свойства мгновенной частоты и частоты спектральной составляющей различны.

2. Циклическая частота. В теории электромагнетизма, теоретической физике, а также в некоторых прикладных электро-радиотехнических расчетах удобно использовать дополнительную циклическую величину (круговую,

радиальную, угловую) частоту, которую обозначают  $\omega$ . Циклическая частота связана с частотой колебаний соотношением:

$$\omega = 2\pi f$$

Единица циклической частоты – радиан в секунду (рад/с, rad/s). В механике при рассмотрении вращательного движения аналогом циклической частоты служит угловая скорость.

3. Частота дискретных событий. Частота дискретных событий (частота импульсов) – физическая величина, равная числу дискретных событий, происходящих за единицу времени. Единица частоты дискретных событий секунда в минус первой степени ( $\text{с}^{-1}$ ,  $\text{s}^{-1}$ ), однако на практике для выражения частоты импульсов обычно используют герц.

4. Частота вращения. Частота вращения – это физическая величина, равная числу полных оборотов за единицу времени. Единица частоты вращения – секунда в минус первой степени ( $\text{с}^{-1}$ ,  $\text{s}^{-1}$ ), оборот в секунду. Часто используются такие единицы, как оборот в минуту, оборот в час и т. д.

В данном разделе рассмотрены принципы измерения частотно-временных параметров электрических колебаний цифровым методом. Этот метод реализован в электронно-счетных частотомерах (ЭСЧ), которые являются наиболее распространенным видом частотомеров благодаря своей универсальности, широкому диапазону частот (от долей герца до десятков мегагерц) и высокой точности. Для повышения диапазона до сотен мегагерц – десятков гигагерц используются дополнительные блоки – делители частоты. Большинство ЭСЧ кроме частоты позволяют измерять период следования импульсов, интервалы времени между импульсами, отношения двух частот, а также могут использоваться в качестве счетчиков количества импульсов.

Измерение частоты. Принцип измерения частоты электрических колебаний цифровым методом заключается в подсчете числа импульсов неизвестной частоты за известный и стабильный по длительности интервал времени. Упрощенная структурная схема ЭСЧ приведена на рисунок 7.9, а временные диаграммы, поясняющие его работу, представлены на рисунке 7.10.

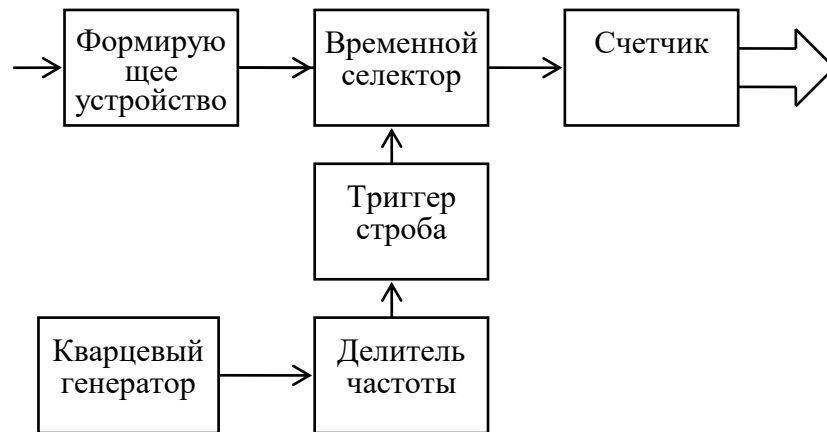


Рисунок 7.9 – Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты

Сигнал  $U_c$  измеряемой частоты  $f_x$  подается на первичный преобразователь – формирующее устройство. Формирующее устройство предназначено для преобразования гармонических сигналов различных форм в однополярные импульсы, следующие с периодом  $T_x = 1/f_x$ . С формирующего устройства импульсы  $U_{fy}$  через открытый временной селектор поступают на вход счетчика. Временной селектор управляется триггером строба  $U_{тр}$  и открыт в течении интервала времени  $T_0$ , который формируется триггером строба из сигнала кварцевого генератора. Таким образом, селектор пропускает на счетчик пачку из  $N$  счетных импульсов  $U_{сч}$ , следующих с периодом  $T_x$ , в течении времени  $T_0$ :

$$N = \frac{T_0}{T_x} = T_0 f_x$$

Следовательно, показания счетчика пропорциональны значению измеряемой частоты:

$$f_x = N/T_0.$$

Погрешность измерения частоты ЭСЧ определяется двумя факторами.

Во-первых, не кратностью  $T_x$  и  $T_0$ , что приводит в к появлению погрешности дискретности  $\delta_d$ , равной  $\pm 1$  младшего разряда:

$$\delta_d = 1/N = 1/T_0 f_x$$

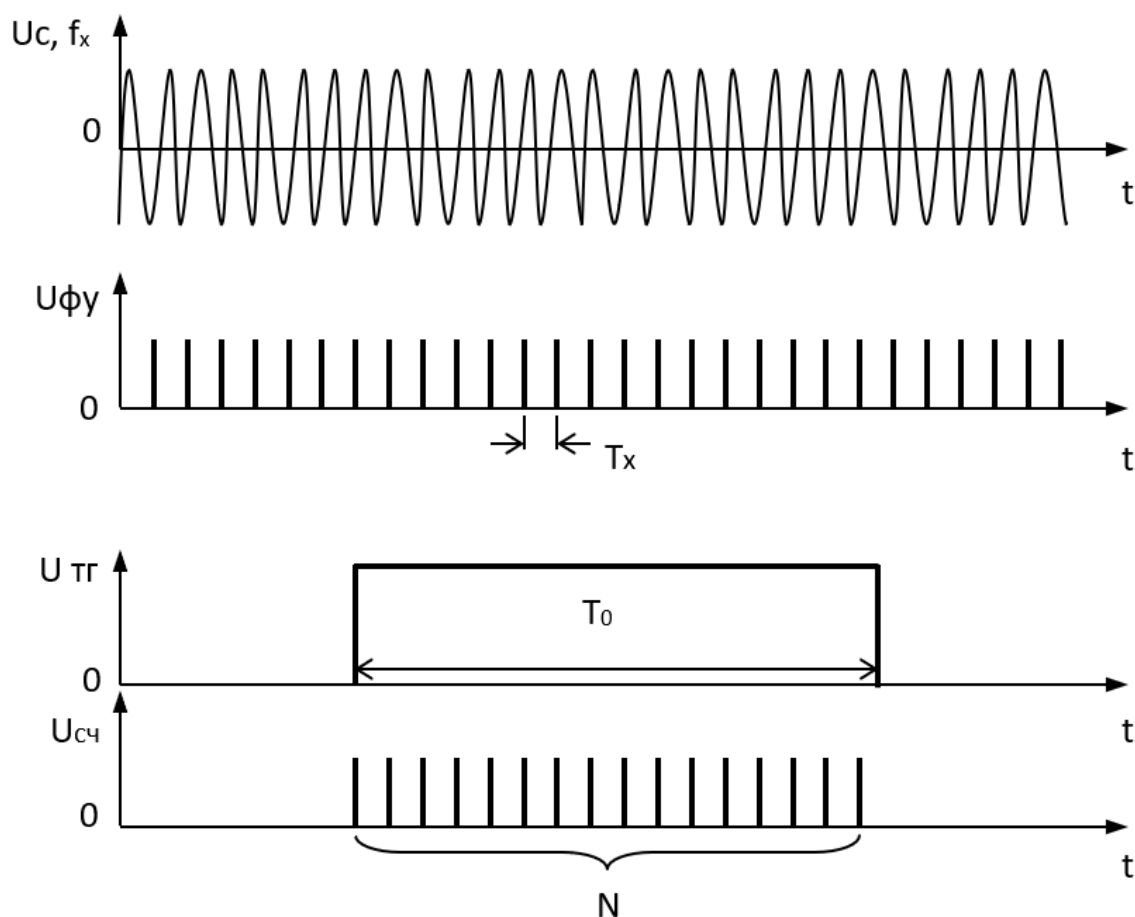


Рисунок 7.10 – Временные диаграммы, поясняющие работу ЭСЧ

Во-вторых, неточностью задания интервала времени  $T_0$ , которая определяется погрешностью частоты  $\delta_{кГ}$  кварцевого генератора. Для ее уменьшения кварцевый генератор помещается в термостат. Суммарная погрешность измерения частоты таким методом варьируется в пределах  $10^5 - 10^7$ .

Следует отметить, что при измерении низких частот (НЧ) погрешность ЭСЧ значительно возрастает, что ограничивает частотный диапазон ЭСЧ снизу (обычно от 10 до 20 Гц). Сверху частотный диапазон ограничивается быстродействием счетчиков и составляет от 100 до 200 МГц. Поэтому для уменьшения погрешностей измерения низких и инфранизких частот с помощью ЭСЧ переходят к измерению периода с последующим расчетом частоты по формуле  $f_x = 1/T_x$ . Это наиболее простой способ, т.к. не требуется дополнительных аппаратных затрат в ЭСЧ. Он заключается в подсчете числа импульсов известной частоты, вырабатываемых кварцевым генератором, за



время измеряемого периода. Для повышения точности измерения в ЭСЧ предусмотрено увеличение измеряемого периода в определенное число раз. Недостатком метода измерения частоты путем измерения периода сигнала является необходимость перерасчета значения частоты. Однако в виду простоты его реализации режим измерения периода предусмотрен в большинстве типов ЭСЧ.

Особенности измерения высоких и сверхвысоких частот связаны с предварительным преобразованием частоты – ее уменьшением. Для этого применяют специальные преобразователи (делители) частоты. Как правило, такие делители выполняются в виде отдельных дополнительных блоков, входящих в комплект частотомера. При работе ЭСЧ в режиме с делителем сигнал измеряемой высокой частоты подается на вход делителя, где преобразуется в сигнал более низкой частоты. Затем он измеряется в ЭСЧ, а результат измерения умножается на число, на которое он ранее был поделен. Обычно перечисленные операции выполняются автоматически. При этом диапазон измерения частоты увеличивается до десятков мегагерц.

#### **7.4 Устройства отображения измерительной информации**

Устройство отображения измерительной информации (УОИ) является конечным преобразователем в схеме любого измерительного прибора. В самом общем случае его назначение – представление измерительной информации в удобной для регистрации форме. В современной литературе УОИ часто называют показывающим устройством.

Показывающее устройство (англ. *indicating device*) – совокупность элементов средств измерений, которые обеспечивают визуальное восприятие значений измеряемой величины или связанных с ней величин. Ранее, когда преобладали аналоговые измерительные приборы, показывающие устройства назывались отсчетными устройствами. В дальнейшем, для упрощения изложения материала, устройства отображения информации будем называть общим термином – «показывающее устройство».

По назначению показывающие устройства условно можно разделить на устройства для отсчета измерительной информации и устройства для вывода графической информации.

В независимости от назначения по конструкции показывающие устройства могут быть аналоговыми и цифровыми. Помимо этого, существуют также устройства, в которых непрерывные (аналоговые) показания имитируются дискретными (цифровыми) методами.

#### **7.4.1 Аналоговые показывающие устройства**

Аналоговыми устройствами для отображения текущего значения одной величины являются шкальные показывающие устройства. Они включают в себя шкалу и указатель, положение которого относительно отметок шкалы определяет показание средства измерений. Подвижными могут быть либо указатель (чаще всего), либо шкала. В качестве указателя может использоваться стрелка, световое пятно или поверхность столбика жидкости (например, у спиртового термометра). Наиболее часто встречаются стрелочные показывающие устройства, включающие в себя шкалу, стрелку и измерительный механизм, обеспечивающий ее перемещение. Конструкции различных измерительных механизмов описывались ранее. У светолучевых показывающих устройств в качестве измерительного механизма используется чувствительный гальванометр на растяжках, к которому прикреплено зеркальце, отражающее лучик от специальной лампы. Светолучевые показывающие устройства имеют большую чувствительность и меньшую инерционность по сравнению со стрелочными.

Аналоговые показывающие устройства для отображения взаимосвязи двух и более величин представляют собой экран, например электронно-лучевой трубки, на котором изображается информация в виде графиков зависимости измеряемой величины от времени или другого параметра. Их конструкция будет рассмотрена в разделе, посвященном изучению электронно-лучевых

осциллографов. Современные показывающие устройства данного типа чаще всего являются цифровыми.

#### **7.4.2 Цифровые показывающие устройства**

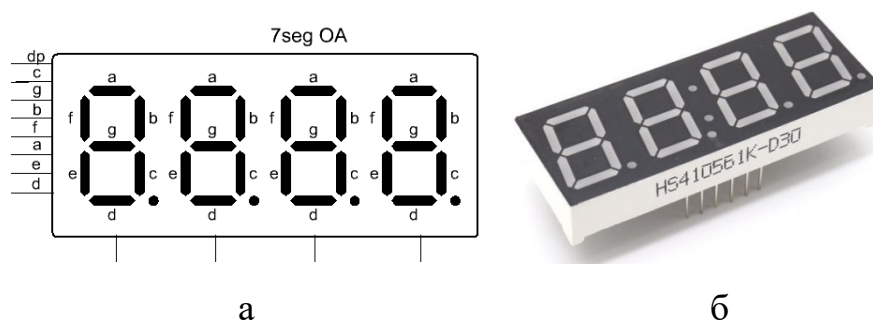
В общем случае цифровые показывающие устройства делят на дискретные и собственно цифровые.

Визуальная информация в дискретных устройствах синтезируется на многосегментных индикаторах либо матричных экранах. В простейшем случае используется имитация указателя, например, в виде светящегося столбика переменной длины, который формируется множеством сегментов индикатора, расположенных в одну линию. В более сложных случаях из сегментов индикатора или пикселей матричного экрана синтезируется изображение стрелочного прибора с подвижной стрелкой. Для управления выводом изображения используется сложное электронное устройство, включающее в себя аналого-цифровой преобразователь и цепи для синтеза изображения.

Цифровое показывающее устройство, называемое также цифровым табло, визуализирует информацию о числовых значениях в виде ряда цифр, дополнительно могут использоваться также буквы и другие знаки, например, для индикации единиц измерения, сигнала о переполнении табло и других данных. Электронное табло представляет собой отдельный модуль или печатную плату и включает в себя собственно средство индикации и управляющую электронную часть.

Конструкции цифровых табло определяются физическими принципами формирования ими изображения. Все типы современных индикаторов делятся на активные (светоизлучающие) и пассивные (светомодулирующие). Для каждого типа индикаторов существует множество технологий, хотя на рынке реально присутствует сравнительно небольшое количество индикаторов. Рассмотрим конструкции и основные характеристики наиболее используемых современных цифровых табло.

Наиболее простыми являются табло, построенные на базе светоиндикаторных диодов (СИД). Они представляют из себя матричный индикатор светодиодных символов, которые должны отображать цифры и специальные знаки. Промышленностью выпускаются одиночные и многоэлементные СИД (сегментные, матричные, шкальные, мнемонические). Наиболее распространены – сегментные. Так, семисегментный СИД используется для отображения цифровой и некоторой буквенной информации. Он состоит из семи отдельных СИД (сегментов), не считая десятичной точки, расположенных в определенном порядке (рисунок 7.11).



а б

а – схема; б – внешний вид

Рисунок 7.11 – Семисегментный СИД

Включая определенную комбинацию сегментов, можно отобразить различные стилизованные цифры от 0 до 9 и некоторые буквы. Светодиоды обладают монохроматичностью излучения, что обеспечивает табло достаточную яркость и высокий коэффициент полезного действия.

Альтернативой СИД являются жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ), т. к. потребляют мощность в тысячи раз меньшую. Основу их конструкции составляют жидкие кристаллы (ЖК), нанесенные на специальную подложку определенными символами. Это органические вещества, обладающие как свойствами жидкости (текучесть), так и свойствами кристаллического вещества (упорядоченная структура) под действием приложенного напряжения. При подаче напряжения на ЖК он становится «видимым» и отображает определенный символ. При снятии напряжения исходная ориентация молекул ЖК медленно восстанавливается, и он становится «невидимым».

Достоинствами ЖКИ являются малое энергопотребление, высокий ресурс работы (не менее 30 лет), малая толщина, возможность отображения любого вида информации. К основным недостаткам относятся низкое быстродействие, ограниченное поле зрения, сравнительно низкий контраст (иногда требуется дополнительная подсветка).

Широкое применение также нашли табло, построенные на основе газоразрядных индикаторов (ГРИ). В них используется излучение, возникающее при тлеющем разряде вокруг отрицательного электрода в среде инертного газа. Простейшим ГРИ является неоновая лампочка, в которой колба заполнена неоном с добавкой небольшого количества паров ртути. Цвет свечения зависит от состава газа. Область применения ГРИ значительно расширилась с появлением матричных газоиндикаторных панелей (ГИП) или плазменных панелей, в которых изображение создается из множества светящихся точек. Основу ГИП составляют две системы ортогональных металлических электродов, отделенных друг от друга диэлектрическим сепаратором с отверстиями в зоне пересечения электродов (рисунок 7.12).

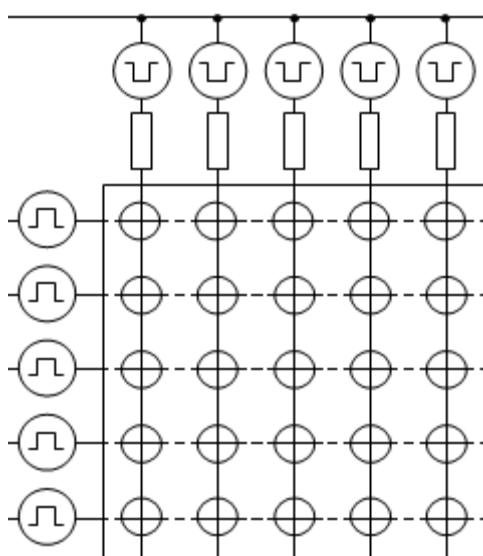


Рисунок 7.12 – Конструкция ГИП

Сепаратор, помещенный между двумя герметизируемыми стеклянными пластинами, выполняет функции механического каркаса для закрепления электродов и локализует разряд. При подаче напряжения на соответствующие электроды в точке их «пересечения» начинается лавинообразный процесс

ионизации газа и возникает тлеющий разряд, приводящий к свечению точки. ГРИ обладают высокой яркостью. Для управления плазменными панелями разрабатываются соответствующие диаграммы управления.

Современные ГИП имеют ряд важных преимуществ перед другими типами индикаторов: плоскостность экрана, высокая разрешающая способность, минимальные размеры пиксела (от 0,3 до 0,5 мм), высокая информационная емкость, высокая яркость, широкий угол зрения, высокая контрастность, высокая надежность, безопасность для обслуживающего персонала (отсутствие электромагнитного излучения), возможность наращивания больших информационных панно. К недостаткам относятся низкий КПД, большие рабочие напряжения (сотни вольт), сложные системы управления и большое энергопотребление.

В современной измерительной технике несмотря на указанные недостатки ГИП наряду с ЖКИ остаются одними из самых распространенных цифровых индикаторных устройств.

## 8 ИНТЕРФЕЙСЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

### 8.1 Общая характеристика

Интерфейс (англ, interface – согласовывать, сопрягать) – совокупность средств и правил, обеспечивающих взаимодействие устройств вычислительной машины или системы обработки информации и (или) программ (ГОСТ 15971-90).

Интерфейс – это устройство сопряжения, а в широком смысле – совокупность механических, электрических и программных средств, позволяющих сопрягать модули в систему.

Стандартизации в интерфейсе обычно подлежат форматы передаваемой информации, команды и состояния, состав и типы линий связи, алгоритм функционирования, передающие и приёмные электронные схемы, параметры сигналов и требования к ним, конструктивные решения.

По своему назначению интерфейсы бывают: машинные, системные и приборные и др.

Машинные – это такие интерфейсы, которые соединяют центральный процессор ЭВМ с другими её функциональными блоками.

Системные – интерфейсы, решающие задачу унификации сопряжения модулей, предназначенных для работы в системе. Они рассчитаны на работу в качестве автономных приборов.

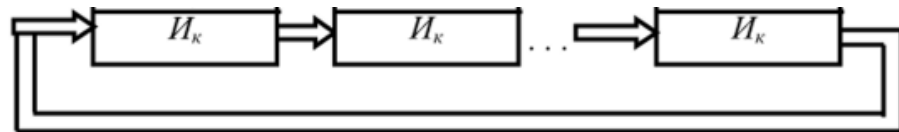
Приборные – интерфейсы, объединяющие в систему модули-приборы, которые могут работать автономно, и для них характерны значительные функциональные возможности (измерение ряда параметров, различные режимы работы, программируемость и т.п.).

Различают три основных схемы соединения модулей (рисунок 8.1).

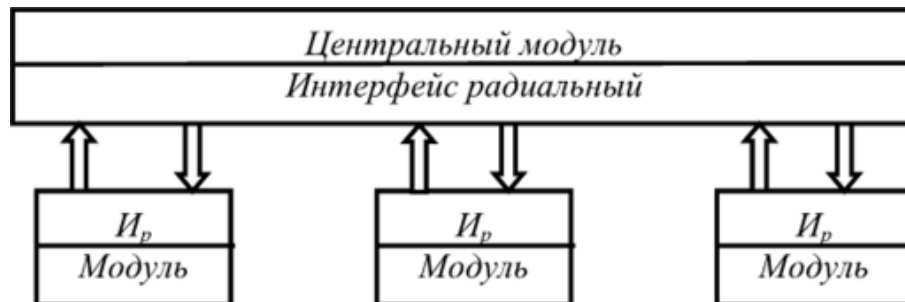
Каскадная (цепочечная, децентрализованная схема) применяется, когда общий поток сигналов в каждый момент времени связывает между собой один объект исследования, один источник испытательных сигналов и один измерительный прибор (рисунок 8.1, а).

Радиальная (централизованная) схема характерна для случая, когда к центральному модулю надо подключить несколько модулей. При этом модули присоединяют без коммутатора (непосредственно), т.е. центральный модуль имеет достаточное число каналов для обмена данными (рисунок 8.1, б).

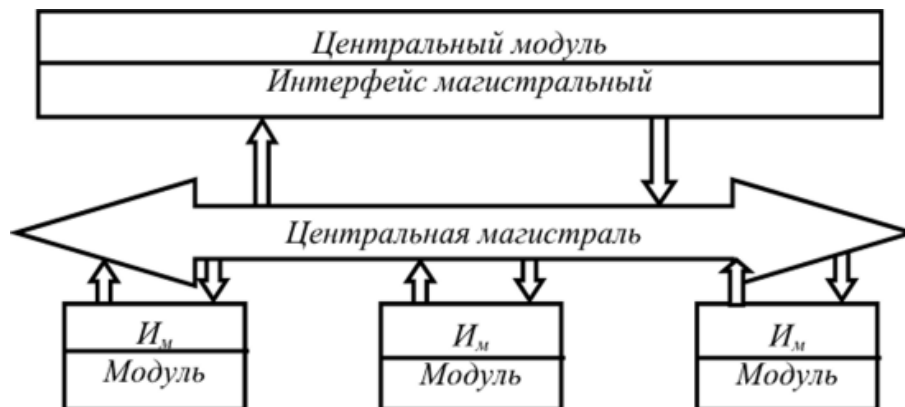
Магистральная (с централизованным управлением) схема. Если число каналов центрального модуля меньше требуемого числа, то отдельные модули связывают с центральным модулем через общую магистраль с последовательным по времени обращением. При каждом обращении (запросе) к центральному модулю подключается только тот модуль, адрес которого вызывается программой (рисунок 8.1, в).



а



б



в

а – каскадная (цепочечная); б – радиальная (централизованная); в – магистральная (с централизованным управлением)

Рисунок 8.1 – Структурные схемы интерфейсов



Возможны и комбинированные схемы: каскадно-радиальная, каскадно-магистральная и др.

В ИС используют различные типы интерфейсов: МЭК (IEEE-488 или HP-1B), КАМАК, RS-232, RS-422, RS-485, I2C (TWI), UART, USB, а также системные интерфейсы: 8, 16, 32-разрядные микроЭВМ и другие.

## 8.2 Интерфейс МЭК

Интерфейс МЭК (рисунок 8.2) называют также интерфейсом IEEE-488 (Institute of Electrical and Electronic Engineering) или HP-1B (Hewlett Packard Interface Bus). Интерфейс предназначен для цифровых измерительных приборов и устройств.

Интерфейс МЭК имеет следующие характеристики:

1. длина подключения, м, не более 20;
2. число подключаемых модулей, не более 15;
3. общее число приёмников и источников информации (передатчиков):
  - при однобайтовой адресации  $\leq 31$ ;
  - при двухбайтовой адресации  $\leq 961$ ;
4. скорость передачи, Мб/с не более – 1;
5. высокий уровень напряжения в линии соответствует уровню  $> 2$  В, а низкий –  $< 0,8$  В.

Достоинство стандарта МЭК – отсутствие каких-либо ограничений на конструкцию и способы построения приборов, возможность объединения в систему в заданном сочетании практически любых, отвечающих требованиям интерфейса, приборов.

По характеру взаимодействия с магистралью интерфейса устанавливают четыре группы функциональных устройств: контроллер, приёмное, передающее и приёмно-передающее.

Интерфейс МЭК представляет собой шестнадцати-линейную двунаправленную пассивную линию связи, называемую магистралью, к которой можно подключить параллельно до 15 различных приборов, в том числе и

контроллер. Функционально линии, образующие магистраль, группируют в три шины: данных, согласования передачи и общего управления.

Для соединения функциональных узлов, блоков и приборов между собой служат цепи, называемые линиями.

Группа линий, предназначенных для выполнения определённых функций в программно-управляемом процессе передачи данных, называется шиной.

Конструктивно интерфейс состоит из кабеля, разъёмов и печатных плат.

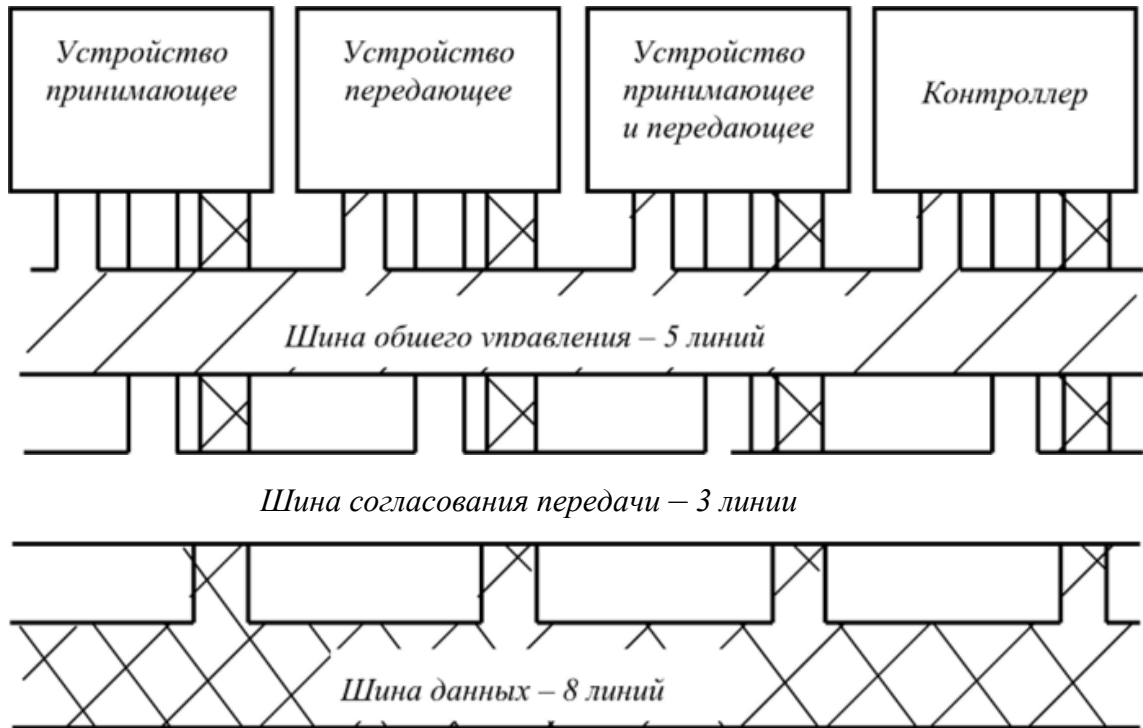


Рисунок 8.2 – Интерфейс МЭК

Шина данных состоит из 8 линий. Обмен информацией по линиям осуществляется бит-параллельным (бит, от англ. Binarydigit) байт-последовательным (байт, англ, byte – восьмибитовое слово) способом, т.е. в форме параллельных битов и последовательных байтов (рисунок 8.3).

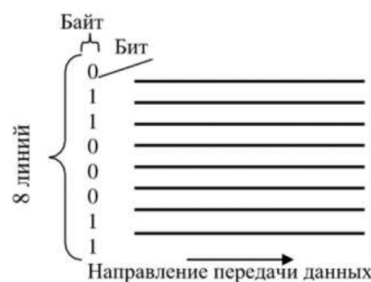


Рисунок 8.3 – Схема передачи данных по шине

Шина данных служит для передачи (приёма) основных данных: результатов измерений, адресных, программных, управляющих данных и данных состояний, т.е. цифровых данных, адресов модулей и многолинейных универсальных команд.

Особенность интерфейсной шины такова, что одновременно могут работать несколько принимающих приборов, но среди них только один передающий.

Шина согласования передачи – это шина синхронизации, она объединяет три линии. По ним передаются сигналы согласования, подтверждающие соответствие состояний приборов, что необходимо для обмена информацией, т.е. передачи байта информации от контроллера или передающего прибора принимающему. Эти сигналы называются квитирующими (от слова квитанция, итал. *quitanza*).

Обмен данными между модулями может быть синхронным или асинхронным. Первый позволяет получить большую скорость обмена данными, но все модули при этом должны иметь примерно одинаковое быстродействие. Интерфейс МЭК осуществляет асинхронный обмен информацией.

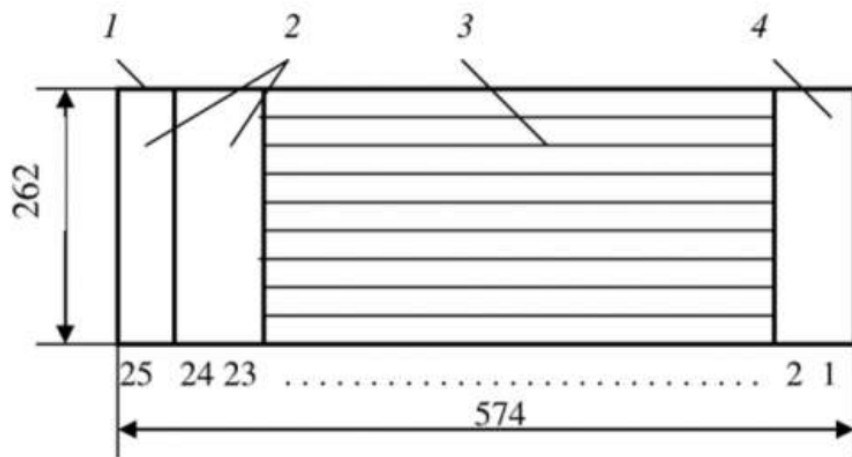
Для асинхронного обмена основополагающей является процедура установления соответствия. Есть два варианта. В первом передающий прибор устанавливает флаг (сигнал готовности), когда завершена подготовка данных для передачи, и ждёт готовности принимающего прибора. В интерфейсе МЭК принят второй вариант: первоначально устанавливает флаг принимающий прибор.

Шипа общего управления состоит из пяти линий. По ним передаются управляющие сигналы, которые циркулируют между контроллером и другими приборами, подключёнными к интерфейсу.

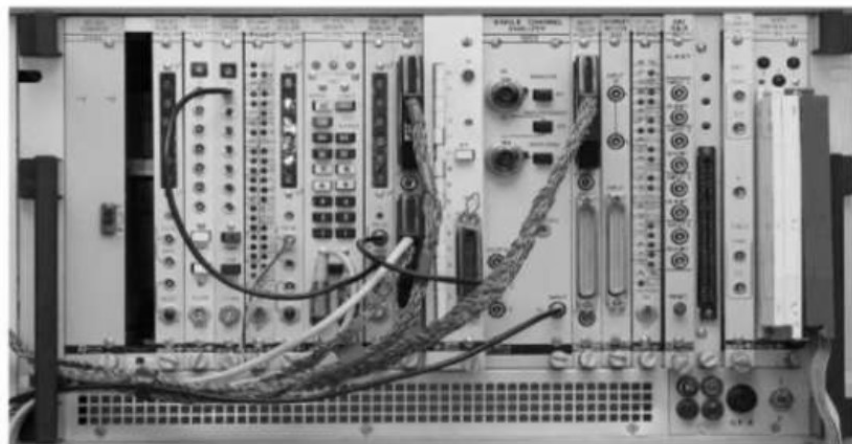
### **8.3 Интерфейс КАМАК**

Система КАМАК (САМАС – Computer Application for Measurement and Control) представляет собой модульную агрегатную систему, предназначенную

для построения цифровых измерительно-вычислительных систем и комплексов, управляемых ЭВМ (ГОСТ 26.001-80). Она основана на использовании крейта (англ, crate – ящик, каркас) с модулями определённых размеров. Крейт (рисунок 8.4) представляет собой устройство расширения магистрали обмена, снабжённое питанием и внутренней магистралью.



а



б

а – схема: 1 – каркас; 2 – блок; 3 – магистраль; 4 – контроллер; б – внешний вид

Рисунок 8.4 – Крейт

Особенность системы КАМАК заключается в том, что она позволяет строить многоуровневые системы с большим числом ПИП с централизованным управлением от ЭВМ различных классов.

Следует отметить, что ИС КАМАК может функционировать самостоятельно, без внешней ЭВМ. В этом случае управление магистралью берёт на себя контроллер.

В интерфейсе КАМАК используют смешанную магистрально-радиальную систему шин и синхронный режим обмена данными между функциональными блоками.

Для организации сложных многосвязных систем используют много-крейтовую систему КАМАК, которая может содержать до семи крейтов (рисунок 8.5).

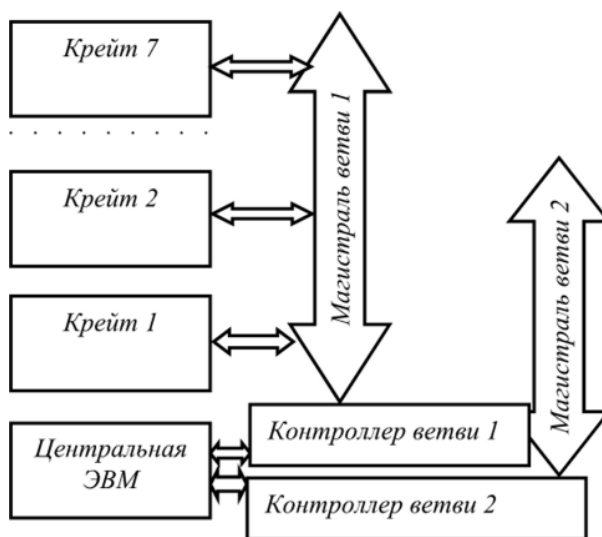


Рисунок 8.5 – Структура АСК в стандарте КАМАК

Структура КАМАК может быть четырёхуровневой: верхний – ЭВМ, второй – контроллеры ветвей, третий – контроллеры крейтов, четвёртый – управляемые модули. Все одно-крейтовые системы – двухуровневые.

Недостатком КАМАК является аппаратурная избыточность и, следовательно, его большая стоимость.

#### 8.4 Интерфейс RS-232

Интерфейсы RS-232 (ГОСТ 23675-79), RS-422 и RS-485 (Recommended Standard – рекомендованный стандарт) имеют следующие характеристики (см. таблица 8.1).

На рисунке 8.6 показан преобразователь сигнала интерфейса RS-232C (EIA-232C /V.28, /V.24) в сигнал интерфейса RS-485/RS-422 /V. 11 (EIA-485, EIA-422A, BitBus).

Интерфейс RS-232 обеспечивает передачу информации между двумя устройствами на расстояние до 20 м.

Последовательный интерфейс RS-422 предназначен для соединения двух устройств, возможно подключение нескольких блоков.

В основе интерфейса RS-422 и RS-485 лежит принцип дифференциальной (балансной) передачи данных, суть которого заключается в передаче одного сигнала по двум проводам. Причём по одному проводу (А) идёт один сигнал, а по-другому (В) -его инверсная копия. Другими словами, если на одном проводе 1, то на другом 0 и наоборот.

Таблица 8.1 – Основные характеристики интерфейсов RS-232, RS-422 и RS-485

Параметр	RS-232	RS-422	RS-485
Соединение	Одиночный	Одиночный	Допустимо
	провод	провод, допустимо много соединений	много соединений
Количество устройств	1 передатчик 1 приёмник	5 передатчиков 10 приёмников на 1 передатчик	32 передатчика, 32 приёмника
Вид протокола	Дуплексный	Дуплексный	Полудуплексный
Максимальная длина проводов	20 м	1.220 м	1.220 м
Скорость передачи	19,2 кб/с	100 кб/с	100 кб/с
Сигнал	Небалансный	Балансный	Балансный
Двоичная 1	-5 ... -15 В	2 при В>А 6 при В>А	1,5 при В>А 5 при В>А
Двоичный 0	5-15 В	2 при А>В 6 при А>В	1,5 при А>В 5 при А>В
Минимальное входное напряжение	±3 В	0,2 В	0,2 В
Выходной ток	500 мА	150 мА	250



Рисунок 8.6 – Преобразователь RS-232C в RS-485/RS-422

Интерфейс RS-485 обеспечивает обмен данными между несколькими устройствами по одной двухпроводной линии связи в полудуплексном режиме. Количество устройств, подключаемых к одной линии интерфейса, зависит от типа приёмников и передатчиков, так как один передатчик рассчитан на 32 приёмника. В настоящее время выпускают приёмники с входным сопротивлением 1/2, 1/4 и 1/8 от стандартного, в этом случае число приёмников может быть увеличено соответственно до 64, 128 и 256.

Каждому прибору, который входит в состав системы, объединённой интерфейсом, присущи три вида функций: приборные, кодирование и интерфейсные.

Приборные функции – это параметры, измеряемые данным прибором, диапазон измерений, погрешность измерения, режим работы прибора и т.п.

Кодирование информации выполняют в соответствии с регламентированными кодами и форматами по ГОСТ 26.003-80.

Интерфейсные функции – это совокупность типовых операций, выполняемых при обмене данными в системе, организованной интерфейсом. Каждая интерфейсная функция, осуществлённая в приборе, позволяет ему принимать, передавать сообщения или выполнять их определённую обработку. Взаимодействие соединённых шинами приборов достигается в результате выполнения десяти интерфейсных функций, пять из которых основные, а ещё пять – дополнительные.

Основные интерфейсные функции:

1. Приём данных L (П) или расширенный (от нескольких источников) приём данных LE (ПР). Эта функция позволяет прибору получить данные с другого прибора.

2. Согласование прибора-приёмника АН (СП) – функция квитированного обмена с принимающим прибором, гарантирующая правильный приём информации.

3. Передача информации источником Т (И) или расширенная передача ТЕ (ИР) – функция, позволяющая передающему прибору передавать через

интерфейс формируемые им данные другим приборам, подключённым к интерфейсу.

4. Согласование прибора-передатчика SH (СИ) – это функция квитированного обмена с передающим прибором, гарантирующая правильную передачу информации.

5. Контроллер С (К) – функция, дающая возможность контроллеру передавать другим приборам, подключённым к интерфейсу, адреса и универсальные команды.

Дополнительные интерфейсные функции:

1. Запрос на обслуживание SR (З) – функция, которая позволяет прибору запрашивать у контроллера операции по обслуживанию.

2. Дистанционное и местное управление RL (ДМ) – функция, дающая для данного прибора возможность получать программирующую информацию либо с панели (местное управление), либо от интерфейса (дистанционное управление).

3. Параллельный опрос PP (ОП) – функция, позволяющая прибору выдавать ответную информацию при параллельном опросе в контроллер без предварительной команды «передача информации».

4. Очистка прибора DC (СБ) – функция установки прибора в исходное состояние.

5. Запуск прибора DT (ЗП) – функция, дающая возможность контроллеру выдавать прибору команду начала работы.



## **9 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТЯХ**

Сигналы, действующие в радиотехнических системах, характеризуются многообразием, а их формы отличаются от идеализированных. Поэтому актуальной задачей в практике электро-радиоизмерений является обеспечение возможности визуального наблюдения и исследование формы сигналов, а также измерения их амплитудных и частотно-временных параметров. Приборы для исследования формы, спектра и нелинейных искажений сигналов образуют одну из наиболее представительных подгрупп в общей классификации РИП (ГОСТ 15094-86) и образуют подгруппу «С». Внутри этой подгруппы приборы делятся на виды, например, С1 – осциллографы универсальные, С4 – анализаторы спектра и т.д. На практике наиболее распространено исследование сигналов во временной области, осуществляемое с помощью осциллографов различных видов. В данном разделе подробно будут рассмотрены приборы, используемые наиболее часто.

### **9.1. Осциллографы**

Осциллограф (лат. *oscillo* – качаюсь + греч. *Граφω* – пишу) – прибор, предназначенный для исследования (наблюдения, записи, измерения) амплитудных и временных параметров электрического сигнала, подаваемого на его вход, и наглядно отображаемого непосредственно на экране либо регистрируемого на фотоленту. Осциллографы классифицируют по различным признакам, основными из которых являются следующие.

По принципу работы осциллографы делят на электромеханические и электронные.

По назначению осциллографы разделяются на универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие и специальные.

По числу одновременно наблюдаемых сигналов их делят на одно-, двух- и многоканальные осциллографы.

По отображающему устройству осциллографы делят на электронно-лучевые и матричные (газоразрядные, плазменные, жидкокристаллические и т.п.).

По принципу обработки информации осциллографы делят на аналоговые и цифровые.

Электромеханические осциллографы (ЭМО), или шлейфовые, являются более ранними и имеют небольшой частотный диапазон (до 25 кГц). Они применяются достаточно редко (обычно в контрольно-записывающей аппаратуре для регистрации медленно изменяющихся процессов на специальной фотобумаге).

Электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО) – это приборы для наблюдения и измерения параметров электрических сигналов, использующий отклонение одного или нескольких электронных лучей для получения мгновенных функциональных зависимостей переменных величин, одной из которых обычно является время. В настоящее время они являются наиболее распространенными, несмотря на широкое внедрение в измерительный процесс цифровой техники.

### 9.1.1 Электронно-лучевые осциллографы

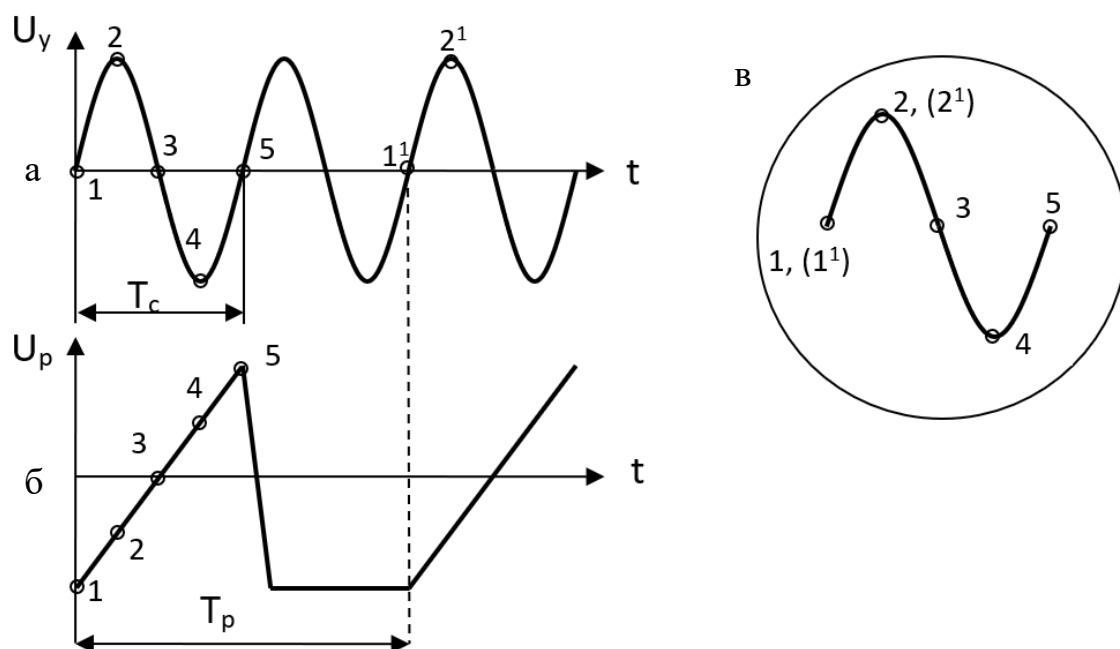
Принцип действия ЭЛО основан на применении в них в качестве устройства отображения информации электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), которые обладают линейной зависимостью между отклонением светового пятна на экране ( $\ell$ ) и вызвавшим это отклонение управляющим напряжением ( $U_{упр}$ ).

$$\ell = S \cdot U_{упр},$$

где  $S$  – чувствительность по отклонению.

Для получения изображения исследуемого сигнала (осциллограммы) на экране ЭЛТ необходимо управлять движением светового пятна в горизонтальном и вертикальном направлениях. Смещение пятна в вертикальном направлении осуществляется исследуемым сигналом, а в горизонтальном – напряжением развертки. Эпюры напряжений, поясняющие получение

изображения на экране ЭЛТ, а также изображение осциллограммы показано на рисунке 9.1.



а – синусоидальное распределение напряжения, б – линейное распределение напряжения, в – осциллограмма

Рисунок 9.1 – Эпюры напряжений ЭТЛ

В качестве примера исследуется напряжение простейшей формы – синусоидальное (рисунок 9.1, а). Напряжение развертки изменяется во времени по линейному закону (рисунок 9.1, б). В течение прямого хода напряжения развертки луч перемещается вдоль горизонтальной линии (слева направо) экрана с постоянной скоростью и ввиду того, что на вертикально-отклоняющие пластины воздействует напряжение исследуемого сигнала, световое пятно на экране описывает траекторию 1 – 2 – 3 – 4 – 5 (рисунок 9.1, в). Таким образом, на экране отображается исследуемый сигнал или осциллограмма.

В течение обратного хода луч «быстро» перемещается влево. Траектория, описываемая световым пятном во время обратного хода луча, не несет полезной

информации об исследуемом сигнале, а наоборот, искажает его. Поэтому в течение обратного хода луча на модулирующий электрод ЭЛТ подается запирающее напряжение, т.е. перемещение светового пятна во время обратного хода луча наблюдаться на экране не будет. Для получения устойчивого, неподвижного изображения необходимо, чтобы в каждом цикле развертки электронный луч описывал одну и ту же траекторию. Это обеспечивается выполнением условия синхронизации, т.е. период развертки должен быть кратен периоду сигнала:

$$T_p = nT_c,$$

где  $n = 1, 2, 3$  и т.д.

Упрощенная структурная схема ЭЛО представлена на рисунке 9.2.

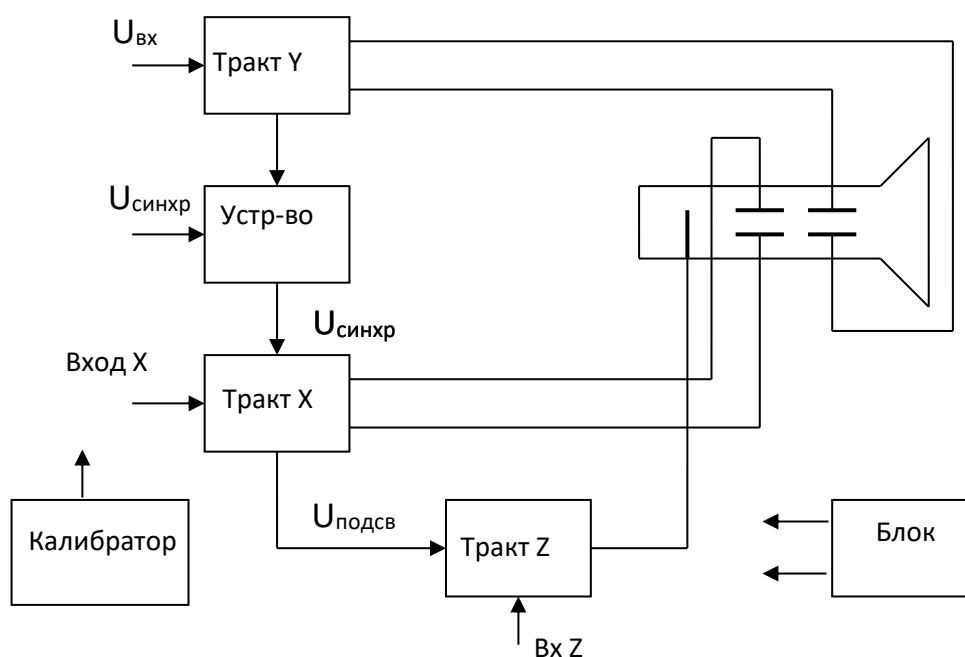


Рисунок 9.2 – Упрощенная схема ЭЛО

Основными элементами осциллографа являются ЭЛТ, тракт вертикального отклонения «Y», тракт горизонтального отклонения «X» и тракт «Z». Согласно схеме, исследуемый сигнал  $U_c$  подается на вход тракта «Y». Здесь осуществляется усиление и преобразование исследуемого сигнала в два противофазных напряжения, которые подаются на вертикально-отклоняющие пластины ЭЛТ. В тракте «X» осуществляется формирование пилообразного напряжения развертки  $U_p$  и его синхронизация с исследуемым сигналом  $U_c$ .

Синхронизация может осуществляться самым исследуемым сигналом (внутренняя синхронизация,  $U_{\text{синхр}}$  поступает из канала «Y») или внешним сигналом (напряжение синхронизации поступает на «Вход X»).

Тракт «Z» предназначен для управления яркостью луча ЭЛТ. На его вход подаются импульсы подсвета прямого хода луча ( $U_{\text{подсв}}$ ) с тракта «X». При отсутствии импульсов подсвета на модулирующем электроде ЭЛТ действует запирающее напряжение. Кроме того, на вход «Z» может подаваться произвольное напряжение, которое будет модулировать электронный луч по яркости. Это расширяет функциональные возможности ЭЛО.

Важнейшей задачей, которая стоит перед трактом вертикального отклонения, является передача формы сигнала с минимальными искажениями. Поэтому важными нормируемыми параметрами тракта «Y», определяющими его частотные свойства, являются либо амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), либо переходная характеристика (ПХ). АЧХ – это зависимость коэффициента усиления (передачи)  $K_y = U / U_{\text{max}}$  от частоты (рисунок 9.3, а). ПХ – это изображение на экране ЭЛТ, которое получается при подаче на вход канала «Y» перепада напряжения (рисунок 9.3, б).

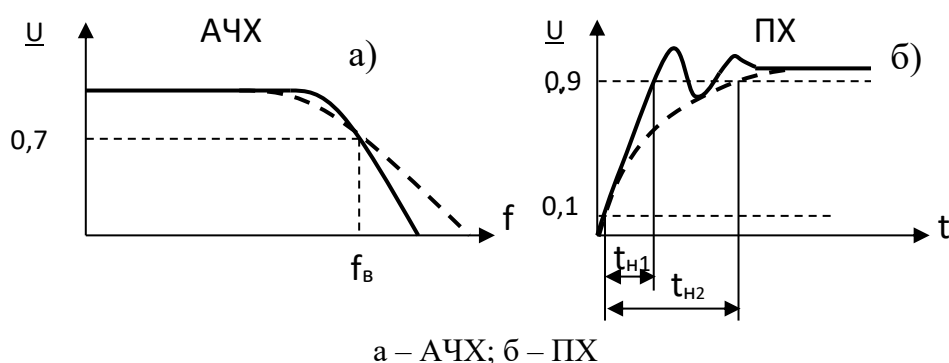


Рисунок 9.3 – Влияние крутизны спада АЧХ на время нарастания переходной характеристики

При крутом спаде АЧХ в области высоких частот время нарастания ПХ мала, однако на вершине ПХ имеются выбросы. При пологом спаде АЧХ выбросов на вершине нет, однако время нарастания ПХ ( $t_H$ ) возрастает.

Оптимальной формой АЧХ является Гауссова кривая, которая описывается уравнением:

$$K_y(f) = \exp[-0,35(f/f_n)^2].$$

В этом случае обеспечивается минимальное время нарастания ПХ при минимальных выбросах, но такое АЧХ имеет очень пологий спад. Однако реальные АЧХ и ПХ отличаются от тех, которые были изображены ранее.

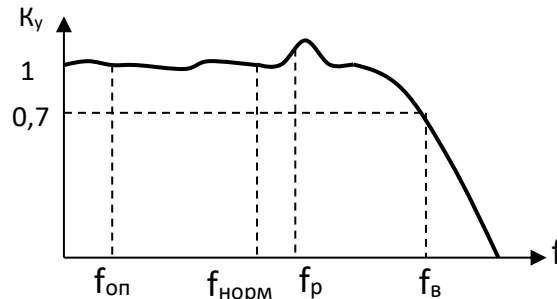


Рисунок 9.4 – Реальная АЧХ

Например, на рисунок 9.4 показана реальная АЧХ осциллографа, которая характеризуется следующими параметрами:

- $f_{оп}$  – опорная  $f$ ,  $K_y=1$ , на этой  $f$  осуществляется калибровка;
- нормальная область АЧХ, в пределах которой неравномерность АЧХ не превышает  $\Delta K_y$ ;
- $f_p$  – расширенная область АЧХ. Неравномерность не превышает 10%;
- $f_b$  – верхняя граничная частота.

По точности ЭЛО делится на 4 класса точности.

Таблица 9.1

КТ	1	2	3	4
Основная погрешность измерения, %	3	5	10	12
Погрешность $\delta K_0$ , %	2,5	4	8	10
Неравномерность вершины ПХ, %	1,5	2	3	5

Для расширения функциональных возможностей ЭЛО их тракты вертикального отклонения выполняют двухканальными, что обеспечивает одновременное отображение на экране ЭЛО двух независимых сигналов. Кроме

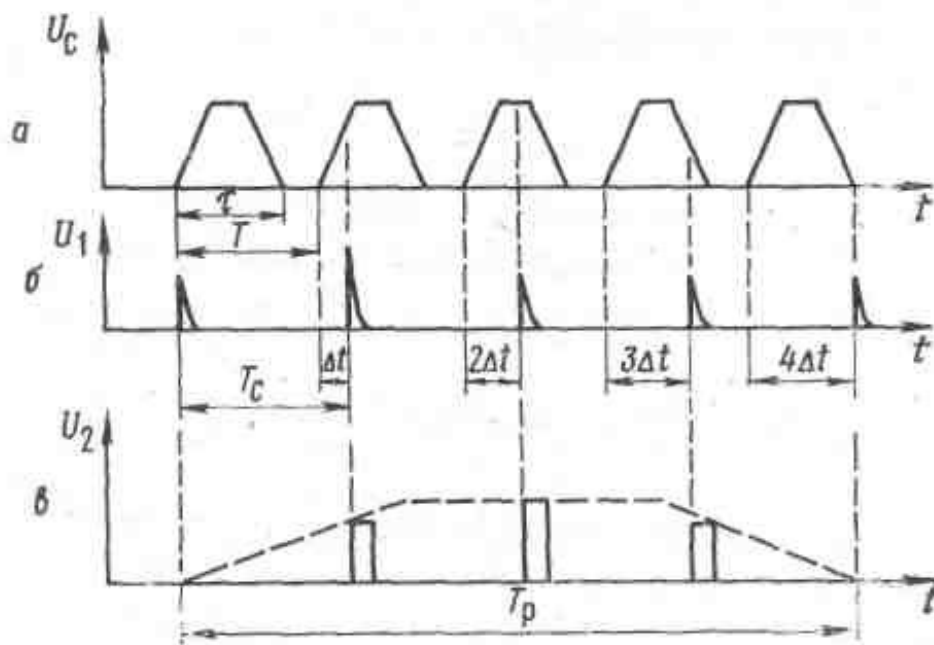
того, в некоторых моделях ЭЛО предусмотрено два генератора развертки (основной и задержанной), что дает возможность более детального исследования сложных сигналов (режим «электронная лупа»).

Однако применение электронных осциллографов для исследования наносекундных импульсов и колебаний СВЧ ограничено из-за ряда причин, в первую очередь вследствие искажения формы наблюдаемого импульса. Перечисленные недостатки были преодолены только с появлением скоростных и стробоскопических осциллографов.

В скоростных осциллографах применяют ЭЛТ специального типа с отклоняющей системой типа бегущей волны (трубки бегущей волны-ТБВ), благодаря чему повышается чувствительность, исключается влияние конечного времени пролета электронов. Усилители вертикального отклонения в скоростных осциллографах обычно не применяют, поэтому общая чувствительность осциллографа не высока (минимальная амплитуда сигнала должна быть не менее 0,1В). Отклонение луча по вертикали осуществляется с помощью обычных пластин. А в генераторах развертки для обеспечения высокой скорости изменения напряжения требуется использовать большие токи заряда времязадающих конденсаторов (порядка 0,5...1А). При большом токе заряда усложняется устройство питания, требуются мощные транзисторы и т.п. Так как нет усилителя вертикального отклонения, то невозможно провести калибровку осциллографа. Вместе с тем канал «У» имеет большую нелинейность амплитудной характеристики. Поэтому в скоростных осциллографах формируют специальное растровое изображение с помощью генератора ступенчато-возрастающего напряжения, т.е. масштабная сетка формируется электронным путем.

Проблема исследования импульсов малой длительности решается применением стробоскопического метода, который заключается в сжатии спектра сигналов без искажения их формы. Такое преобразование позволяет наблюдать и исследовать наносекундные импульсы с помощью относительно низкочастотных устройств. Стробоскопический метод осциллографирования

основан на получении изображения осциллограммы сигнала путем последовательного выделения отдельных его участков с помощью стробирующих импульсов и схемы преобразования. При этом используются функциональные узлы обычных универсальных осциллографов. Сущность стробоскопического метода поясняется рисунок 9.5.



а – Исследуемый сигнал, б – стробирующие импульсы, в – трансформированный сигнал

Рисунок 9.5 – Сущность стробоскопического преобразования сигнала

Согласно рисунку, строб-импульсы  $U_1$  сдвигаются в каждом такте относительно исследуемого сигнала  $U_c$  на интервал  $\Delta t$ , который называется шагом считывания. При одновременной подаче этих сигналов на стробоскопический смеситель на его выходе будут формироваться импульсы, амплитуда которых пропорциональна мгновенным значениям исследуемого сигнала в точках считывания (рисунок 8.5, в). Огибающая этих импульсов повторяет форму исследуемого сигнала, которая восстанавливается по светящимся точкам на экране ЭЛТ. Таким образом, сигнал «растягивается» во времени в несколько раз. Временное преобразование исследуемого сигнала характеризуется коэффициентом трансформации масштаба времени (рисунок 9.5):

$$K_{тр} = nT_c/\tau = T_c/\Delta t.$$



В современных стробоскопических осциллографах  $K_{тр}$  достигает десятков тысяч. Однако используемый принцип временного преобразования ограничивает область применения стробоскопических осциллографов только исследованием периодических или повторяющихся сигналов.

### 9.1.2 Цифровые осциллографы

Цифровым называется осциллограф (ЦО), предназначенный для исследования электрических сигналов путем их преобразования в цифровую форму с последующим визуальным наблюдением на отображающем устройстве, а также автоматическом измерением их амплитудных и временных параметров и математической обработкой. В качестве отображающего устройства могут выступать как электронно-лучевые трубки, так и цифровые индикаторы. В самом общем случае можно считать, что цифровой осциллограф – это конструктивное объединение аналогового осциллографа и электронно-вычислительной машины. Упрощенная структурная схема цифрового осциллографа с ЭЛТ в качестве отображающего устройства показана на рисунке 9.6.

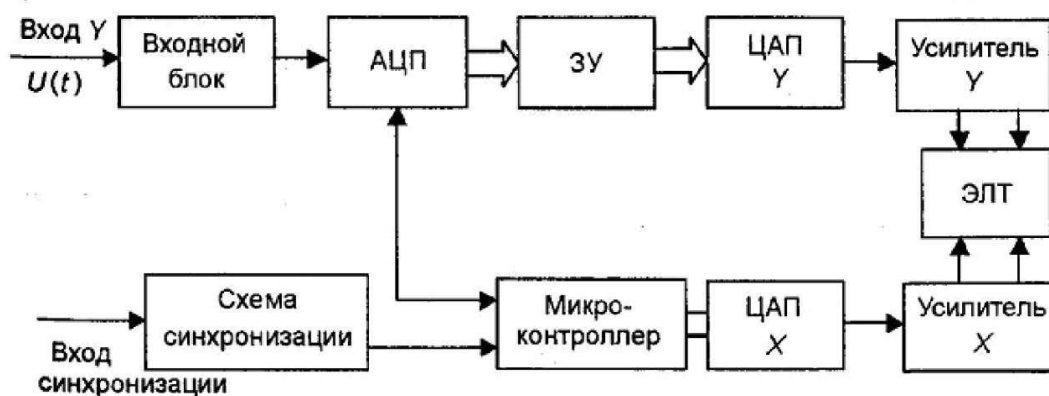


Рисунок 9.6 – Упрощенная структурная схема ЦО с ЭЛТ

Схема ЦО обязательно включает в себя АЦП, назначение которого было рассмотрено ранее, а также микроконтроллер (компьютер), который обеспечивает связь осциллографа с пользователем, а также управляет работой всех узлов. Кроме того, в таких осциллографах имеются дополнительные цифро-аналоговые преобразователи – ЦАП, обеспечивающие получение осциллограммы на экране ЭЛТ.

В более современных ЦО в качестве отображающих устройств используются цифровые индикаторные устройства – дисплеи. Упрощенная структурная схема такого осциллографа показана на рисунке 9.7.

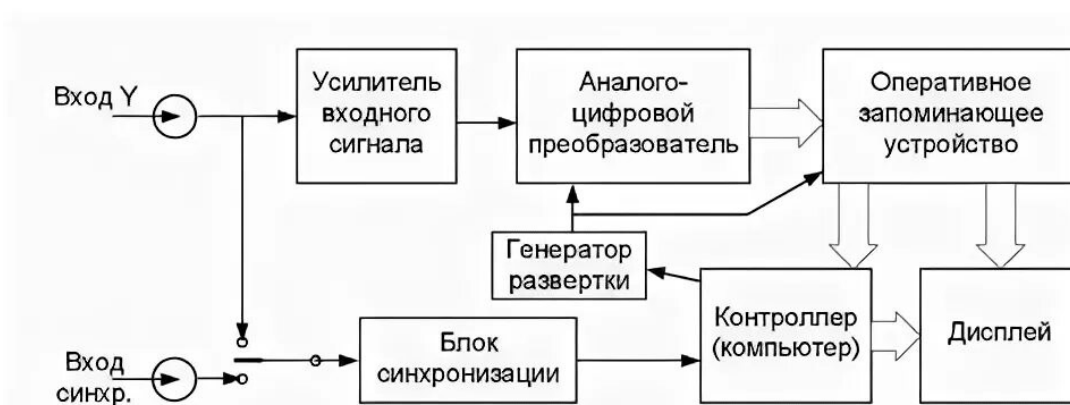


Рисунок 9.7 – Упрощенная структурная схема ЦО с дисплеем

Исследуемый входной сигнал подается на вход  $Y$  и через усилитель входного сигнала поступает на вход АЦП, который производит оцифровку его мгновенных значений. Частоту генератора развертки (частоту дискретизации) можно изменять в широких пределах, что соответствует изменению масштаба по горизонтали и аналогично изменению скорости развёртки в аналоговых осциллографах. На выходе АЦП входной сигнал представлен дискретной последовательностью кодовых (цифровых) слов, которые записываются в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Запись данных в ОЗУ осуществляется таким образом, что каждое новое значение вытесняет из ОЗУ наиболее старое по времени значение. Для получения устойчивого изображения исследуемого сигнала в осциллографе осуществляется синхронизация напряжения развертки с исследуемым сигналом. Если выбранный для синхронизации сигнал соответствует заданным в настройках параметрам (полярности, уровню) блок синхронизации сообщает об этом контроллеру, который производит оцифровку следующих точек исследуемого сигнала, а затем останавливает генератор развертки. Последняя запись точек в ОЗУ отображается на экране дисплея. Каждой ячейке ОЗУ соответствует точка на экране по цвету отличающаяся от фона. Её горизонтальная координата определяется номером ячейки, а вертикальная кодовым словом, находящемся в этой ячейке. Таким

образом, пользователь видит на дисплее изображение входного сигнала или осциллограмму.

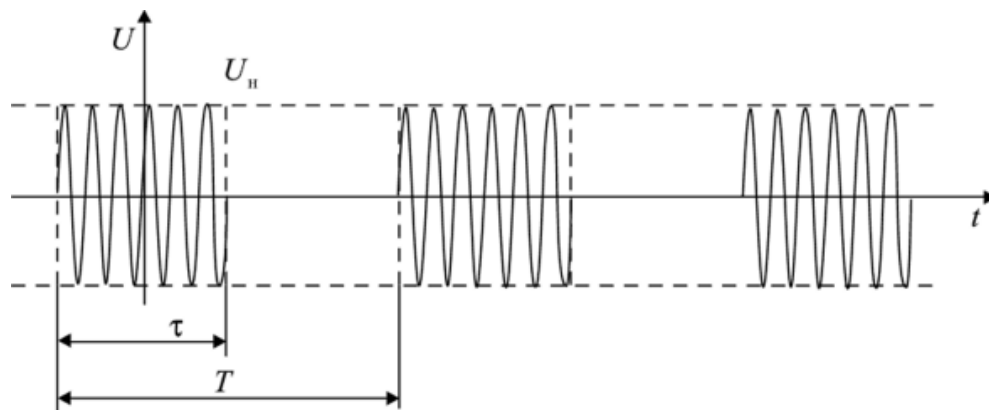
Высокая скорость преобразования позволяет видеть изображение на экране цифрового осциллографа практически в реальном времени. Используя возможности компьютера цифрового осциллографа, можно не только наблюдать входные сигналы в реальном времени, но и выполнять различные математические операции с ними: усреднять входной сигнал для уменьшения шума, складывать и вычитать сигналы в разных каналах, растягивать во времени фрагменты записанного в память сигнала, определять частотный спектр сигнала путем применения быстрого преобразования Фурье, измерять различные параметры входных сигналов (амплитуда, частота, период и т.п.). Кроме того, многие модели цифровых осциллографов способны выводить изображение с экрана на печатающее устройство (принтер), записывать оцифрованный входной сигнал на внешние носители информации, передавать накопленные данные на компьютеры или даже в Интернет. Все эти возможности цифровых осциллографов приводят к тому, что они постепенно вытесняют все другие виды осциллографов.

## **9.2 Анализаторы спектра**

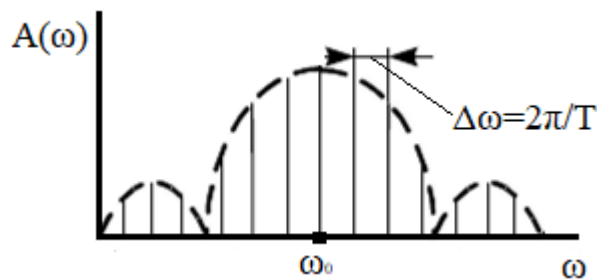
Помимо исследования характеристик сигналов во временной области, которое осуществляется с помощью различных типов осциллографов, на практике возникает необходимость в исследовании сигналов в частотной области, т.е. исследовать спектральное представление сигналов. Эта задача особенно актуальна при исследовании характеристик сложных радиоимпульсов, которые широко применяются в радиотехнике, радиолокации, автоматическом управлении, технике связи и других областях. Средствами измерений, позволяющими решать подобные задачи, являются анализаторы спектра. Анализатор спектра – прибор для наблюдения и измерения относительного распределения энергии электрических (электромагнитных) колебаний в полосе частот, что дает возможность проанализировать сигнал с точки зрения его

частоты, амплитуды и уровней. Анализатор спектра является важным инструментом при разработке, обслуживании и эксплуатации радиоаппаратуры, мобильного и телекоммуникационного оборудования, а также самых разных систем связи. Часто возникает необходимость осуществления контроля за спектром сигнала, например, государственный контроль частот радио-служб. Рассмотрим некоторые положения спектрального анализа, позволяющие конструировать эти СИ.

Анализатор спектра должен выдавать частотно-амплитудную характеристику сигнала. Сам спектр сигнала представляет собой набор синусоидальных колебаний в определенный момент времени и отображает распределение энергии сигнала по частотам. На рисунке 9.7 в качестве примера показана последовательность прямоугольных радиоимпульсов с периодом повторения  $T$  и длительностью радиоимпульса  $\tau$ , и также его спектр.



а



б

а – радиоимпульсы; б – спектр радиоимпульса

Рисунок 9.7 – Последовательность и спектр радиоимпульсов

Принципы построения анализаторов спектра основаны на преобразовании Фурье – разложении гармонического сигнала на синусоидальные колебания.

Согласно такому преобразованию, любое периодическое колебание может быть представлено суммой гармонических колебаний:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(\omega) \cos(n\omega t + \varphi_n).$$

Совокупность  $\{A_n(\omega)\}$  называется спектром амплитуд, а совокупность  $\{\varphi_n\}$  называется спектром фаз (совокупность начальных фаз гармонических колебаний). Это выражение и лежит в основе построения анализаторов спектра. Анализ этого выражения позволяет сделать важные выводы.

1. Спектры периодической последовательности сигналов являются дискретными (линейчатыми). Частотный интервал между спектральными составляющими  $\Delta\omega$  определяется периодом следования импульсов  $T$ . Если  $T \rightarrow \infty$  (одиночный импульс), то  $\Delta\omega \rightarrow 0$ , т.е. спектральные линии сближаются и образуют сплошной спектр.

2. Форма огибающей спектра зависит от формы сигнала и не зависит от периода повторения  $T$  (она определяется законом модуляции одиночного импульса).

3. Центральная спектральная составляющая спектра  $\omega_0$  определяется несущей частотой радиоимпульса. При изменении несущей частоты форма спектра не изменяется, а он лишь перемещается по частотной оси.

4. Спектры периодических и непериодических сигналов бесконечны, а при аппаратурной реализации анализ спектра ограничен во времени. Поэтому вводится понятие аппаратурного спектра, определяемого временем анализа  $T_a$ . Аппаратурный спектр зависит не только от частоты, но и от времени анализа.

Перечисленные свойства позволяют реализовать процесс анализа спектра сигналов и конструировать анализаторы спектра. При этом возможны следующие основные методы анализа: фильтровой, дисперсионный, рециркуляционный и цифровой.

Основным элементом простейшего фильтрового анализатора спектра является узкополосный фильтр, который можно перестраивать по частоте. При

этом исследуемый сигнал подается на вход фильтра (рисунке 9.8), а по напряжению на его выходе судят об амплитуде спектральной составляющей на частоте настройки фильтра, которая отображается на экране индикаторного устройства (ЭЛТ, дисплея т.п.). Перестройка частоты настройки фильтра может осуществляться оператором либо автоматически, например, генератором пилообразного напряжения.

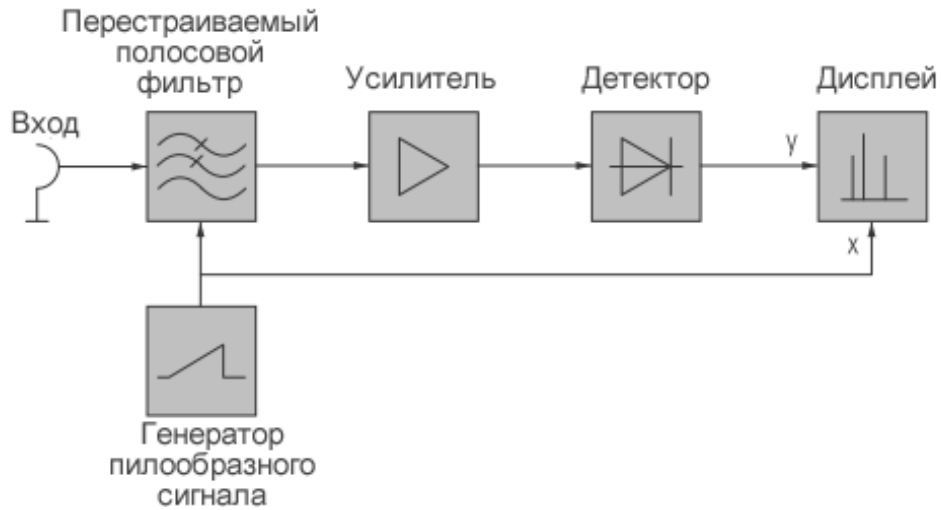


Рисунок 9.8 – Фильтровой метод анализа спектра

Дисперсионный метод основан на использовании особенностей распространения сигналов в замедляющих системах – дисперсионных линиях задержки (ДЛЗ). В ДЛЗ фазовая скорость  $v_{\phi} = \omega/\beta$  (где  $\beta = 2\pi/\lambda$ ) зависит от частоты. Следовательно, различные частотные составляющие сигнала распространяются в ДЛЗ с различными скоростями. При этом на выходе ДЛЗ последовательно появляются составляющие спектра со сдвигом во времени. Их огибающая соответствует модулю спектра сигнала, поступающего на вход ДЛЗ. Преимуществами такого метода является возможность осуществления анализа спектров в реальном масштабе времени. Однако ограниченный частотный диапазон линий задержки и сложность конструкции ограничивает применения данного метода. На рисунке 9.9 показана схема дисперсионного анализатора спектра с использованием ЭЛТ.

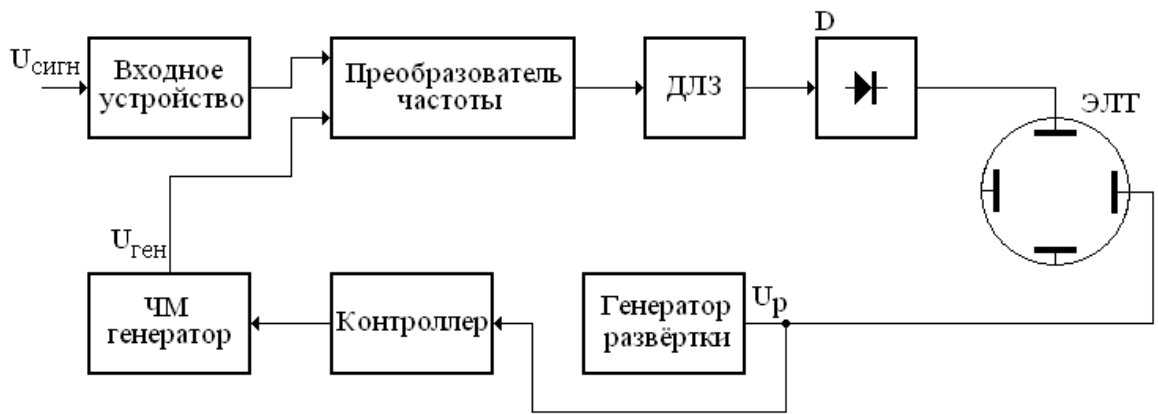
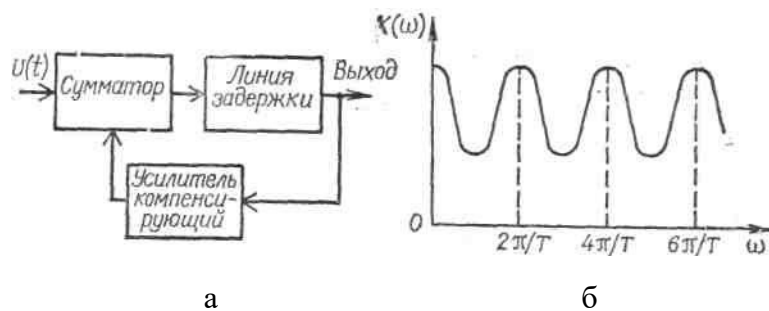


Рисунок 9.9 – Дисперсионный анализатор спектра

Рециркуляционный (интерференционный) метод анализа аналогичен фильтровому, но используется рециркуляционный фильтр. Основным элементом такого анализатора является гребенчатый фильтр, структура и частотная характеристика которого показаны на рисунке 9.10.



а – Структурная схема гребенчатого фильтра; б – Частотная характеристика гребенчатого фильтра

Рисунок 9.10 – Структурная схема и частотная характеристика гребенчатого фильтра

Если на вход гребенчатого фильтра подать сигнал с частотой

$$\omega_k = 2\pi K/T_3,$$

где  $K$  – целое число;

$T_3$  – время задержки сигнала в линии задержки, то входное напряжение  $U(t)$  и задержанное будут синфазными.

При воздействии на фильтр сигнала произвольной формы огибающая отклика соответствует текущему спектру этого сигнала, т.е. на выходе фильтра

будет формироваться сигнал, форма которого пропорциональна спектру входного сигнала. Рециркуляционные анализаторы спектра позволяют проводить анализ спектра в реальном масштабе времени. По своим параметрам они аналогичны фильтровым анализаторам и применяются тогда, когда в сравнительно узкой полосе обзора требуется высокая разрешающая способность.

Наиболее современным является цифровой метод анализа спектра. Он позволяет осуществлять анализ в широком диапазоне частот (от нуля до нескольких сотен мегагерц) и отличается высокой точностью, хорошим разрешением, линейностью и динамическими амплитудными характеристиками. Метод основан на непосредственном преобразовании Фурье и исключительно на цифровой обработке данных с помощью ЭВМ с последующей индикацией результатов на дисплее. При этом возможно вычислять не только амплитудный, но и фазовый спектры, а также одновременно представлять сигналы во временной и частотной областях.

В зависимости от способа получения изображения спектра различают анализаторы параллельного и последовательного анализа.

При параллельном анализе исследуемый сигнал подается одновременно на несколько фильтров, настроенных на различные частоты. К их выходам подключаются индикаторы, измеряющие амплитуды гармонических составляющих. Такие анализаторы эффективны при исследованиях периодических и непериодических сигналов. Их достоинствами является наблюдение спектра в реальном масштабе времени и малое время анализа, а недостатком – сложность аппаратурной реализации.

При последовательном анализе составляющие спектра получаются поочередно, в соответствии с перестройкой фильтра. Непременным условием достоверного анализа спектра является постоянство спектра исследуемого сигнала в течении времени анализа. Достоинствами метода является простота аппаратурной реализации, а к недостаткам относятся большое время анализ и возможность исследования спектров только периодических сигналов.



Реализуются также и комбинированные анализаторы спектра, в которых сочетаются преимущества рассмотренных выше способов.

Классификацию анализаторов спектра осуществляют также и по другим признакам: по диапазону частот исследуемого сигнала, по способу обработки измерительной информации, по характеру анализа и т.д.

## 10 СОВРЕМЕННЫЕ АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Измерительные информационные технологии являются разновидностью информационных технологий и выделяются из этого обширного множества тем, что носят очевидный познавательный характер и реализуют специфические процедуры, присущие только им:

- получение исходной измерительной информации в результате взаимодействия первичных измерительных преобразователей (сенсоров) с объектом измерений;
- преобразование измерительной информации с заданной и гарантированной точностью;
- сопоставление сигналов измерительной информации с размерами общепринятых единиц измерения, оценка и представление характеристик остаточной неопределенности значений измеряемых величин.

Современные измерительные информационные технологии приобретают дополнительные свойства благодаря использованию аппаратных и программных средств искусственного интеллекта. Одной из важнейших задач развития измерительных информационных технологий является расширение номенклатуры измеряемых величин, обеспечение измерений в условиях воздействия «жестких» внешних факторов (высокая температура, большое давление, ионизирующее излучение и т.д.).

Решение подобных задач связано с усложнением структуры используемых средств измерений (СИ); созданием комплексов взаимосвязанных СИ и технических средств, необходимых для их функционирования. Современные объекты исследования характеризуются большим количеством параметров, изменяющихся подчас с большой скоростью.

Иногда, чтобы получить информацию о параметрах объекта, необходимо проводить комплексные измерения, а значение измеряемой величины получать расчетным путем на основе известных функциональных зависимостей между ней и величинами, подвергаемыми измерениям.

Указанные задачи успешно решаются с помощью информационных измерительных систем (ИИС), получивших широкое распространение. В настоящее время нет общепринятого однозначного определения, что такое ИИС. Среди существующих подходов к рассмотрению понятия ИИС следует выделить два основных.

Сущность одного подхода отражена в рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» в которой ИИС рассматривается как разновидность измерительной системы (ИС). В пункте 6.14 РМГ 29-99 приведено следующее определение:

Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

Сущность второго подхода отражена в определениях, приведенных в рекомендации МИ 2438-97 «ГСИ. Системы измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения».

Измерительная система – совокупность определенным образом соединенных между собой средств измерений и других технических устройств (компонентов измерительной системы), образующих измерительные каналы, реализующая процесс измерений и обеспечивающая автоматическое (автоматизированное) получение результатов измерений (выражаемых с помощью чисел или соответствующих им кодов) изменяющихся во времени и распределенных в пространстве физических величин, характеризующих определенные свойства (состояние) объекта измерений.

Возможность развития, наращивания ИИС в процессе эксплуатации или возможность изменения ее состава (структуры) в зависимости от целей эксперимента, по существу затрудняет или исключает регламентацию

требований к таким ИИС в отличие от обычных СИ, являющихся «завершенными» изделиями на момент выпуска их заводом-изготовителем.

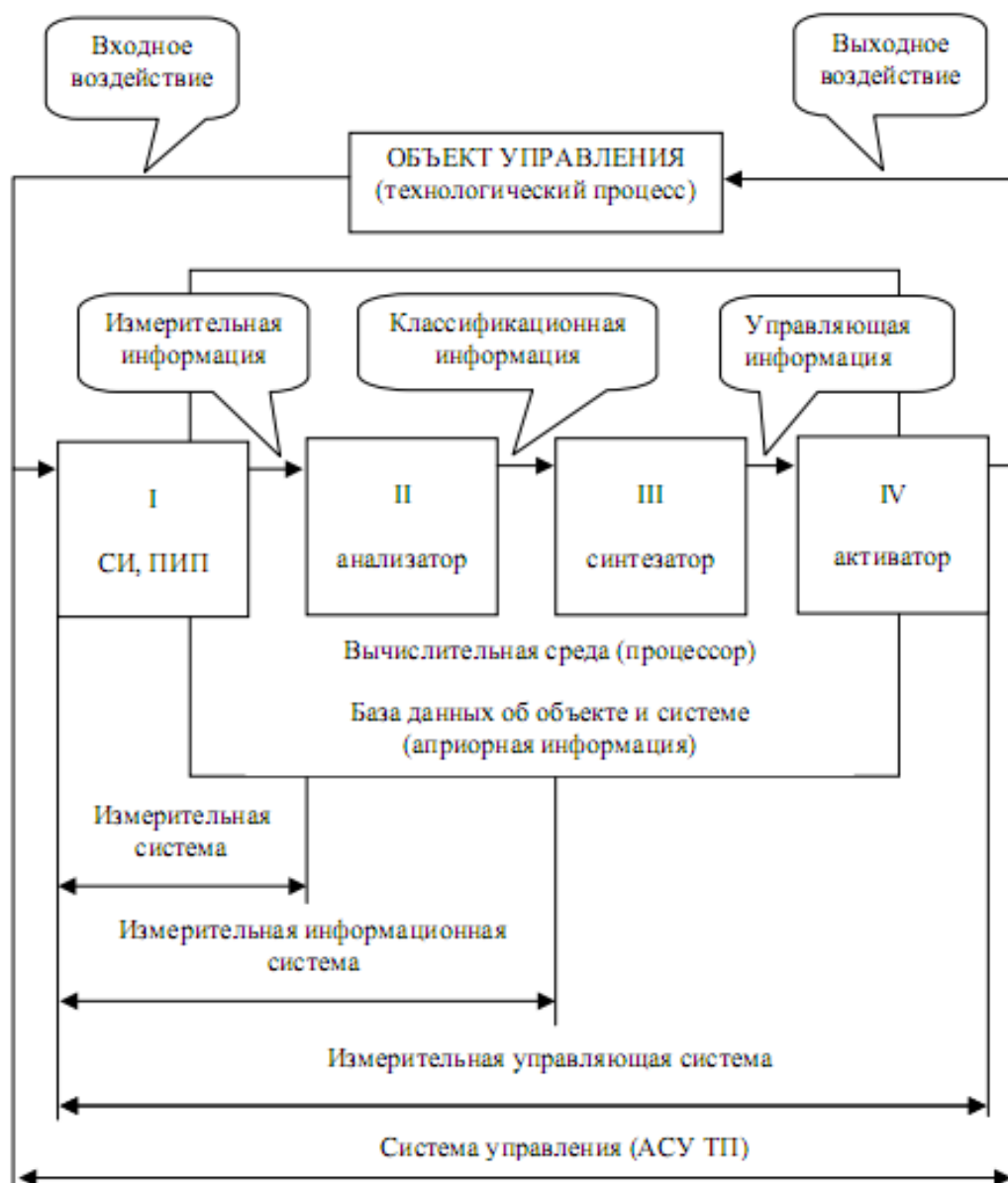
Название «информационная» указывает:

– на конечный продукт, получаемый при помощи ИИС. Конечным продуктом является именно информация – экспериментальная количественная информация о состоянии материальных объектов и о процессах, протекающих в них, будь то сырье, готовые промышленные изделия, природные процессы или живые организмы;

– на принадлежность ИИС к более широкой области – информационной технике. Эта более широкая область имеет и другие составные части. Среди них вычислительная техника, техника связи и хранения информации, которые могут по отношению к ИИС являться потребителем информации, а могут и входить в состав ИИС. ИИС связывает мир физический с миром цифр и других знаков, из которых строятся математические формулы, различные сообщения и программы для ЭВМ.

Основной процесс эмпирического познания – измерение, при помощи которого получается первичная количественная информация. Поэтому к понятию «информационная» добавляется уточняющее «измерительная». Одним из условий рассмотрения СИ как системы является необходимость и целесообразность изменений его структуры. Изменения могут осуществляться как от применения к применению (многофункциональная система), так и в процессе применения (управляемая или адаптивная системы).

Упрощенная структура ИИС, предложенная профессором В.А. Грановским, приведена на рисунке 10.1.



I – Измерительная подсистема, II – Классификационная подсистема,  
 III – Управляющая подсистема, IV – Исполнительная подсистема,  
 ПИП – первичный измерительный преобразователь

Рисунок 10.1 – Упрощенная структура ИИС и АСУ ТП

Развитие ИИС целесообразно рассматривать в двух аспектах: структурном и функциональном. Первый отражает интегрирование различных подсистем, широкое использование средств вычислительной техники, что приводит к возникновению систем с гибкой структурой. Второй аспект характеризует резкое возрастание числа функций, выполняемых системой. При этом центр тяжести переносится с измерительных функций на другие информационные функции, связанные с использованием результатов измерений. Таким образом, в ИИС

измерение во все большей степени становится неразрывно связанным с другими функциями (логической обработки, анализа результатов измерений и др.) и его выделение не всегда возможно.

Учитывая приведенные выше особенности ИИС можно дать два следующих определения ИС и ИИС в широком смысле.

Измерительная система – система средств измерений и вспомогательных технических средств, представляющая собой средство измерений.

Измерительная информационная система – информационная система, вспомогательных технических средств, в которой измерительная информация преобразуется в другие виды информации.

Наиболее крупной структурной единицей ИИС, для которой могут нормироваться метрологические характеристики (МХ), является измерительный канал (ИК). Он представляет собой последовательное соединение СИ, образующих ИИС (некоторые из этих СИ сами могут быть многоканальными, в этом случае следует говорить о последовательном соединении ИК указанных СИ).

Такое соединение СИ, предусмотренное алгоритмом функционирования, позволяет выполнять законченную функцию от восприятия измеряемой величины до индикации или регистрации результата измерений включительно, или преобразование его в сигнал, удобный для дальнейшего использования вне ИИС, для ввода в цифровое или аналоговое вычислительное устройство, входящее в состав ИИС, для совместного преобразования с другими величинами, для воздействия на исполнительные механизмы. Типовая структура ИК включает в себя первичный измерительный преобразователь, линии связи, промежуточный измерительный преобразователь, аналого-цифровой преобразователь, процессор, цифроаналоговый преобразователь.

Различают простые ИК, реализующие процедуру измерения какой-либо величины, и сложные ИК, реализующие процедуры измерения нескольких величин и получение искомой величины расчетным путем на основе известных функциональных зависимостей между измеренными и рассчитываемой

величинами. Начальная часть сложных ИК разделяется на несколько простых ИК, например, при измерениях мощности в электрических сетях начальная часть ИК состоит из простых каналов измерений электрического напряжения и тока. Учитывая многоканальность ИИС, использование одних и тех же устройств в составе различных ИК, последние можно выделить зачастую только функционально, и их конфигурация реализуется программным путем. Протяженность ИК может составлять от нескольких метров до нескольких сотен километров. Число ИК – до нескольких тысяч. Информация от первичных преобразователей передается обычно при помощи электрических сигналов (реже – пневматических) – ток, напряжение, частота следования импульсов. В некоторых областях измерений современные первичные измерительные преобразователи имеют цифровой код. При большой протяженности ИК используются радиосигналы.

Часть ИИС после линий связи, соединяющих ее с первичными преобразователями, обычно называют измерительно-вычислительным комплексом (ИВК). Значительная часть современных ИВК строится на базе контроллеров, как правило, модульного исполнения, включающих в себя аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, процессор, модули дискретной (бинарной) информации (входные и выходные), вспомогательные устройства. Состав, конфигурация, программное обеспечение ИВК конкретизируются с учетом специфики объекта.

Особенности ИИС делают особенно актуальной для них проблему расчета МХ ИИС по МХ образующих их компонентов. Метод расчета МХ ИК ИИС существенно зависит от того, относятся ли образующие его СИ к линейным устройствам. Методы расчета нелинейных систем зависят от вида нелинейности, возможности расчленения СИ на линейную инерционную и нелинейную безынерционную часть и от других обстоятельств и отличаются большим разнообразием.

## 10.1 Интеллектуальные измерительные преобразователи

В подавляющем числе случаев, любое измерительное устройство состоит из цепочки аналоговых измерительных преобразователей физических величин из одного вида в другой, заканчивающейся блоком того или другого вида, преобразующего конечную аналоговую физическую величину в ее цифровое значение. Вид аналоговой физической величины, после последнего аналогового преобразования, определяется техническим удобством ее преобразования в цифровую форму. В общем случае измерительным преобразователем называется аналоговый преобразователь одной физической величины в другую, обладающий нормированными метрологическими характеристиками.

Следовательно, для любого измерительного преобразователя должно указываться предельное значение погрешности, которое данный измерительный преобразователь может внести в измерительную цепь.

Принято различать несколько типов аналоговых измерительных преобразователей, в зависимости от того назначения, которое они имеют в измерительной цепи:

- Первичный преобразователь (датчик, сенсор) – измерительный преобразователь, на который воздействует измеряемая величина, т.е. он является первым в измерительной цепи. Выделяют, при этом, измерительные преобразователи электрических величин и измерительные преобразователи неэлектрических величин. Примером последних является термопара в цепи термоэлектрического термометра.

- Вторичные преобразователи, подключаемые к измерительной цепи после первичного преобразователя, которые служат либо для масштабирования измеряемой величины (усилители, делители), либо для ее линеаризации, либо для дистанционной передачи измерительного сигнала (модуляторы, демодуляторы), либо просто для преобразования входной величины в ту физическую величину, для которой наиболее просто получить числовое значение.



Интеллектуальными называют те датчики, которые, кроме преобразования рода физической величины, осуществляют и некоторую предварительную обработку измеряемой информации.

## 10.2 Назначение и виды ИИС

Основными признаками ИИС являются: область применения; способ комплектования; структура, виды входных сигналов; виды измерений; режим работы, функциональные свойства компонентов.

По области применения ИИС делят на группы:

- для научных исследований;
- для испытаний и контроля сложных изделий;
- для управления технологическими процессами.

По способу комплектования:

- агрегатированные;
- неагрегатированные, состоящие из компонентов, специально разработанных для конкретных систем.

Агрегатированные ИИС, как правило, включают универсальное ядро – ИВК, на основе которого, используя датчики различных физических величин можно строить ИИС различного назначения.

По структурным признакам:

- системы параллельно-последовательной структуры. Основным признаком такой структуры служит наличие ИК циклически коммутируемого с множеством датчиков;
- системы параллельной структуры, включающие множество одновременно работающих каналов, выходные системы которых преобразуются функциональным единым преобразователем и обрабатываются в одном вычислительном устройстве.

Сигналы на входе ИИС могут быть непрерывными или дискретными, детерминированными или случайными.

В зависимости от соотношения между скоростью изменения входных сигналов и инерционными свойствами системы различают два основных режима работы ИИС: статический и динамический. В динамическом режиме инерционные свойства системы оказывают влияние на результат измерения.

Измерительный компонент ИИС – средство измерений: измерительный прибор, измерительный преобразователь, мера, измерительный коммутатор.

Измерительные компоненты по характеру функциональных преобразований подразделяются на аналого-цифровые и цифроаналоговые.

Аналоговые измерительные компоненты могут быть линейными и нелинейными, аналого-цифровые по своей природе являются нелинейными устройствами.

Связующий компонент ИИС – техническое устройство либо часть окружающей среды, предназначенные или используемые для передачи с минимально возможными искажениями сигналов, несущих информацию об измеряемой величине, от одного компонента ИИС к другому.

Вычислительный компонент ИИС – цифровое вычислительное устройство (или его часть) совместно с программным обеспечением, выполняющее функцию обработки (вычисления) результатов наблюдений для получения расчетным путем результатов измерений, выражаемых числом или соответствующим кодом.

Вычислительные компоненты подразделяются на:

- аналогово-вычислительные – аналоговые устройства, выходной сигнал которых является функцией двух или более сигналов;
- цифровые вычислительные – устройства, выходной цифровой сигнал которых является функцией двух или более сигналов.

Информационный компонент ИИС – техническое средство, предназначенное для получения информации, хранения, преобразования и передачи информации.

С точки зрения информационной теории измерительных устройств процесс измерения, выполняемый любым измерительным устройством (включая

необходимые действия человека-оператора), состоит из ряда последовательных преобразований информации об измеряемой величине, проводимых до тех пор, пока она не будет представлена в том виде, ради получения которого и выполняется данное измерение. СИ рассматривается как канал приема (получения) и передачи информации (измерительной). Таким образом, СИ и измерительный компонент ИИС являются разновидностью информационного компонента.

### **10.3 Программная и аппаратная части средств измерений**

Как правило, в любых современных средствах измерений присутствует как аппаратная, так и программная части. Соотношение этих частей может быть различным и определяется прежде всего задачей, для которой будут применяться данные средства измерений. Например, усреднение измерений может быть выполнено самим датчиком благодаря его свойствам, так и с помощью нескольких измерений с датчика с последующим усреднением программой обработки. Например, с датчика температуры на основе термо-сопротивления, благодаря инерции его реакции на температуру окружающей среды, мы можем регистрировать за один раз за время  $t$  среднюю температуру за этот промежуток времени, однако имея другой датчик температуры, менее инертный и достаточно быстро реагирующий на изменение температуры, мы можем за тот же промежуток времени  $t$  зарегистрировать сигнал несколько раз и потом его усреднить. Результаты измерений при этом могут совпадать, однако в первом случае, за счет усреднений из-за инертности датчика, нагрузка на программу обработки данных меньше и соответственно остается больше времени для выполнения других задач, с другой стороны, в случае усреднения программой мы получаем больше информации, т.к. мы получаем информацию не только о среднем значении, но и о мгновенных значениях температуры.

Несмотря на то, что с помощью аппаратных средств можно значительно разгрузить систему и повысить скорость обработки данных, применение только аппаратной реализации обработки данных не всегда правильно. Во многих

случаях программная обработка данных позволяет более гибко подойти к процедуре регистрации и обработки данных, т.е. позволяя применять данную систему регистрации, в широком круге задач.

## 11 ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ИИС И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Любая ИИС должна быть метрологически корректной и удовлетворять требованиям системы обеспечения единства измерений в соответствии с государственными законодательными актами и международными нормативными документами. Выделение ИИС в отдельную специфическую разновидность средств измерений обусловлено рядом их особенностей, что определяет специфику их метрологического обеспечения. При этом актуальными вопросами метрологического обеспечения являются регламентация метрологических характеристик измерительных каналов (ИК), их экспериментальное определение и контроль, прогнозирование и определение характеристик неопределенности измерений, оценка характеристик точности программ обработки данных и т. п. Кроме того, развитие современной измерительной техники и усложнение измерительных задач, решаемых с помощью ИИС, выдвигают новые требования к их метрологическому обеспечению. Особенности современных ИИС являются их многофункциональность, многоканальность, пространственная распределенность компонентов и составных частей, наличие в своем составе ЭВМ, иногда неразрывная связь с объектом, на котором они эксплуатируются, невозможность комплектной поверки ИК и многие другие. Все это приводит к необходимости решения определенных специфических задач, необходимых при метрологическом обеспечении ИИС. Эти задачи условно можно разделить на три группы: фундаментальные, прикладные и организационно-правовые.

Фундаментальные задачи связаны с разработкой методов оценки МХ ИИС, установлением оптимальных точностных характеристик компонентов ИИС по заданным нормам точности для системы в целом, разработкой методов испытаний, калибровки, поверки.

Прикладные задачи включают разработку методов автоматизации испытаний, поверки, калибровки ИИС, разработку алгоритмов, программ и комплектов средств автоматизированной поверки ИИС.

К организационно-правовым задачам относятся создание комплекса НТД, регламентирующих вопросы метрологического обеспечения ИИС и обеспечение общей координации работ на всех этапах их жизненного цикла: разработки (проектирования), производства, монтажа и наладки, ремонта, эксплуатации.

На сегодняшний день перечисленные задачи в полной мере не решены и требуют дальнейшей проработки. Рассмотрим некоторые особенности метрологической оценки ИИС.

Метрологическая оценка относится к сфере деятельности метрологического обеспечения. Согласно закону РБ «Об обеспечении единства измерений» метрологическая оценка – совокупность работ, проводимых в целях обеспечения единства измерений. По отношению к СИ метрологическая оценка осуществляется для подтверждения или установления их метрологических характеристик и соответствия метрологическим требованиям. Одним из видов работ по метрологической оценке являются поверка и калибровка. Поверка осуществляется в целях подтверждения соответствия СИ обязательным метрологическим требованиям. В сфере законодательной метрологии проводится государственная поверка СИ. Калибровка выполняется в целях применения действительных метрологических характеристик СИ при проведении измерений. Калибровке могут подлежать СИ, применяемые при измерениях как в сфере законодательной метрологии, так и вне ее. В разделении понятий поверка и калибровка основным является законодательный аспект, хотя и содержание этих работ несколько отличается.

Поверка и калибровка могут проводиться на технической базе аккредитованных лабораторий (стационарных, передвижных, временных), на месте производства, технического обслуживания, ремонта СИ или на технической базе на месте эксплуатации СИ. Эти работы по метрологической оценке осуществляются в соответствии с методиками поверки и калибровки, в качестве которых могут использоваться методики, установленные международными, межгосударственными и государственными стандартами, а

также методики, разработанные уполномоченными юридическими лицами. Эталоны единиц величин, применяемые для проведения поверки калибровки, должны обеспечивать метрологическую прослеживаемость результатов измерений до единиц величин, воспроизводимых национальными эталонами единиц величин, международными эталонами единиц величин или национальными эталонами единиц величин иностранных государств.

В современной практике работ по метрологической оценке ИИС широкое распространение получил сокращенный термин – «калибровка измерительных каналов». При этом сами измерительные системы разделяют на два типа: законченные и укомплектованные изделия с нормированными метрологическими характеристиками измерительных каналов, часто обозначаемые в метрологической литературе как ИС-1, и те, которые станут законченными изделиями при установке на объекте эксплуатации (ИС-2).

Для измерительных систем первого типа должны быть регламентированы компоненты ИК каждого вида с указанием типов СИ, его образующих. Кроме того, для ИК каждого вида должны быть регламентированы диапазон измерений и метрологические характеристики, а для компонентов ИК должны быть также установлены условия их эксплуатации. Измерительные каналы таких ИИС подвергаются поверке при выпуске или ремонте, а также в процессе эксплуатации.

Для измерительных систем второго типа должны быть регламентированы компоненты каждого экземпляра ИК с указанием типов СИ, его образующих, и места их установки. При этом диапазоны измерений и метрологические характеристики каждого экземпляра ИК должны быть приведены в разделе «Основные технические характеристики» указанного описания типа. Для ИС-2 измерительные каналы подвергаются поверке при вводе в эксплуатацию после установке на объекте эксплуатации и в процессе эксплуатации.

Основные требования к регламентации состава и характеристик измерительных каналов ИИС классифицируются по следующим признакам:

- по проектированию ИИС (состав ИК с указанием типов СИ, его образующих, условия эксплуатации, диапазон измерений, нормируемые метрологические характеристики и методы проверки их соответствия);
- по характеру обслуживания (характеристики надежности компонентов, резервирование компонентов);
- по расположению на объекте исследования (в нескольких помещениях или в одном, надежной передачи измерительной информации с минимально возможными искажениями).

Следует отметить, что, несмотря на то, что ИИС обладают всеми основными признаками средств измерений и являются их разновидностью, при разработке методики их поверки (калибровки) и проведении этих работ приходится сталкиваться с многочисленными специфическими особенностями, такими как:

- представление на поверку (калибровку);
- регламентация нормальных условий (с учетом распределенности компонентов ИИС в пространстве) и их реализация при проведении работ;
- установление минимального (но достаточного) количества операций по поверке либо калибровке (в частности, после ремонта одного из многочисленных компонентов ИИС);
- установление межповерочных интервалов;
- определение даты действий свидетельств о поверке и калибровке.

Так, при представлении ИИС на поверку в сравнении с традиционными СИ можно выделить следующие отличительные признаки. Во-первых, представление ИИС или отдельных ее ИК на поверку связана с временными перерывами в работе системы, что может оказаться недопустимым. Следовательно, одним из обязательных требований к таким ИИС должно быть наличие резервных ИК. Во-вторых, время проведения поверки ИИС может составлять до нескольких недель. В-третьих, возможность доставки к месту поверки большинства ИИС затруднительно. Поэтому периодическая поверка



ИИС должна проводиться по месту ее размещения, а средства поверки должны быть доставлены к месту размещения ИИС.

В зависимости от технических возможностей и экономической целесообразности поверка (калибровка) ИИС может производиться комплектно (комплектный метод). Если поверку (калибровку) невозможно провести комплектным методом, то ее проводят поэлементно (поэлементный метод). Под элементами ИК ИИС понимаются отдельные средства измерений или совокупности СИ и других технических средств, включая линии связи, используемых в ИК ИИС. При проведении поверки (калибровки) поэлементным методом отдельно поверяются (калибруются) измерительные преобразователи ИК. Как правило, поверка (калибровка) ИИС автоматизирована, а алгоритмы определения метрологических характеристик ИК приведены в НТД на методы и средства поверки (калибровки) конкретных ИИС.

При проведении поверки (калибровки) ИИС должны проводиться следующие операции:

- проверка состояния и комплектности технической документация (перечень документации), внешний осмотр;
- опробование;
- контроль (определение) МХ, регламентированных в НТД на методы и средства поверки (калибровки) ИИС;
- анализ результатов поверки (калибровки) и принятие решения о годности (негодности) ИИС для дальнейшего применения.

При проведении работ по поверке и калибровке ИК ИИС наиболее предпочтительной является «сквозная» методика, суть которой заключается в том, что на вход ИК ИИС подается образцовый сигнал, имитирующий измеряемую величину. На выходе контролируемого ИК снимается выходной сигнал (результат измерения). Затем результат измерений сравнивается с известным значением информативного параметра образцового сигналов и определяется погрешность ИК. Таким образом реализуется метод прямых

измерений. В этом случае высокие требования предъявляются к устройству воспроизведения образцовых сигналов – мере.

Необходимыми условиями применения такой методики являются:

- возможность доступа ко входу ИК. Ограничение доступа может быть обусловлено, например, конструкцией или способами установки первичных измерительных преобразователей (датчиков), либо наличием «вредной среды» в местах их расположения.

- возможность задания необходимого набора всех существенных для поверки (калибровки) ИК значений влияющих величин, характерных для условий эксплуатации ИИС;

- наличие эталонов и средств задания измеряемых величин.

Как правило, такой методикой пользуются при поверке (калибровке) измерительные каналы ИС-1.

В тех случаях, когда «сквозная» методика не может быть применена, используют расчетно-экспериментальную методику. Ее суть заключается в том, что в ИК выделяется такая его часть, которая состоит из компонентов с нормированными метрологическими характеристиками, для которой применим «сквозной» метод. Желательно, чтобы в доступную часть ИК входило как можно большее число его компонентов, чтобы была возможность при контроле метрологических характеристик линии передачи измерительной информации, промежуточные преобразователи, устройства связи с объектом, вычислительные устройства и т.п. При этом метрологические характеристики ИК в целом вычисляются по нормированным метрологическим характеристикам доступной части канала, определенным экспериментально, и по результатам ранее проведенных экспериментальных исследований (либо приписанным) недоступной части. Измерительные каналы ИС-2, как правило, подвергают покомпонентной поверке. При этом демонтированные первичные измерительные преобразователи (датчики) поверяют (калибруют) в лабораторных условиях, а вторичную часть (комплексный компонент, включая линии связи) – на месте установки ИС при одновременном контроле всех

влияющих факторов, действующих на отдельные компоненты. При наличии специализированных переносных эталонов или передвижных эталонных лабораторий и доступности входов ИС-2 комплектная поверка измерительных каналов ИС-2 на месте установки предпочтительна.

Выбор экспериментального метода определения и контроля метрологических характеристик ИК ИИС зависит от ряда влияющих факторов, определяющих постановку и проведение эксперимента. На выбор указанных методов влияет также наличие или отсутствие априорных сведений о метрологических свойствах ИК ИИС, вид ИК и т.д. Априорные сведения о составе и существенности влияющих факторов могут быть получены, например, из нормативной либо технической документации на ИИС. При отсутствии априорных сведений по составу и существенности факторов, влияющих на точность измерений, проводят предварительное исследование метрологических свойств ИК ИИС. Такие исследования обычно проводят в рамках исследовательских или осуществляемых на этапах разработки, проектирования ИИС или ввода ее в эксплуатацию. В рамках поверочных работ подобные исследования не проводятся.

Методика поверки (калибровки) ИК конкретных образцов ИИС разрабатывается на стадии разработки, предварительных исследований, проверяется и утверждается на стадии проведения испытаний для целей утверждения типа. Разработаны и используются некоторые обобщенные методы контроля МХ, используемые при поверке ИК ИИС. Однако, учитывая сложность состава ИИС, методики поверки в подавляющем большинстве случаев индивидуальны для конкретных образцов или типов ИИС.

Результаты калибровки ИК ИИС позволяют определять поправки и другие метрологические характеристики. Учитывая тот факт, что эксплуатация ИИС часто происходит в условиях дефицита априорной информации о ее метрологических характеристиках в целом, а также компонентов, поверочные и калибровочные работы должны осуществляться с учетом необходимости постоянного уточнения метрологических характеристик, степени их деградации

во времени, установления и корректировки межповерочных интервалов и т.п. Этот факт также должен учитываться при разработке методик поверки (калибровки). Результаты поверок и калибровок должны являться одной из самых важных составляющих информации, которую следует принимать во внимание при анализе изменения метрологических характеристик ИК ИИС.

Следует также отметить, что для многих ИИС характерен автономный в метрологическом смысле режим использования, когда не может быть реализована оперативная связь с вышестоящими по поверочной схеме средствами. Автономный режим использования ИИС является одним из источников децентрализации в системе обеспечения единства измерений. Если для традиционно используемых СИ привязка к эталону означает перемещение к месту его дислокации, то для автономной ИИС наоборот, необходимо движение эталона к месту ее размещения. Соответственно необходима разработка и транспортируемых эталонов, необходимых для поверки и калибровки ИК ИИС. При этом необходимо учитывать, что транспортируемые эталоны часто будут использоваться в условиях, отличных от требуемых условий их хранения и применения. Вопросы о методиках и необходимости использования транспортируемых эталонов должны быть решены на стадиях разработки и испытаний ИИС.

Еще один важный аспект современных ИИС – расширение номенклатуры измеряемых величин в рамках одной системы. Это приводит к необходимости «привязки» ИИС к нескольким поверочным схемам. Поэтому сегодня актуален вопрос реализации самокалибровки ИИС.

В заключение отметим, что многообразие структур ИК ИИС не позволяет дать однозначного определения понятия погрешности ИК (это определение отсутствует в НТД), что создает дополнительные сложности в упорядочении терминологии и трактовке содержания работ по их поверке (калибровке).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ДЛЯ УГЛУБЛЕННОГО ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

### Литература и электронные ресурсы:

1. Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. – 89 с.: ил. 64.
2. Микроэлектронные измерительные преобразователи [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Б. Топильский. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 493 с.: ил.
3. Датчики электрических систем автоматического управления: учеб. пособие / М.В. Рогова. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. – 88 с.
4. Аналоговые и цифровые электроизмерительные приборы: лабораторная работа № 1 / сост. В.В. Чёрный [и др.] – Минск: БНТУ, 2012. – 28 с.
5. Топильский В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Б. Топильский. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 493 с
6. Шарапов В.М. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – Москва: Техносфера, 2012. – 624 с.
7. Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие/ Ю.В. Волков. – ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. – 89с.
8. Козлов, А.Н. Интеллектуальные информационные системы: учебник /А.Н. Козлов; Мин-во с-х. РФ, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. – Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2013.– 278 с.
9. Мишунин В.В. Информационно-измерительные и управляющие системы: Учебно-методическое пособие / В.В. Мишунин, Е.В. Корсунова, В.И. Ищенко, А.В. Курлов. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2010. – 129 с.
10. Рубичев Н. А. Измерительные информационные системы: учебное пособие / Н. А. Рубичев. – М.: Дрофа, 2010. – 334 с.

11. Захаров В. А. Метрологическое обеспечение измерительных систем: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1. Принципы построения и вопросы стандартизации автоматизированных измерительных систем / В. А. Захаров, А. С. Волегов; [под общ. ред. В. А. Захарова]; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 168 с.

#### **Технические нормативные правовые акты:**

1. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
2. СТБ ISO/IEC Guide 99/ПР 1. Основные и общие понятия и соответствующие термины метрологии.
3. ТКП 8.003-2011 (03220). Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Поверка средств измерений. Правила проведения работ.
4. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
5. ГОСТ 8.438-81. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Системы информационно-измерительные. Поверка. Общие положения.

## II ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Практический раздел представлен лабораторными работами:

- Лабораторная работа № 1. Анализ метрологических характеристик осциллографа.
- Лабораторная работа № 2. Калибровка каналов осциллографа. Исследование измерительных сигналов с помощью осциллографа.
- Лабораторная работа № 3. Преобразование электрического сигнала в измерительном канале. Электрические фильтры.
- Лабораторная работа № 4. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей температуры.
- Лабораторная работа № 5. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей линейного перемещения.
- Лабораторная работа № 6. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей углового перемещения.
- Лабораторная работа № 7. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей частоты вращения.

Включенные в практикум работы сочетаются с циклами лабораторных работ таких учебных дисциплин, как «Метрология», «Теоретическая метрология», «Метрология и стандартизация». Работы могут быть использованы в лабораторных практикумах по другим дисциплинам, включающим измерения физических величин.

Издание может быть полезно инженерно-техническим работникам, занимающимся измерениями физических величин и контролем параметров изделий и технологических процессов.

## **АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЦИЛЛОГРАФА**

### **Цель:**

- Ознакомление с устройством осциллографа и принципами анализа и измерений параметров электрических сигналов.
- Приобретение практических навыков анализа метрологических характеристик средств измерений.

### **Задачи:**

- Изучение структурных схем аналогового и цифрового осциллографов.
- Ознакомление с органами управления работой осциллографа.
- Изучение метрологических характеристик осциллографов.

### **Используемые технические средства:**

Осциллографы С1-68, С1-76, С1-77, С1-79 и RIGOL DS 1052E.

### **Теоретическая часть**

**Осциллограф** предназначен для исследования электрических сигналов путем визуального наблюдения на экране и измерения их параметров.

По способу обработки входного сигнала осциллографы можно разделить на аналоговые (электронно-лучевые) и цифровые, а также по количеству лучей на однолучевые, двухлучевые и т.д. N-лучевой осциллограф имеет N сигнальных входов и может одновременно отображать на экране N графиков. Цифровые осциллографы в свою очередь делятся на запоминающие, люминофорные и стробоскопические.

Осциллографы, созданные на базе компьютеров, отличаются от электронно-лучевых использованием цифровых способов формирования изображения и служебных сигналов. Общие же принципы работы и алгоритмы обработки исследуемых электрических сигналов у тех и других в основном совпадают.

**Аналоговые осциллографы.** Приборы этого типа считаются классическими представителями общего понятия об осциллографе, как контрольно-измерительном приборе. В целом, любой аналоговый осциллограф



состоит из следующих составляющих: входной делитель, усилитель вертикального отклонения, схема синхронизации и горизонтального отклонения, источник питания и электронно-лучевая трубка.

Различают следующие разновидности электронно-лучевых осциллографов: универсальные, скоростные, сверхскоростные, запоминающие, специальные.

Универсальные осциллографы (С1-82, С1-92 и др.) имеют ширину полосы пропускания от нуля до сотен мегагерц и диапазон исследуемых сигналов от десятков микровольт до сотен вольт. Они применяются для исследования гармонических и импульсных сигналов. Примерами универсальных осциллографов являются:

- Скоростные осциллографы (С7 -10А, Б) С7-15 и др.) применяются для наблюдения и регистрации однократных и повторяющихся импульсов и периодических колебаний и имеют полосу пропускания до единиц гигагерц. Сверхскоростные (стробоскопические) осциллографы (например, С7-5, С7-12 и др.) применяются для регистрации периодических сигналов в полосе частот от нуля до десятков гигагерц.

- Запоминающие осциллографы (С8-8, С8-15 и др.) применяются для регистрации однократных и редко повторяющихся сигналов.

- Специальные осциллографы (С9-4, С9-57 и др.) применяются для исследования телевизионных сигналов.

**Цифровые осциллографы.** По сравнению с аналоговыми предшественниками они имеют более широкие возможности, а благодаря снижению стоимости цифровых схем с каждым годом они становятся более доступными потенциальным покупателям. В общем виде цифровой осциллограф состоит из входного делителя, нормализующего усилителя, аналого-цифрового преобразователя, блока памяти, устройства управления и устройства отображения.

## ***Структура и принцип действия аналогового осциллографа***

Электронно-лучевая трубка представляет собой электровакуумный прибор, содержащий электроды для формирования электронного луча (узкого пучка электронов): подогреваемый катод, модулятор, аноды, для изменения направления луча (вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины), а также экран, покрытый люминофором, на котором формируется изображение исследуемого сигнала.

Существуют различные виды осциллографов: *универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие, цифровые и специальные*. Наибольшее распространение получили универсальные осциллографы, позволяющие исследовать в режиме реального времени разнообразные электрические сигналы в широком диапазоне амплитуд, длительностей и частот повторения сигналов. Полоса пропускания таких приборов достигает 250 МГц.

Универсальные осциллографы имеют обозначение **С1**, после которого указывают порядковый номер разработки. В зависимости от числа каналов различают одноканальные, двухканальные и многоканальные осциллографы.

При помощи электронного осциллографа можно измерять напряжение, длительность импульсов или их отдельных участков, частоту и фазу электрических сигналов, период следования импульсов, параметры амплитудной и частотной модуляции, амплитудно-частотные характеристики, частотные спектры, искажение сигналов и др.

*Структурная схема* электронного осциллографа показано на рис.1. В состав осциллографа входят: электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), канал вертикального отклонения луча (канал Y), канал горизонтального отклонения луча (канал X), калибратор, генератор развертки, блок синхронизации, а также элементы управления лучом (яркость, фокусировка, смещение).

Электроны, вылетевшие с поверхности катода, формируются в пучок (луч), ускоряются под действием положительно заряженных анодов и, пролетев между горизонтальными и вертикальными отклоняющими пластинами, попадают на люминофорное покрытие внутренней стороны экрана.

Горизонтально расположенные пластины (отклоняющие луч в вертикальном направлении) и вертикально расположенные пластины (отклоняющие луч в горизонтальном направлении) управляются соответственно напряжениями, поступающими с выходов канала Y и канала X.

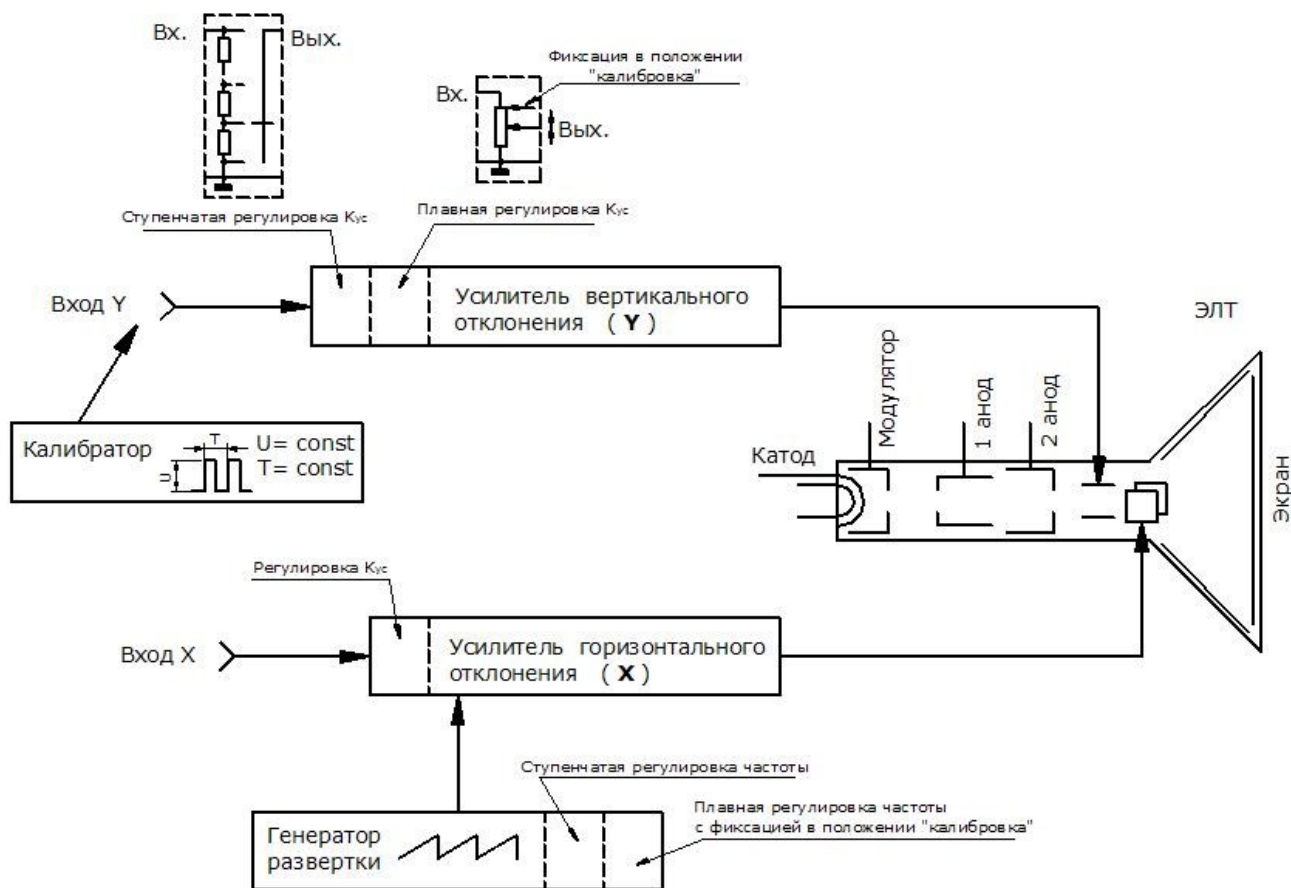
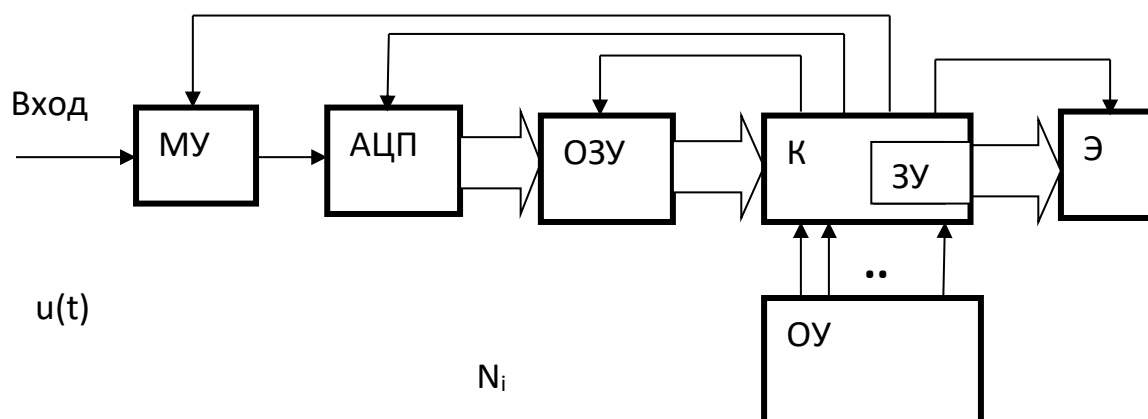


Рисунок 1 – Структурная схема электронного осциллографа

## Структура и принцип действия цифрового осциллографа



МУ – масштабирующее устройство (усилитель и делитель напряжения);

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство;

К – контроллер;

ЗУ – запоминающее устройство;

Э – экран;

ОУ – органы управления (кнопки, ручки).

Рисунок 2 – Структурная схема цифрового осциллографа

На рис. 2 в предельно упрощенном виде показана структурная схема цифрового осциллографа (ЦО).

Пройдя через МУ, входное напряжение  $u(t)$  преобразуется АЦП в дискретную последовательность кодовых слов  $N_i$ , отображающих мгновенные значения  $u_i$  этого напряжения. Каждое новое кодовое слово записывается в ОЗУ. При этом все предыдущие записанные отсчёты сдвигаются на одну ячейку (регистр сдвига), а самый первый  $N_1$  исчезает, как бы «выталкивается». Если ОЗУ состоит из  $M$  ячеек, то в нём, постоянно обновляясь, содержится  $M$  последних, «свежих», кодовых слов. Так продолжается до тех пор, пока не будет выполнено некое заданное условие, например, когда какое-либо  $u_i$  впервые превысит заданный оператором уровень

(«запуск по уровню»). После этого содержимое некоторого количества ячеек ОЗУ переписывается в запоминающее устройство ЗУ, входящее в состав контроллера К.

Каждой ячейке ЗУ соответствует точка на экране по цвету отличающаяся от фона. Её абсциссу определяет номер ячейки, а ординату кодовое слово  $N_i$ , находящееся в этой ячейке.

Для хорошего изображения сигнала на экране вполне достаточно 2 точки на 1 мм. Средних размеров экран имеет высоту 100 мм и ширину 120 мм. Следовательно, на экране должны располагаться  $200 \times 240 = 48\,000$  точек или более.

Таким образом, для формирования хорошего изображения АЦП должен иметь не менее 8 двоичных разрядов (256 точек по вертикали) и ЗУ должно содержать 256 ячеек.

Но количество ячеек ОЗУ может быть гораздо больше.

ЦО позволяет запоминать в ОЗУ очень много кодовых слов, а потом «вытягивать» их порциями, соответствующими ширине экрана. В аналоговых осциллографах это, конечно, невозможно. Для обозначения запаса по оси времени («глубина памяти») иногда пользуются такой оценкой длительности сигнала, данные о котором записаны в ОЗУ: «число экранов». Например, «8 экранов» означает, что объём памяти ОЗУ не 256, а 2048 ячеек, в которых записано 2048 кодовых слов  $N_i$ . Каждое  $N_i$  – это 8-разрядный код, т.е. один байт, т.ч. «8 экранов» – это объём памяти в 2 килобайта. Можно вообразить очень широкий экран-ленту – в 8 раз шире натурального, но такой же высоты. На такой ленте было бы записано изображение всего сигнала. Длина этой ленты около одного метра.

Ещё одно принципиальное отличие от аналоговых осциллографов состоит в том, что в ЦО можно видеть предысторию сигнала до появления импульса запуска. Это называют «предзапуском». Кодовые слова переписываются из ОЗУ в ЗУ так, что в момент появления импульса запуска первой ячейкой ЗУ будет та, что даёт точку на вертикальной линии, проходящей через центр экрана, последующие точки располагаются направо от неё, предыдущие – налево. Положение первой ячейки можно смещать влево или вправо от центра и тем самым соответственно уменьшать или увеличивать видимый интервал предыстории.

Частоту дискретизации (частоту «выборок») можно изменять в широких пределах, что соответствует изменению масштаба по горизонтали и аналогично изменению скорости развёртки в аналоговых осциллографах.

Для изменения масштаба по вертикали, как и в аналоговых осциллографах, можно изменять коэффициенты усиления или деления соответственно входного усилителя или делителя напряжения.

В целом ЦО имеет больше сходства с компьютером, чем с аналоговым осциллографом. Он позволяет выполнять различные математические операции: растягивать во времени фрагменты записанного в память сигнала, складывать и вычитать сигналы в разных каналах, определять частотный спектр сигнала путём применения быстрого преобразования Фурье и проч.

**Метрологическая характеристика средства измерений** (метрологическая характеристика; МХ) – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность.

Различают *нормируемые метрологические характеристики*, устанавливаемые нормативными документами на средства измерений, и *действительные характеристики*, определяемые экспериментально. Метрологические характеристики средств измерений весьма разнообразны, они существенно различаются по значимости и информативности и существенно зависят от типа средств измерений.

Для представления и анализа средств измерений, осуществляющих измерительное преобразование, широко применяют интегральную метрологическую характеристику, которая отражает номинальную или действительную функцию преобразования. Выраженную в виде формулы или графика, **номинальную характеристику** называют **функцией преобразования** средства измерений.

Действительную функцию преобразования называют градуировочной характеристикой. *Градуированная характеристика средства измерения (градуированная характеристика)* – зависимость между значениями величин на

*входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально.* Градуированная характеристика может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы.

Наряду с интегральными метрологическими характеристиками для средств измерений предусмотрены возможности назначения и контроля множества различных частных характеристик. Часть из них представляет интерес для пользователя, другие принципиально важны только для разработчиков средств измерений.

### **Практическая часть**

#### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с назначением, принципом работы и основными характеристиками осциллографов.
2. Ознакомиться с основными функциональными узлами (структурной схемой) осциллографов.
3. Ознакомиться с назначением и действием основных органов управления осциллографов.

Ниже для примера приведены изображения передней панели и шкалы электронно-лучевого осциллографа С1-68 (рис. 3 и рис.4).



Рисунок 3 – Передняя панель осциллографа С1-68

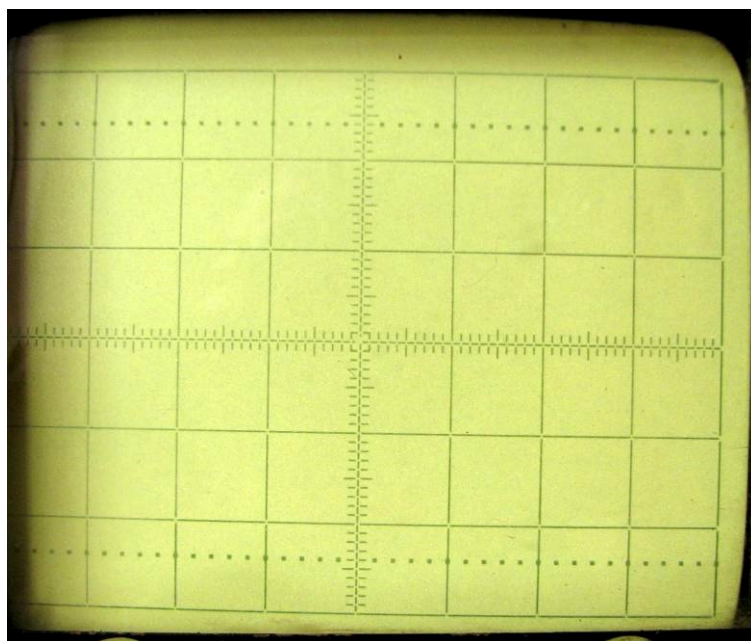


Рисунок 4 – Шкала ЭЛТ осциллографа С1-68

На рис. 5 показан вид сигнала развертки, на рис. 6 представлена схема формирования изображения на экране ЭЛТ (для случая равенства периодов сигнала и развертки). Рис. 7 иллюстрирует процесс калибровки каналов вертикального и горизонтального отклонения.



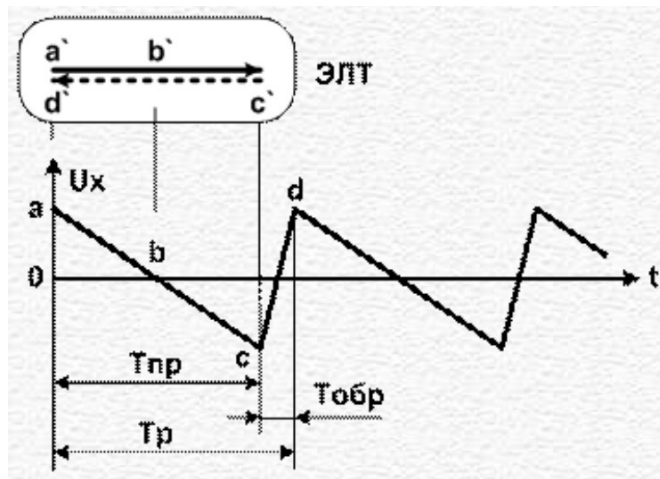


Рисунок 5 – Сигнал на выходе канала развертки

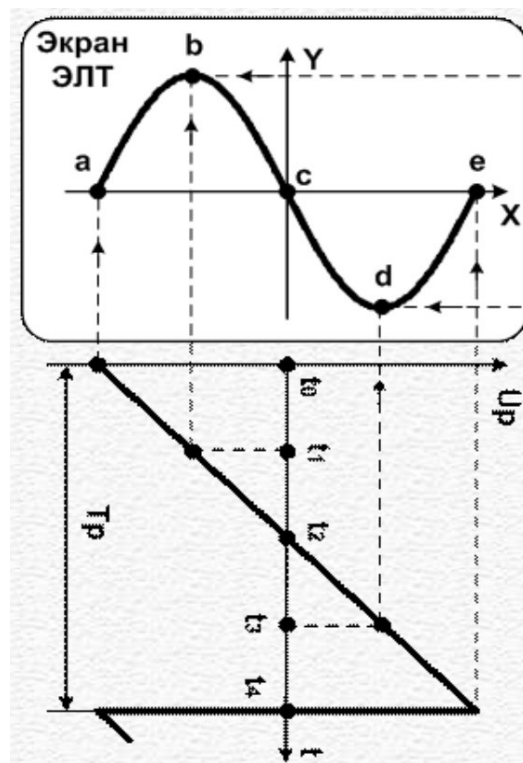


Рисунок 6 – формирование изображения на экране ЭЛТ

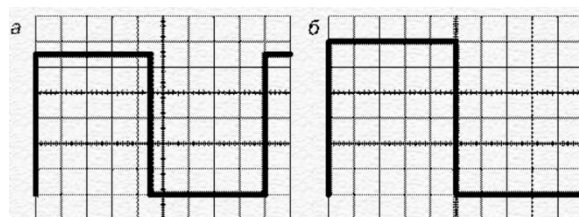


Рисунок 7 – калибровка каналов осциллографа: а) каналы X и Y не откалиброваны; б) каналы X и Y откалиброваны

4. Провести сравнительный анализ характеристик аналоговых и цифрового осциллографов на основании технической документации. Результаты представить в виде таблицы.

Таблица – Сравнение характеристик осциллографов

Характеристика	Осциллограф _____	Осциллограф _____	Осциллограф _____	Осциллограф RIGOL DS 1052E

5. Оформить отчет.

**Содержание отчета:**

1. Цели и задачи лабораторной работы.
2. Описание используемых технических средств.
3. Таблица с результатами анализа характеристик осциллографов.
4. Вывод.

## Приложение А

(технические характеристики осциллографа RIGOL DS 1052E)

### Технические характеристики

<b>Регистрация</b>	
Режим регистрации	Режим реального времени 2 Гвыб/с Режим эквивалентной выборки 50 Гвыб/с
Усреднение	По N регистрациям, все каналы одновременно, N выбирается из ряда 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 или 256
Включение входов	Открытый вход (DC), закрытый вход (AC), заземление (GND)
Входной импеданс	сопротивление 1 МОм $\pm$ 2 % емкость 18 пФ $\pm$ 3 пФ Низкоомный 50 Ом $\pm$ 2 %
Ослабление входного делителя	0,001; 0,01; 0, 1; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000
Максимальное входное напряжение	Входной импеданс 1 МОм : 300 В пикового значения Входной импеданс 50 Ом : 5 В пикового значения
Время задержки между каналами	500 пс
<b>Канал горизонтального отклонения</b>	
Диапазон частот выборки	Режим реального времени: 1 выб/с - 2 Гвыб/с Режим эквивалентной выборки: до 50 Гвыб/с
Длина записи	10 квыб. для одноканальной регистрации 5 квыб. для каждого канала при многоканальной регистрации
Диапазон коэффициента развертки:	Ряд значений 1-2-5
для DS1302CA, для DS1202B, DS1102B, DS1202CA, DS1102CA, DS1202D, DS1102D, DS1202E, DS1102E для DS1062B, DS1062CA, DS1052D, DS1052E	1 нс/деление -50 с/деление 2 нс/деление -50 с/деление 5 нс/деление -50 с/деление
Пределы допускаем. погрешности измерений времени выборки и времени задержки	$\pm 5 \times 10^{-5}$ (для интервала времени больше 1 мс)

Пределы допускаем. погрешности измерений интервалов времени при полной полосе пропускания	Однократное измерение: ±(время выборки + $5 \times 10^{-5}$ × измеренное значение + 0.6 нс) Усреднение N > 16: ±(время выборки + $5 \times 10^{-5}$ × измеренное значение + 0.4 нс)
<b>Канал вертикального отклонения</b>	
Аналогово-цифровые преобразов.	8 бит, отдельный преобразователь для каждого канала
Коэффициенты отклонения (К <sub>о</sub> )	С входного разъёма 2 мВ/дел. - 10 В/дел
Отображаемая на экране амплитуда сигнала	± 40 В (500 мВ/дел. - 10 В/дел.) ± 800 мВ (1 мВ/дел - 200 мВ/дел.)
Полоса пропускания:	DS1302CA 300 МГц DS1202B, DS1202CA, DS1202D, DS1202E 200 МГц DS1102B, DS1102CA, DS1102D, DS1102E 100 МГц DS1062B, DS1062CA, 60 МГц DS1052D, DS1052E 50 МГц
Время нарастания ПХ	DS1302CA <1,2 нс DS1202B, DS1202D, DS1202E <1,8 нс DS1202CA <1,7 нс DS1102B, DS1102CA, DS1102D, DS1102E <3,5 нс DS1062B, DS1062CA <5,8 нс DS1052E, DS1052E <7 нс
Верх. граница полосы пропускания с внутренним НЧ фильтром	20 МГц
Нижняя граница полосы пропускания при закрытом входе	5 Гц
Пределы допускаемых погрешностей коэфф. отклонения на постоянном токе	± 4 % (2 мВ/дел.-5 мВ/дел); ± 3 % (10 мВ/дел.-10 В/дел)
Пределы допускаемой погрешности измерений на постоянном токе при усреднении	Усреднение по числу записей N ≥ 16  при нулевом уровне ±(4 % × измер. значение + 0.1 дел.+1 мВ) при 2 и 5 мВ/дел. при ненулевом уровне ±(3 % × измер. значение + 0.1 дел.+1 мВ) при более 5 мВ/дел. ± (3 % × измер. значение + 1 % × (вертикал. смещения + 0.2 дел.) Дополнит. +2 мВ при 1 мВ/дел. – 200 мВ/дел.

измерения треугольного напряжения при усреднении	+50 мВ при 200 мВ/дел. – 5 В/дел. волна напряжения делится на 16 равных частей
<b>Запуск</b>	
Пределы регулировки уровня запуска	0.1 - 1.0 делений
внутренний	± 6 делений от центра экрана
EXT	± 0.6 В
EXT/5	± 3 В
Погрешность установки уровня запуска при длительности сигнала синхронизации ≥ 20 нс	
внутренний	±(0.3дел× В/дел) (± 4 делений в центре экрана)
EXT	±(6% + 40 mV)
EXT/5	±(6% + 200 mV)
Режимы запуска	запуск с задержкой до 1 с Предварит. запуск сканирования/ задержки 6 делений
Время блокировки запуска	100 нс-1.5 с
50% установка уровня (типичная)	≥50 Hz частота входного сигнала
<b>Запуск от фронта</b>	
Вид фронта	подъем , спад, подъем +спад
<b>Импульс запуска</b>	
Полярность/ длительность	любая/ 20 нс-10 с
<b>Выбор видеостандарта</b>	
видеостандарт и частота строк	PAL/SECAM: 625; NTSC: 525
<b>Выбор типа запуска</b>	
установка типа запуска	H, L, X, $\overline{H}$ , $\overline{L}$
<b>Выбор канала синхронизации</b>	
CH1, CH2	фронт, импульс, видео
<b>Измерения</b>	
Рушное	(ΔV) разница напряжений между курсорами (ΔT) разница времени между курсорами ΔI (1/ΔI) обратный отсчет времени между курсорами

Курсорное	Y- по значению напряжения / X- по значению времени
Автоматическое измерение	Напряжение: пика, амплитуды, максимума, минимума, выброса, среднее, средняя величина среднеквадратич. значения
	Время: частота, период, время восходящего / нисходящего фронта, ширина импульса, скважность, задержка A→B $\tau$ , задержка A→B $f$ , фаза A→B $f$ , фаза A→B $\tau$
<b>Питание</b>	
Напряжение	~100 – 240В, 45 – 440 Гц
Потребляемая мощность	50 В*А
<b>Изоляция</b>	
Испытательное напряжение	2500 В переменного тока 50 Гц/1 мин.
Сопротивление изоляции	не менее 5 МОм в рабочих условиях
<b>Дисплей</b>	
Тип, размер	TFT диагональ 145 мм, разрешение 320×234,
Контраст/ Яркость/цвет	150:1/300 кд/м <sup>2</sup> / 64 к цветов
<b>Габаритные размеры и масса</b>	
Габаритные размеры	ширина 325 x высота 159 x глубина 133 мм
Масса, нетто/ с упаковкой	3/3.8 кг
<b>Рабочие условия</b>	
Окружающая температура	10...40 °С
относительная влажность	+35 °С: < 90% / +35... +40 °С: ≤ 60 %
Высота над уровнем моря	ниже 3000 м
Хранение/транспортировка	температура -20- +60 °С высота над уровн. моря ≤15000 м

## Приложение Б

### (технические характеристики осциллографов С1-77 и С1-79)



#### Технические характеристики С1-77




Параметры		Значения	
Вертикальное отклонение	Количество каналов	2	
	Полоса пропускания	0 ... 10 МГц	
	Время нарастания переходной характеристики	Без делителя	не более 35 нс
		С делителем 1:10	не более 40 нс
	Коэффициент отклонения	Диапазон	5 мВ/дел ... 10 В/дел
		Шаг	1, 2, 5
		Основная погрешность	не более ±4%
		Плавная регулировка с перекрытием	не менее 2.5 раза
	Допустимое суммарное значение постоянного и переменного напряжения при закрытом входе	Без делителя	300 В
		С делителем 1:10	200 В
Входной импеданс	Без делителя	1 МОм    30 пФ	
	С делителем 1:10	1 МОм    12 пФ	
Горизонтальное отклонение	Коэффициент развертки	Диапазон	0.1 мкс/дел ... 0,05 с/дел
		Шаг	1, 2, 5
		Плавная регулировка с перекрытием	не менее 2.5
		Основная погрешность	не более ±4%
	Режим работы развертки	автоколебательный, ждущий, запуск внешним сигналом	
ЭЛТ	Размер экрана	60 × 80 мм (6 × 8 делений)	
	Ширина линии луча	не более 0.7 мм	
Общие характеристики	Питание	~220 В / 50 Гц	
		~115 и 220 В / 400 Гц	
		=24 В	
	Потребляемая мощность	50 В·А	
	Габариты	275 × 182 × 440 мм	
Масса	10 кг		

## Технические характеристики С1-79

Параметры			Значения	
Количество каналов			2	
Тракт вертикального отклонения	Режимы работы		Канал I; канал II; прерывисто; поочередно; суммирование	
	Время нарастания переходной характеристики	В режиме каналов I и II	во всех положениях переключателя «V/ДЕЛ.»	3.5 нс
			с делителем 1:10 в положениях «2», «5» переключателя «V/ДЕЛ.»	5 нс
			с делителем 1:10 в остальных положениях переключателя «V/ДЕЛ.»	4.5 нс
		В положении «5 МГц» переключателя «ПОЛЮСА»		70 нс
		В режиме каналов I и II	в положениях «2», «5» переключателя «V/ДЕЛ.»	6.5 нс
			в остальных положениях переключателя «V/ДЕЛ.»	5.5 нс
	с делителем 1:10 в положениях «2», «5» переключателя «V/ДЕЛ.»		7 нс	
	с делителем 1:10 в остальных положениях переключателя «V/ДЕЛ.»		6.5 нс	
	Выброс на переходной характеристике в каналах I и II	Во всех положениях переключателя «V/ДЕЛ.»		8%
		С делителем напряжения 1:10		10%
	Время установления переходной характеристики			не более 15 нс
	Спад вершины переходной характеристики при закрытом входе каналов I и II			не более 10%
	Неравномерность вершины переходной характеристики			не более 2%
	Коэффициенты отклонения каналов I и II		Диапазон	2 мВ/дел ... 5 В/дел
			Шаг	1-2-5
	Основная погрешность коэффициентов отклонения		без делителя	не более ±3%
с делителем 1:10			не более ±5%	
Плавная регулировка коэффициента отклонения			не менее 2.5 раз	



	Смещение луча из-за дрейфа каналов I и II после 15 мин. прогрева	в течение 1 мин при кратковременном дрейфе	0.5 мВ (2 мм)	
		в течение 1 ч при долговременном дрейфе	4 мВ (16 мм)	
	Допускаемое суммарное значение постоянного и переменного напряжений на закрытых входах каналов I и II	без делителя	не более 100 В	
		с делителем 1:10	не более 150 В	
	Максимальный размах напряжения исследуемого сигнала	на входе прибора	не более 75 В	
		на входе делителя 1:10	не более 150 В	
Тракт горизонтального отклонения	Полоса пропускания при неравномерности амплитудно-частотной характеристики 3 дБ		0 ... 5 МГц	
	Режимы работы		развертка А, Б подсвечивает А, развертка Б, внешний вход X	
	Максимальный размах напряжения исследуемого сигнала		не более 20 В	
	Коэффициенты развертки А и Б	Диапазон	50 нс/дел ... 50 мс/дел	
		Шаг	1-2-5	
	Множитель развертки		×0.1	
	Основная погрешность коэффициентов разверток А и Б	На основной развертке	не более ±3%	
		При использовании множителя развертки	не более ±7.5%	
	Основная погрешность измерения временных интервалов	На основной развертке	не более ±5%	
		При использовании множителя развертки	не более ±7.5%	
	Время задержки развертки Б по отношению к развертке А	В диапазоне	0.5 мкс ... 0.5 с	
		Погрешность	не более ±2%	
Нестабильность		не более 0.05%		
Синхронизация разверток А и В	Внутренняя	Синусоидальными сигналами	<b>Положение переключателя, диапазон частот</b>	<b>Высота изображения</b>
			«  » 16 Гц...20 МГц	4 ... 48 мм
			«  » 20...100 МГц	8 ... 48 мм
			«ВЧ» 50 кГц...20 МГц	4 ... 48 мм

			«ВЧ» 20...100 МГц	8 ... 48 мм		
			«НЧ» 16 Гц...1000 МГц	4 ... 48 мм		
			«  » 0...30 Гц	4 ... 48 мм		
		Сигналом питающей сети			50 и 400 Гц	
		Импульсными сигналами			Полярность	любая
					Положение переключателя	«  », «ВЧ», «  »
					Длительность	не менее 10 нс
					Частота повторения	не менее 15 МГц
					Высота изображения	4 ... 48 мм
		Внешняя	Синусоидальными сигналами		Полоса частот	10 Гц ... 100 МГц
					Амплитуда	0.4 ... 5 В
Импульсными сигналами				Полярность	любая	
				Длительность	не менее 10 нс	
				Частота повторения	не менее 15 МГц	
				Амплитуда	0.4 ... 5 В	
				Нестабильность запуска	не более 1 нс	
Импеданс	Входов тракта вертикального отклонения		без делителя		1±0.02 МОм	
					25±2.5 пФ	
			с делителем 1:10		1±0.025 МОм	
				не более 12 пФ		
	Входов внешней синхронизации А и Б	для входа 1:1		0.1±0.02 МОм		
				не более ≤ 15 пФ		
		для входа 1:10		1±0.02 МОм		
				не более 10 пФ		
Входа «Z»		0.047±0.01 МОм				
		не более 120 пФ				
Внутренний калибратор	Импульсный сигнал		Форма	меандр		
			Амплитуда	1 В		
			Частота	1 кГц		
			Погрешность амплитуды и частоты	не более ±1.5%		

	Постоянное напряжение	Полярность	положительная
		Уровень	1 В
		Погрешность	не более $\pm 1.5\%$
Режим X-Y	Разность фаз между каналами вертикального и горизонтального отклонений в полосе частот 0...50 кГц		не более $3^\circ$
«Вход Z»	Внешний сигнал модуляции яркости	Амплитуда	4 ... 8 В
		Частота	20 Гц... 10 МГц
ЭЛТ	Тип		11ЛО101И
	Рабочая часть экрана		48 × 80 мм (6 × 10 дел.)
	Ширина линии луча		не более 0.8 мм
Общие характеристики	Время самопрогрева		15 мин
	Время непрерывной работы		16 ч
	Наработка на отказ		не менее 1000 ч
	Условия эксплуатации	Температура окружающей среды	+10 ... +50°C
		Относительная влажность	до 95% при температуре $+30\pm 2^\circ\text{C}$
		Напряжение питающей сети переменного тока	220±22 В / 50...60 Гц
	220±11 В или 115±5.75 В / 400±12 Гц		
	Габаритные размеры		354 × 220 × 509 мм
Масса		не более 19 кг	

## **КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ ОСЦИЛЛОГРАФА. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА**

### **Цели:**

- Ознакомление с методикой калибровки осциллографа и принципами анализа и измерений параметров электрических сигналов.
- Приобретение практических навыков работы с аналоговым и цифровым осциллографами.

### **Задачи:**

- Выполнение настройки осциллографа и калибровки каналов вертикального и горизонтального отклонений.
- Проведение калибровки осциллографов.
- Выполнение измерений параметров электрических сигналов.

### **Используемые технические средства:**

Осциллографы C1-68, C1-76, C1-77, C1-79 и RIGOL DS 1052E, генератор сигналов OWON AG 1022.

### **Теоретическая часть**

**Метрологический контроль** – совокупность работ, в ходе выполнения которых устанавливаются или подтверждаются метрологические, технические характеристики средств измерений, определяется соответствие средств измерений, методик выполнения измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений, а также соответствие методик выполнения измерений своему назначению.

Метрологический контроль включает в себя:

- утверждение типа средств измерений;
- метрологическую аттестацию средств измерений;
- поверку;
- калибровку;
- метрологическое подтверждение пригодности методик выполнения измерений (МВИ).

**Утверждение типа средств измерений** – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых на основании государственных испытаний средств измерений устанавливаются их метрологические и технические характеристики, определяется соответствие средств измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений и принимается решение об утверждении типа средств измерений.

**Метрологическая аттестация средств измерений** – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых устанавливаются метрологические характеристики средств измерений.

**Поверка** – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых подтверждаются метрологические характеристики средств измерений, и определяется соответствие средств измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений.

**Калибровка** – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых определяются метрологические характеристики средств измерений путем определения в заданных условиях соотношения между значением величины, полученным с помощью средства измерений, и соответствующим значением величины, воспроизводимым эталоном единицы величины.

**Метрологическое подтверждение пригодности МВИ** – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых определяется соответствие методик выполнения измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений, а также их соответствие своему назначению.

Калибровка проводится с целью определения метрологических характеристик средств измерений путем осуществления совокупности операций, устанавливающих в заданных условиях соотношение между значениями величин, полученных с помощью средства измерений и соответствующими

значениями, воспроизводимыми эталонами единиц величин. Калибровка осуществляется при выпуске средств измерений из производства или ремонта, при их применении и ввозе в Республику Беларусь.

**Межкалибровочный интервал** – промежуток времени между двумя последовательными калибровками.

**Средства калибровки** – эталоны и вспомогательные средства, применяемые при проведении калибровки.

**Проведение калибровки средств измерений.** Порядок проведения калибровки должен соответствовать требованиям, установленным в СТБ ИСО/МЭК 17025, и включает:

- рассмотрение заявки на калибровку;
- определение технических возможностей проведения калибровки в соответствии с требованиями заказчика и выбор эталонов для обеспечения заявленных метрологических характеристик;
- разработку методики (при отсутствии стандартной) и согласование методики калибровки с заказчиком;
- проверку функционирования на соответствие эксплуатационной документации;
- проведение измерений;
- обработку результатов измерений с оцениванием неопределенности по результатам калибровки;
- оформление результатов калибровки;
- выдачу заявителю средств измерений и документов по результатам калибровки.

**Осциллограф** предназначен для исследования электрических сигналов путем визуального наблюдения на экране и измерения их параметров.

По способу обработки входного сигнала осциллографы можно разделить на аналоговые (электронно-лучевые) и цифровые, а также по количеству лучей на однолучевые, двухлучевые и т.д. N-лучевой осциллограф имеет N сигнальных входов и может одновременно отображать на экране N графиков. Цифровые

осциллографы в свою очередь делятся на запоминающие, люминофорные и стробоскопические.

Осциллографы, созданные на базе компьютеров, отличаются от электронно-лучевых использованием цифровых способов формирования изображения и служебных сигналов. Общие же принципы работы и алгоритмы обработки исследуемых электрических сигналов у тех и других в основном совпадают.

**Аналоговые осциллографы.** Приборы этого типа считаются классическими представителями общего понятия об осциллографе, как контрольно-измерительном приборе. В целом, любой аналоговый осциллограф состоит из следующих составляющих: входной делитель, усилитель вертикального отклонения, схема синхронизации и горизонтального отклонения, источник питания и электронно-лучевая трубка.

Различают следующие разновидности электронно-лучевых осциллографов: универсальные, скоростные, сверхскоростные, запоминающие, специальные.

Универсальные осциллографы (С1-82, С1-92 и др.) имеют ширину полосы пропускания от нуля до сотен мегагерц и диапазон исследуемых сигналов от десятков микровольт до сотен вольт. Они применяются для исследования гармонических и импульсных сигналов. Примерами универсальных осциллографов являются:

- Скоростные осциллографы (С7 -10А, Б) С7-15 и др.) применяются для наблюдения и регистрации однократных и повторяющихся импульсов и периодических колебаний и имеют полосу пропускания до единиц гигагерц. Сверхскоростные (стробоскопические) осциллографы (например, С7-5, С7-12 и др.) применяются для регистрации периодических сигналов в полосе частот от нуля до десятков гигагерц.

- Запоминающие осциллографы (С8-8, С8-15 и др.) применяются для регистрации однократных и редко повторяющихся сигналов.

- Специальные осциллографы (С9-4, С9-57 и др.) применяются для исследования телевизионных сигналов.

**Цифровые осциллографы.** По сравнению с аналоговыми предшественниками они имеют более широкие возможности, а благодаря снижению стоимости цифровых схем с каждым годом они становятся более доступными потенциальным покупателям. В общем виде цифровой осциллограф состоит из входного делителя, нормализующего усилителя, аналого-цифрового преобразователя, блока памяти, устройства управления и устройства отображения.

При калибровке осциллографа проводят:

- 1) внешний осмотр;
- 2) опробование;
- 3) определение метрологических характеристик:
  - определение ширины линии луча;
  - определение погрешности коэффициента отклонения;
  - определение погрешности измерения напряжения;
  - определение погрешности коэффициента развертки;
  - определение погрешности измерения временных интервалов;
  - определение параметров переходной характеристики;
  - определение параметров амплитудно-частотной характеристики.

**Амплитудно-частотной характеристикой** тракта вертикального отклонения называется зависимость модуля коэффициента отклонения от частоты входного синусоидального сигнала при условии неизменности его уровня (рис. 1). Основные параметры АЧХ следующие:

- **полоса пропускания** – диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения отличается не более, чем на 3 дБ от его значения на опорной частоте;

- **неравномерность АЧХ** – разница между значениями коэффициента отклонения на обусловленной и опорной частотах, выраженная в процентах. Неравномерность нормируется для нормальной и расширенной области частот;



- **нормальная область АЧХ** – диапазон частот, в пределах которого неравномерность АЧХ не превышает погрешности коэффициента отклонения;

- **расширенная область АЧХ** – диапазон частот, в пределах которого неравномерность АЧХ не превышает 10%;

- **опорная частота** – частота, не менее чем в 20 раз меньше верхней предельной частоты полосы пропускания.

$f_{оп}$  – опорная частота;  $\Delta f_{п}$  – полоса пропускания;  $\Delta f_{норм}$  – нормальный диапазон АЧХ;  $\Delta f_{р}$  – расширенный диапазон АЧХ;  $f_{в}$  – верхняя предельная частота полосы пропускания;  $f_{н}$  – нижняя предельная частота полосы пропускания;  $\delta f_{норм}$  – неравномерность АЧХ в нормальной области частот;  $\delta k_{откл}$  – погрешность коэффициента отклонения;  $\delta f_{р}$  – неравномерность АЧХ в расширенной области частот.

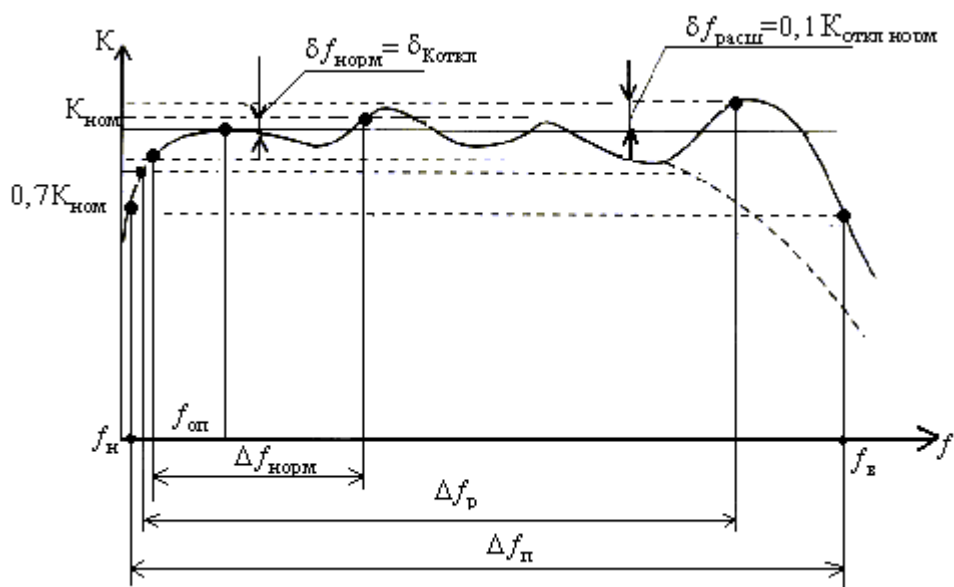


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика канала вертикального отклонения

Переходная характеристика канала вертикального отклонения приведена на рис. 2.

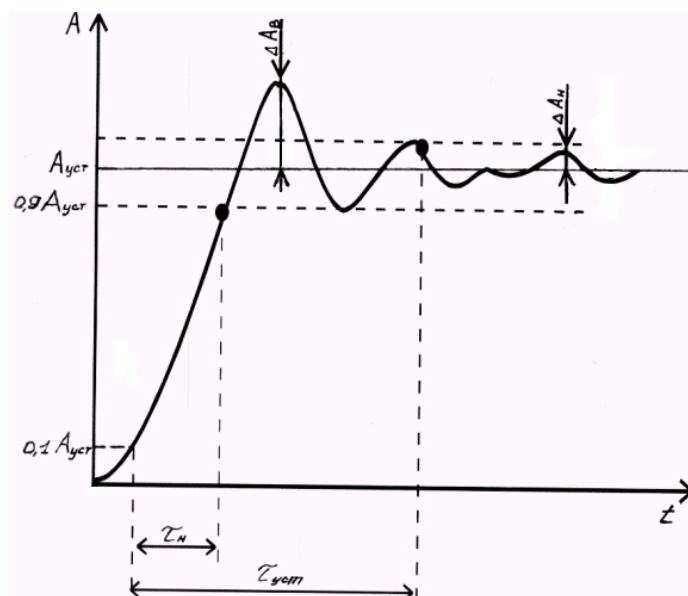


Рисунок 2 – Переходная характеристика канала вертикального отклонения

**Выбросы** – разница между максимальными (после времени нарастания) и постоянными значениями ПХ;

При измерении длительности фронтов импульсов, сравнимых со временем нарастания ПХ, нормируемой для осциллографа, длительность фронта изображения  $\tau_u$  увеличивается по сравнению с  $\tau_\phi$  измеряемого сигнала и уточняется по выражениям:

$$\tau_u = \sqrt{\tau_n^2 + \tau_\phi^2}, \quad \text{откуда, } \tau_\phi = \sqrt{\tau_u^2 - \tau_n^2},$$

где  $\tau_u$  – длительность фронта изображаемого импульса;

$\tau_\phi$  – длительность фронта измеряемого импульса;

$\tau_n$  – время нарастания переходной характеристики.

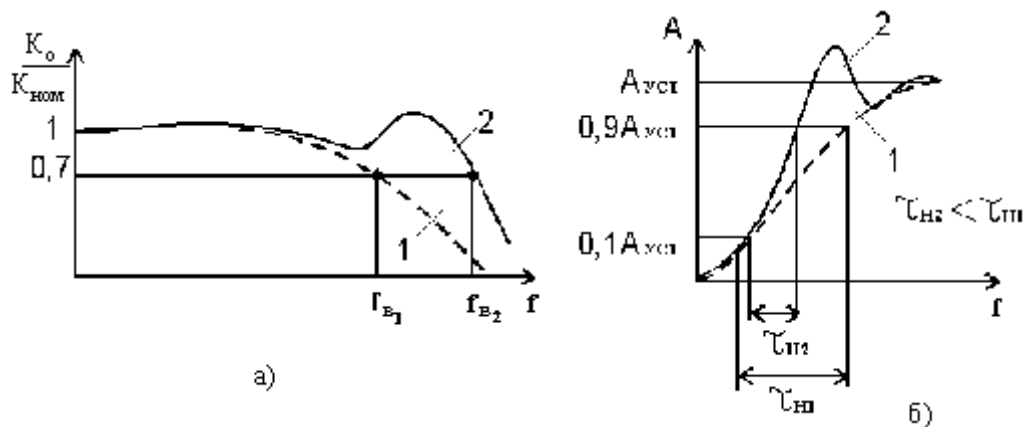
Параметры амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и переходной характеристики (ПХ) взаимно связаны. Эта зависимость для разных параметров АЧХ и ПХ приводится ниже.

Для обеспечения наиболее достоверного изображения формы импульса на экране осциллографа (при отсутствии выбросов), уменьшение усиления на высших

частотах канала  $Y$  при двукратном увеличении частоты должно составлять не более 0,6 дБ. В этом случае:

$$\tau_n = \frac{350}{f_B}; \quad \text{где } f_B [МГц];$$

С целью повышения равномерности АЧХ в пределах полосы пропускания и получения максимальной ширины полосы при максимальном коэффициенте усиления окончного каскада вводится коррекция АЧХ перед ее спадом до уровня минус 3 дБ (рис. 3, а). (Пунктирной линией показаны АЧХ (см. рис. 3, а) и ПХ (см. рис. 3, б) при отсутствии коррекции). Эта коррекция является причиной появления выбросов на ПХ (см. рис. 3, б) при исследовании импульсов с длительностью фронта, меньшей  $\tau_n$ . При длительности фронта значительно больше  $\tau_n$  выбросов на изображении не наблюдается.



1 – при отсутствии коррекции АЧХ;

2 – с введением коррекции АЧХ.

Рисунок 3 – Амплитудно-частотная (а) и переходная (б) характеристики

Спад плоской части изображения импульса  $\Delta A_{сп}$  определяется влиянием конечного значения разделительной емкости входной цепи при закрытом входе осциллографа. Наличие емкости приводит к спаду АЧХ в области низких частот. Для осциллографов с закрытым входом регламентируются значения спада вершины ПХ и (или) значение низкой частоты АЧХ при неравномерности минус 3 дБ.

Для спада меньше 20%, связь между нижним значением полосы пропускания АЧХ ( $f_n$ ) и значением спада  $\Delta A_{сп}$  определяется приближенным соотношением:

$$\Delta A_{сп} = 2\pi f_n \cdot \tau_u,$$

где  $\tau_u$  – длительность импульса.

Если исследуемый импульс имеет спад, равный  $\Delta A_{спи}$ , то спад плоской вершины изображения  $\Delta A_{из}$  на экране ЭЛТ будет определяться равенством:

$$\Delta A_{из} = \Delta A_{спи} + \Delta A_{сп}.$$

**Амплитудной характеристикой КВО** называется зависимость размера изображения по вертикали ЭЛТ от уровня входного сигнала (рис. 4). Реальная амплитудная характеристика отличается от идеальной (линейной). Это отличие вызвано нелинейностью характеристик усилителей и ЭЛТ.

Нелинейность тракта ВО приводит к тому, что для разных размеров изображений по вертикали  $A_x$ , коэффициент отклонения имеет разные значения:

$$K_{откл} = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha_x}$$

где  $\alpha_x$  – угол наклона прямой, которая соединяет начало координат с точкой кривой на уровне  $A_x$ .

Это приводит к погрешности измерения напряжения. Калибровка коэффициента отклонения, т.е. установка его номинального значения, проведенная для одного размера изображения (как правило, для максимального  $A_{max}$ ), не исключает погрешности от нелинейности. В НТД на осциллографы обычно нормируется нелинейность КВО, которая не превышает 10%.

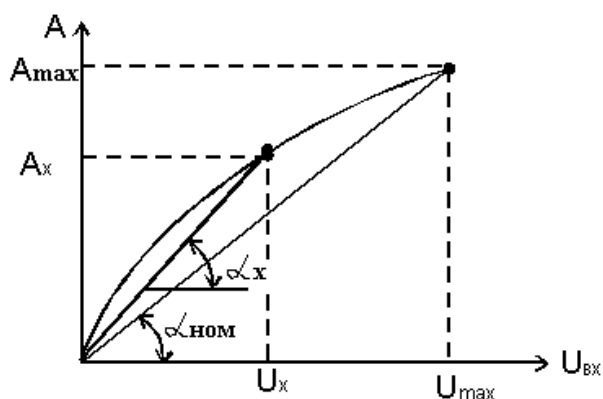


Рисунок 4 – Амплитудная характеристика КВО

Для калибровки используются следующие средства измерения: установка для калибровки вольтметров; вольтметры переменного тока; электронно-счетный частотомер; импульсный калибратор осциллографов; генератор импульсов; генератор сигналов.

Используемые средства калибровки должны удовлетворять следующим требованиям: допустимая погрешность измерения (для эталонного прибора) не должна превышать  $1/3$  допустимой погрешности определяемого параметра калибруемого осциллографа. Кроме того, должны быть выдержаны соответствующие соотношения между параметрами импульсов генератора и параметрами переходной характеристики осциллографа, установленные ГОСТ 8.311.

В данной лабораторной работе калибровка осциллографа выполняется по сокращенной программе с использованием учебных средств измерительной техники.

При калибровке осциллографа в первую очередь проводится внешний осмотр, при котором устанавливается отсутствие механических повреждений любых элементов, которые обеспечивают работу осциллографа, а также наличие четкой фиксации всех переключателей при совпадении с соответствующими надписями на панели прибора.

## Практическая часть

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с назначением, принципом работы и основными характеристиками осциллографов.

Таблица – Описание прибора

Наименование прибора	Тип	Заводской номер	Метрологические характеристики			
			Допустимая погрешность	Диапазон измерения	Частотный диапазон	
Осциллограф _____						

2. Ознакомиться с основными функциональными узлами (структурной схемой) осциллографов.

3. Ознакомиться с назначением и действием основных органов управления осциллографов.

4. Осуществить предварительную настройку аналогового осциллографа:

- включить питание;
- с помощью кнопки «Поиск луча», «Яркость», «Фокус», ручек горизонтального и вертикального смещения луча, а также других органов управления получить устойчивое сфокусированное изображение луча на экране.

5. Осуществить **калибровку канала вертикального отклонения**. Для этого необходимо определить погрешность коэффициента отклонения  $K_{откл}$  по п. 4 (Приложение А), экспериментальные данные внести в таблицу В.2 протокола калибровки (Приложение В).

6. Осуществить **калибровку канала вертикального отклонения**. Для этого необходимо погрешность коэффициента развертки  $K_r$  по п. 5 (Приложение А), экспериментальные данные внести в таблицу В.3 протокола калибровки.

7. Определить неравномерность АЧХ канала  $Y$  по п. 6 (Приложение А),

экспериментальные данные внести в таблицу В.4 протокола калибровки.

8. Подготовить протоколы (Приложение В).
9. Оформить отчет.

**Содержание отчета:**

1. Цели и задачи лабораторной работы.
2. Описание используемых технических средств.
3. Протокол калибровки осциллографа.
4. Вывод.

## Приложение А

### (Опробование аналогового осциллографа)

1 Осциллограф переводят в режим непрерывной развертки и проверяют: наличие линии развертки электронного луча на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ); регулировку яркости и фокусировки луча; сдвиг луча в горизонтальном и вертикальном направлениях.

2 С помощью генератора сигналов синусоидальной и прямоугольной форм напряжения производится проверка работоспособности осциллографа для всех значений коэффициентов развертки и отклонения. Изменяя амплитуду выходного сигнала генератора, проверяют работоспособность осциллографа для всех значений коэффициента отклонения. Изменяя частоту выходного сигнала генератора, проверяют работоспособность для всех значений коэффициента развертки.

3 Определение погрешности коэффициента отклонения по вертикали и коэффициента развертки осуществляют методом сравнения показаний калибруемого осциллографа и эталонного средства измерительной техники, погрешность которого меньше погрешности калибруемого не менее, чем в три раза.

4 Погрешность коэффициента отклонения  $K_{откл}$  определяют методом прямого измерения напряжения, которое подается от измерительного генератора. Калибруемый осциллограф переводят в режим непрерывной развертки. Частоту синусоидального сигнала устанавливают равной 1 кГц. Напряжение на входе осциллографа измеряют эталонным вольтметром. Измерения проводят для каждого значения  $K_{откл}$ . Высота изображения должна составлять не менее 40...80% длины рабочего участка по вертикали. Схема измерения приведена на рисунке А.1.



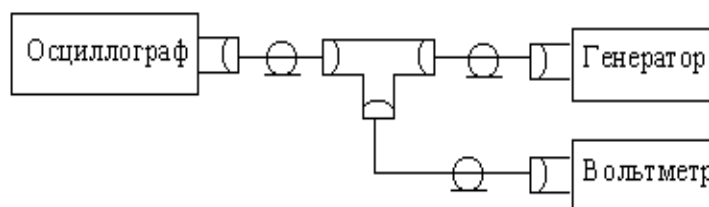


Рисунок А.1 – Схема измерения погрешности коэффициента отклонения.

Погрешность определяют по формуле:

$$\delta_{\text{Коткл}} = \frac{\text{К}_{\text{откл}} - (\text{К}_{\text{откл}})_{\text{д}}}{(\text{К}_{\text{откл}})_{\text{д}}} \cdot 100\%,$$

где  $\text{К}_{\text{откл}}$  – коэффициент отклонения, установленный на передней панели;

$(\text{К}_{\text{откл}})_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}}}{h}$  – действительное значение коэффициента развертки;

$U_{\text{д}}$  – действительное среднеквадратичное значение напряжения;

$h$  – отклонение луча по вертикали (устанавливают, как правило, |равным| не менее 2/3 шкалы ЭЛТ). При определении  $(\text{К}_{\text{откл}})_{\text{д}}$  при биполярном сигнале необходимо брать  $h/2$ .

5. Погрешность коэффициента развертки определяют методом прямого измерения временных интервалов, которые задаются измерительным генератором. Период сигнала на входе осциллографа измеряют эталонным цифровым частотомером. Калибруемый осциллограф переводят в режим непрерывной развертки, а частотомер в режим измерения периода. Для калибровки коэффициента развертки устанавливают такое значение частоты генератора, при котором размер изображения одного периода по горизонтали занимает не менее 2/3 длины экрана. Измерения ведутся для каждого поддиапазона развертки и не менее чем в пяти точках всего диапазона измеряемых временных интервалов, включая две крайних точки. Схема измерения приведена нарис. А.2.

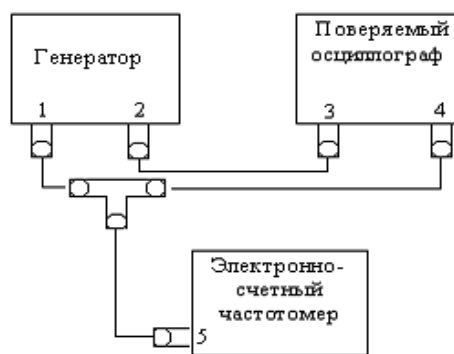


Рисунок А.2 – Схема определения погрешности коэффициента развертки.

Погрешность измерения коэффициента развертки определяют по формуле:

$$\delta_{K_p} = \frac{K_p - (K_p)_д}{(K_p)_д} \cdot 100\%,$$

где  $K_p$  – номинальное значение коэффициента развертки (устанавливается на передней панели осциллографа);

$(K_p)_д = \frac{T_d}{l}$  – действительное значение коэффициента развертки;

$T_d$  – период исследуемого сигнала, обмериваемый цифровым частотомером;

$l$  – число делений в одном периоде исследуемого сигнала.

6 Определение неравномерности амплитудно-частотной характеристики тракта вертикального отклонения проводится во всех положениях переключателя “ВОЛЬТ/делен.” путем подачи на вход усилителя вертикального отклонения постоянного по амплитуде синусоидального напряжения от измерительного генератора и контроля входного напряжения эталонным вольтметром. Схема измерения приведена на рис. А.1.

Величину изображения на частоте 100 кГц устанавливают равной пяти делениям по вертикали.

Амплитуда напряжения на входе усилителя вертикального отклонения поддерживается постоянной и контролируется с помощью (посредством) эталонного вольтметра, который подключается непосредственно на входе усилителя с помощью экранированного тройника.

Перед измерением усилитель вертикального отклонения должен быть сбалансирован и откалиброван. Режим работы развертки - непрерывный.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики тракта вертикального отклонения определяется по формуле:

$$N = 20 \lg \frac{h_{\max}}{h_{\min}},$$

где  $h_{\max}$  – максимальное изображение на экране по вертикали в нормируемой полосе частот;

$h_{\min}$  – минимальное изображение на экране по вертикали в нормируемой полосе частот.

Результат калибровки удовлетворителен, если неравномерность амплитудно-частотной характеристики тракта вертикального отклонения в нормируемом диапазоне частот не превышает допустимого значения, указанного в метрологических характеристиках калибруемого осциллографа.

Аналогичные измерения проводятся во всех положениях переключателя “Вольт/делен.”.

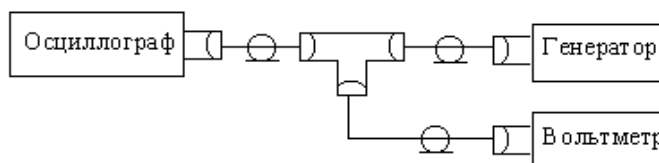


Рисунок А.3 – Схема измерения неравномерности амплитудно-частотной характеристики КВО.

7 Нелинейность амплитудной характеристики проверяют подачей на вход канала  $Y$  такого сигнала импульсной или синусоидальной формы, чтобы в центре изображения занимало одно деление. Частоту прохождения испытательного сигнала, выбирают близкой или равной опорной (средней) частоте. За опорную принимают частоту, которая не менее чем в 20 раз меньше, чем верхняя граница частотного диапазона канала  $Y$ . Измерения осуществляют при среднем положении ручки плавной регуляции усиления. Измеряют размер изображения

испытательного сигнала в делениях шкалы в разных местах рабочей части экрана при перемещении его по вертикали от нижней до верхней границы.

Нелинейность амплитудной характеристики в процентах:

$$\beta_a = (h_n - 1) \cdot 100\%, \quad (\text{A.4})$$

где  $h_n$  – наиболее отличающийся от одного деления шкалы размер изображения испытанного сигнала в любом месте рабочей части экрана| вдоль оси  $Y$ .

8 Время нарастания переходной характеристики – это интервал времени, на протяжении которого переходная характеристика (ПХ) возрастает от 0.1 до 0.9 амплитудного значения. ПХ любого четырехполюсника – это графическое отображение реакции на его выходе на идеальный перепад тока или напряжения на его входе. В осциллографе ПХ наблюдается непосредственно на экране ЭЛТ, если на вход канала  $Y$  подается испытательный сигнал от генератора испытательных импульсов с параметрами, которые соответствуют идеальному перепаду напряжения. Измерение рекомендуется проводить при скорости развертки 0,1 мкс/деление.

## Приложение Б

(инструкция по настройке осциллографа RIGOL DS 1052E)

### Проверка работоспособности

Выполните приведенную ниже процедуру быстрой проверки, чтобы удостовериться в работоспособности Вашего прибора.

#### 1. Подключение прибора к сети электропитания.

Используйте только сетевой шнур, предназначенный специально для Вашего осциллографа. Убедитесь, что источник питания обеспечивает напряжение переменного тока от 100 Вэфф. до 240 Вэфф. с частотой от 45 Гц до 440 Гц. Включите питание прибора и дождитесь появления на экране окна осциллограмм. Нажмите кнопку **Storage**, нажмите затем функциональную кнопку, соответствующую верхнему пункту меню **Storage**, и с помощью этой функциональной кнопки выберите пункт меню **Factory**, нажать **Load**.



Рисунок 1-4

Включение электропитания оборудования



#### Предупреждение

Чтобы избежать поражения электрическим током, проводник заземления должен быть подсоединен к земле.

#### 2. Подача сигнала на вход осциллографа

1) Установите переключатель на пробнике в положение 10X и подключите пробник к разъему канала CH1 осциллографа. Для этого совместите положение выступов на разъеме BNC CH 1 осциллографа с пазами разъема пробника, вставьте разъем пробника в разъем осциллографа и поверните замок разъема пробника вправо до щелчка.

Подключите контакт заземления и наконечник пробника к соответствующим контактам выхода сигнала для компенсации пробника.

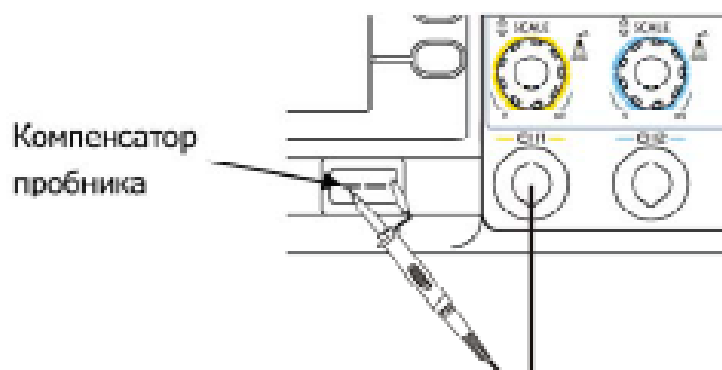


Рисунок 1 5  
Компенсация пробника

2) Сделайте установку ослабления пробника в осциллографе – 10X. Для этого последовательно нажмите кнопки CH1, Probe, 10X.

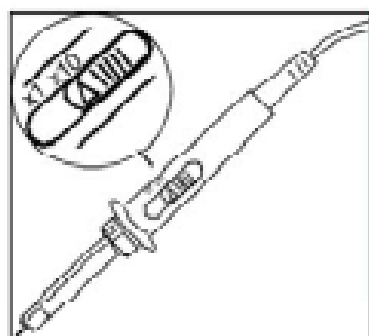


Рисунок 1-б  
Установка пробника



Рисунок 1-7  
Меню CH1

3) Нажмите кнопку AUTO. Через несколько секунд на экране появится сигнал типа «меандр»

4) Нажмите кнопку OFF, или еще раз нажать кнопку CH1, для выключения канала 1, нажмите кнопку CH2, для включения канала 2 повторите шаги 2 и 3.

## Компенсация пробников

Выполните компенсацию для согласования пробника и используемого с ним входного канала. Эту процедуру нужно проводить всякий раз при любом первом подключении пробника к входному каналу.

1. Установите в меню канала CH1 ослабление 10X, установите переключатель ослабления пробника в положение 10X и подключите разъем пробника к входу 1 осциллографа. Если Вы используете насадку-крючок наконечника пробника, убедитесь в надежности контакта и плотности ее посадки. Подключите контакт заземления и наконечник пробника к соответствующим контактам выхода сигнала для компенсации пробника, нажмите кнопку CH1, затем нажмите кнопку **AUTO**.

2. Проверьте форму сигнала на осциллографе.

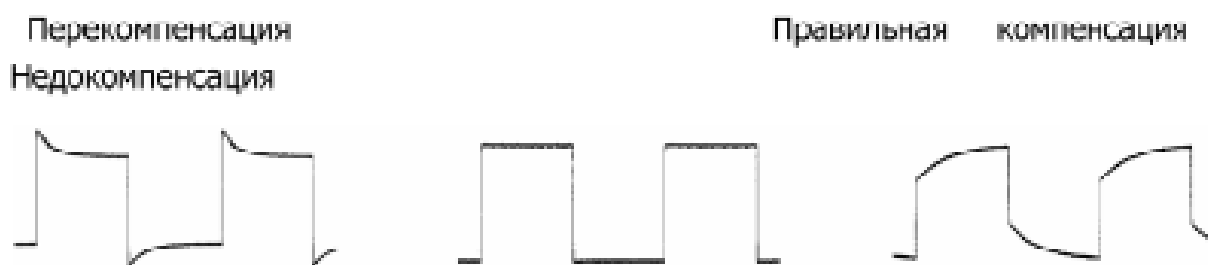


Рисунок 1-8  
Проверка компенсации

3. При необходимости, используя неметаллический инструмент, вращением подстроечного конденсатора пробника добейтесь наиболее правильного изображения меандра на экране осциллографа.

4. Повторите процедуру при необходимости.



**Осторожно!** Во избежание поражения электрическим током при использовании пробника убедитесь в исправности изоляции его кабеля, не допускается касаться его металлических частей, имеющих контакт с источником напряжения.

## Приложение В

### (Протокол калибровки осциллографа)

Калибровка осциллографа типа № \_\_\_\_\_ принадлежащего \_\_\_\_\_  
калиброванного “ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. \_\_\_\_\_

Эталоны \_\_\_\_\_

Внешний осмотр \_\_\_\_\_

Опробование \_\_\_\_\_

Условия калибровки:

Температура окружающей среды

Относительная влажность воздуха\_%

Атмосферное давление \_мм рт. ст.

Время предыдущего прогрева\_мин.

Напряжение сети В

Частота напряжения сети \_\_\_\_\_

Таблица В.2 – Определение погрешности  $K_{откл}$

$K_{откл}$ , В/дел	$h$ дел	$U_d$ , В	$(K_{откл})_d$ , В/дел	$\delta_{K_{откл}}$ , %	Величина НМХ, %
0,5					
1					
2					

Вывод:



Таблица В.3 – Определение погрешности  $K_p$

$K_p$ , мс/дел	$l$ дел	$T_d$ , мс	$(K_p)_d$ , мс/дел	$\delta_{Kp}$ , %	Величина НМХ, %
0,5					
1					
2					

Вывод:

Таблица В.4 – Определение неравномерности амплитудно-частотной характеристики усилителя вертикального отклонения (УВО).

К <sub>откл</sub> Частота	0,5 В/ДЕЛ	1 В/ДЕЛ	2 В/ДЕЛ
	$h$ , дел	$h$ , дел	$h$ , дел
20 Гц			
100 Гц			
1 кГц			
10 кГц			
100 кГц			
150 кГц			
200 кГц			
1 МГц			
N			

Вывод:

Общий вывод о пригодности осциллографа:

Калибровка выполнена \_\_\_\_\_ « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

Протокол проверил: \_\_\_\_\_

## **ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ**

### **Цели:**

- Ознакомление с основными типами и параметрами электрических сигналов.
- Приобретение практических навыков наблюдения и оценки параметров измерительных сигналов
- Ознакомиться с основными видами пассивных RC-фильтров, применяемых в качестве преобразователей измерительных сигналов, их свойствами и расчетом основных параметров.
- Практическое ознакомление с характеристиками электрических фильтров

### **Задачи:**

- Изучение теоретической части. Классификация сигналов. Исходный (несущий) сигнал. Модуляция. Модулированный сигнал. Информативный параметр.
- Практическое изучение основных типов электрических сигналов с помощью многофункционального генератора, источника постоянного напряжения, осциллографа.
- Выполнение измерений параметров электрических сигналов различных видов.
- Расчет частот среза и резонансных частот основных видов пассивных RC-фильтров (фильтр нижних частот – ФНЧ; фильтр верхних частот – ФВЧ; полосовой фильтр – ПФ; фильтр-пробка – ФП).
- Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фильтров

### **Используемые технические средства:**

Осциллограф RIGOL DS 1052E, генератор сигналов OWON AG 1022, блок RC-фильтров.

## Теоретическая часть

**Измерительный преобразователь** – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

**Измерительная цепь** – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода. Измерительную цепь измерительной системы называют **измерительным каналом**.

По характеру преобразования различают аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые преобразователи.

**Аналоговый измерительный преобразователь** — измерительный преобразователь, преобразующий одну аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал) в другую аналоговую величину (измерительный сигнал);

**Аналого-цифровой измерительный преобразователь** — измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код;

**Цифро-аналоговый измерительный преобразователь** — измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования числового кода в аналоговую величину.

По месту в измерительной цепи различают **первичные** и **промежуточные** преобразователи.

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

По другим признакам различают также:

**Передающий измерительный преобразователь** — измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации;

**Масштабный измерительный преобразователь** — измерительный преобразователь, предназначенный для изменения измерительного сигнала в заданное число раз.

**Сигнал** — материальный носитель информации. Сигналом может быть любой физический процесс, параметры которого изменяются в соответствии с передаваемым сообщением.

По физической природе сигналы могут быть:

- механические;
- электрические;
- оптические;
- акустические

Измерительный сигнал — сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине.

### *Основные виды электрических сигналов*

Электрические сигналы представляют собой электрические процессы, используемые для передачи, приема и преобразования информации.

Сигналы в общем случае разделяют на детерминированные и случайные.

Детерминированные сигналы могут быть описаны некоторой определенной функцией времени. Пример: некоторая последовательность импульсов с определенной длительностью  $\tau_{и}$ , амплитудой  $A$  и периодом  $T$  (рис. 1).

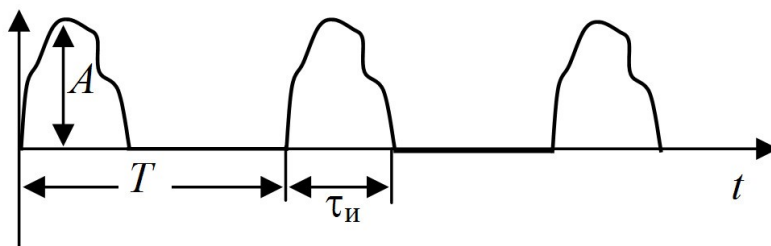


Рис. 1 – Детерминированный сигнал

Случайные сигналы не могут быть описаны детерминированной функцией, т.е. не могут быть предсказаны с вероятностью, равной единице.

### **Сигнал постоянного уровня (постоянный сигнал)**

Примерами электрических сигналов постоянного уровня могут являться постоянное напряжение или постоянный ток. График сигнала постоянного уровня представлен на рис.2.

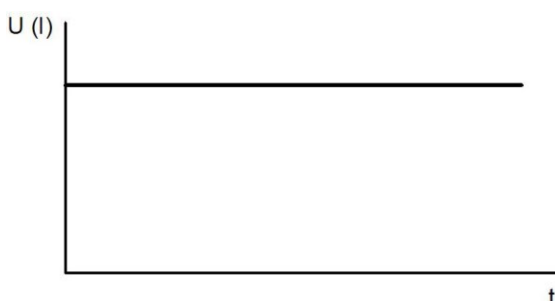


Рис. 2 – Сигнал постоянного уровня

По характеру выделяют сигналы аналоговые, дискретные, квантованные, цифровые.

### **Аналоговый сигнал**

Аналоговый сигнал – это сигнал, непрерывный во времени, который может принимать любые уровни значений в некотором диапазоне. Описывается непрерывной функцией. Может быть циклическим (например, синусоидальным).

Примеры аналоговых сигналов приведены на рис. 3, а, б.

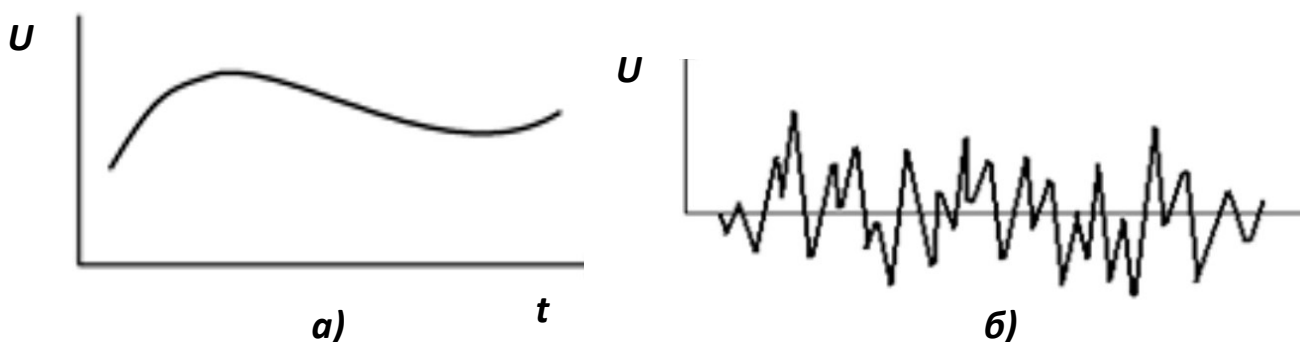


Рис. 3 – Аналоговые сигналы

## Дискретный сигнал

Дискретный сигнал – это сигнал, существующий только в определённые моменты времени (дискретный по времени сигнал). Процесс преобразования аналогового сигнала в дискретный показан на рис. 4. Дискретный сигнал можно получить, если, например, осуществлять измерения уровня аналогового сигнала в определённые моменты времени. Промежуток между отдельными значениями сигнала называется интервалом дискретизации.

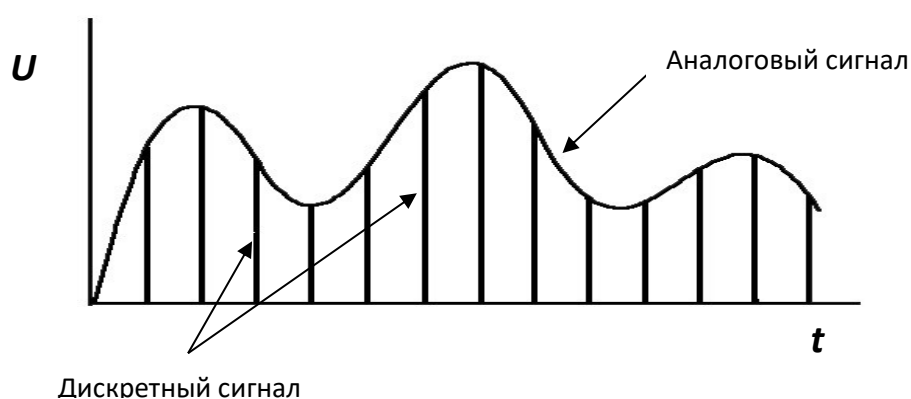


Рис. 4 – Дискретный сигнал

## Квантованный сигнал

Чтобы получить квантованный сигнал, весь диапазон значений сигнала разбивают на конечное число уровней. Разность между двумя соседними уровнями называется шагом квантования. Отсчёты сигнала сравниваются с уровнями квантования и в качестве сигнала выбирается число, соответствующее некоторому уровню квантования. Пример квантованного сигнала представлен на рис.5.

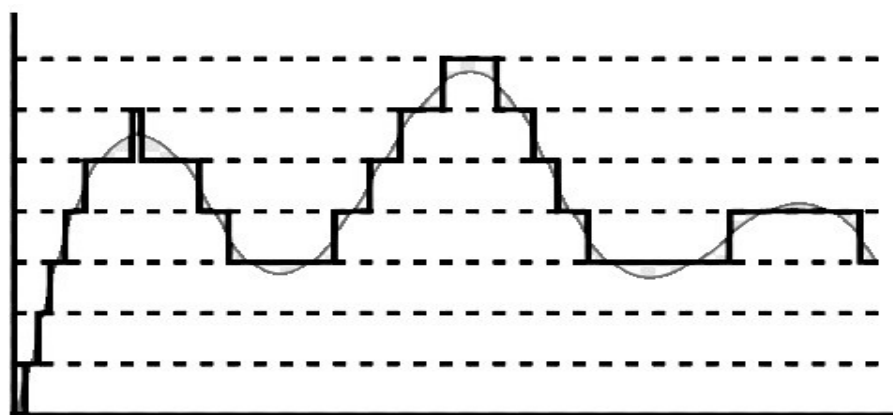


Рис. 5 – Квантованный сигнал

### **Цифровой сигнал**

Цифровой сигнал – это одновременно дискретизированный и квантованный сигнал. Описывается функцией дискретного времени и конечным множеством возможных значений. На каждом заданном промежутке времени известно квантованное значение сигнала. Обычно цифровой сигнал представляют в двоичном коде.

### **Модуляция**

Модуляцией называется изменение одного из параметров исходного (несущего) сигнала с целью превращения его в информативный параметр. В случае, когда речь идет об измерительных сигналах, информативный параметр изменяется пропорционально входной физической величине, т.е. несет информацию о значении физической величины.

Исходными (несущими) могут быть следующие типы сигналов.

- **Сигналы постоянного уровня (постоянный сигнал)**

Примерами таких сигналов могут являться постоянное напряжение или постоянный ток. График сигнала постоянного уровня представлен на рис.2.

Сигнал постоянного уровня имеет только один параметр, который можно изменить: уровень. В этом случае исходный сигнал, преобразованный с целью передачи информации, называют сигналом, модулированным по уровню.

- **Гармонические сигналы, например, синусоидальный,**

косинусоидальный (рис.6).

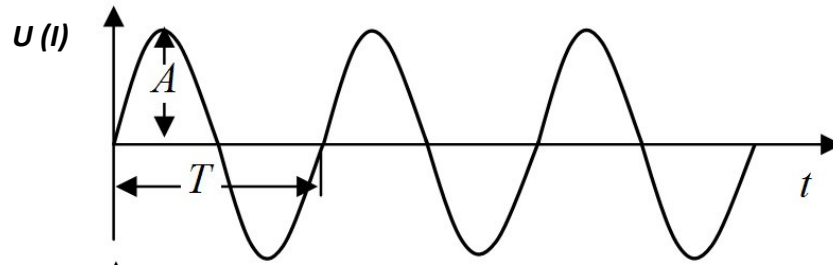


Рис. 6 – Гармонический сигнал

Сигнал, описываемый функцией  $u(t) = U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ , имеет три свободных параметра: уровень (амплитуда)  $U$ , циклическая частота  $\omega$  и фаза  $\varphi$ . Соответственно такой сигнал может быть модулирован по амплитуде (**амплитудная модуляция**), частоте (**частотная модуляция**) или фазе (фазовая модуляция). Примеры амплитудной и частотной модуляции показан на рис. 7, 8.

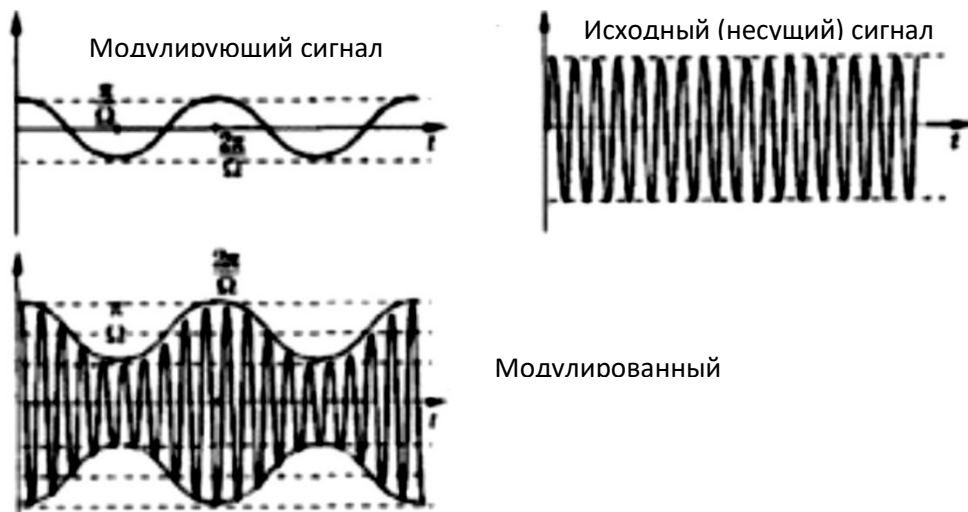


Рис. 7 – Амплитудная модуляция



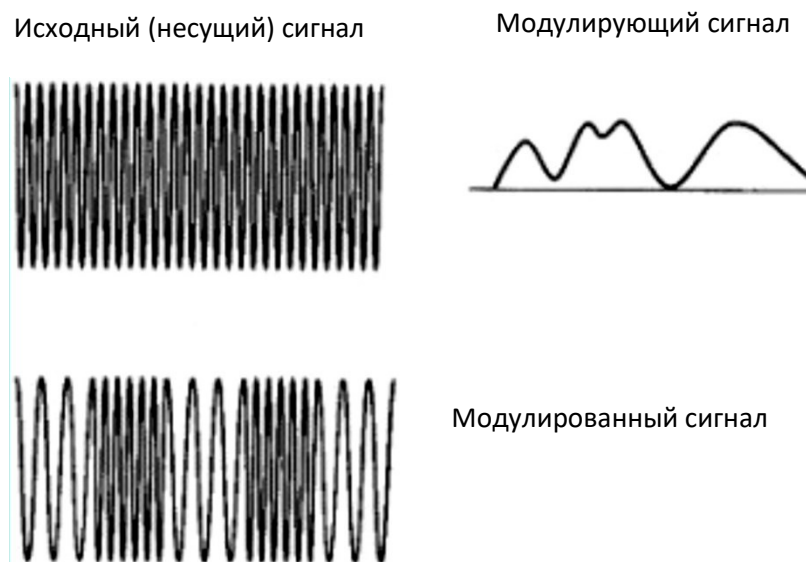


Рис. 8 – Частотная модуляция

Последовательность прямоугольных импульсов (рис.9) может быть модулирована по амплитуде (**амплитудно-импульсная модуляция**), по частоте (**частотно-импульсная модуляция**), по фазе (**фазоимпульсная модуляция**) или по ширине импульсов (**широотно-импульсная модуляция**).

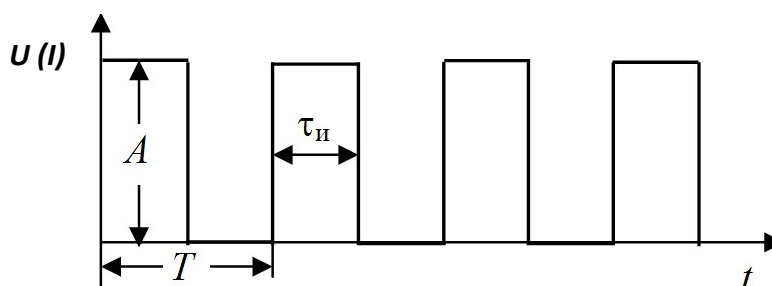


Рис. 9 – Последовательность прямоугольных импульсов

**Осциллограф** предназначен для исследования электрических сигналов путем визуального наблюдения на экране и измерения их параметров.

По способу обработки входного сигнала осциллографы можно разделить на аналоговые (электронно-лучевые) и цифровые, а также по количеству лучей на однолучевые, двухлучевые и т.д. N-лучевой осциллограф имеет N сигнальных входов и может одновременно отображать на экране N графиков. Цифровые осциллографы в свою очередь делятся на запоминающие, люминофорные и стробоскопические.

Осциллографы, созданные на базе компьютеров, отличаются от электронно-лучевых использованием цифровых способов формирования изображения и служебных сигналов. Общие же принципы работы и алгоритмы обработки исследуемых электрических сигналов у тех и других в основном совпадают.

**Аналоговые осциллографы.** Приборы этого типа считаются классическими представителями общего понятия об осциллографе, как контрольно-измерительном приборе. В целом, любой аналоговый осциллограф состоит из следующих составляющих: входной делитель, усилитель вертикального отклонения, схема синхронизации и горизонтального отклонения, источник питания и электронно-лучевая трубка.

Различают следующие разновидности электронно-лучевых осциллографов: универсальные, скоростные, сверхскоростные, запоминающие, специальные.

Универсальные осциллографы (С1-82, С1-92 и др.) имеют ширину полосы пропускания от нуля до сотен мегагерц и диапазон исследуемых сигналов от десятков микровольт до сотен вольт. Они применяются для исследования гармонических и импульсных сигналов. Примерами универсальных осциллографов являются:

- Скоростные осциллографы (С7 -10А, Б) С7-15 и др.) применяются для наблюдения и регистрации однократных и повторяющихся импульсов и периодических колебаний и имеют полосу пропускания до единиц гигагерц. Сверхскоростные (стробоскопические) осциллографы (например, С7-5, С7-12 и др.) применяются для регистрации периодических сигналов в полосе частот от нуля до десятков гигагерц.

- Запоминающие осциллографы (С8-8, С8-15 и др.) применяются для регистрации однократных и редко повторяющихся сигналов.

- Специальные осциллографы (С9-4, С9-57 и др.) применяются для исследования телевизионных сигналов.

**Цифровые осциллографы.** По сравнению с аналоговыми предшественниками они имеют более широкие возможности, а благодаря снижению стоимости цифровых схем с каждым годом они становятся более доступными потенциальным покупателям. В общем виде цифровой осциллограф состоит из входного делителя, нормализующего усилителя, аналого-цифрового преобразователя, блока памяти, устройства управления и устройства отображения.

Фильтры применяются весьма часто для преобразования электрических измерительных сигналов. При этом решаются задачи подавления помех (выделение частотной области, соответствующей полезному сигналу, и подавление сигналов помех на других частотах), нормирования измерительных сигналов (например, при подаче на вход АЦП), дифференцирования и интегрирования сигналов, частотного анализа и др.

Основные виды пассивных электрических фильтров представлены на рис.10...13.

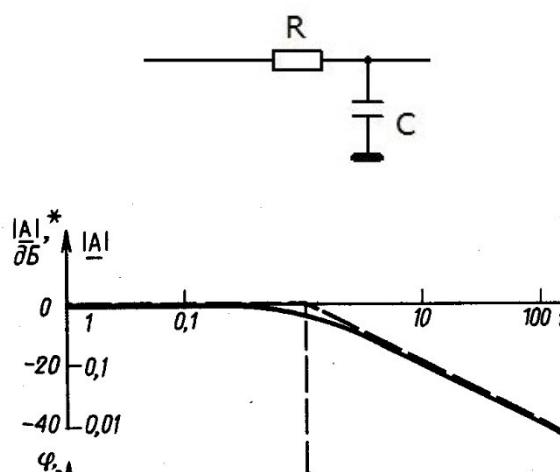


Рисунок 10 – Пассивный фильтр нижних частот (ФНЧ) и его амплитудно-частотная характеристика

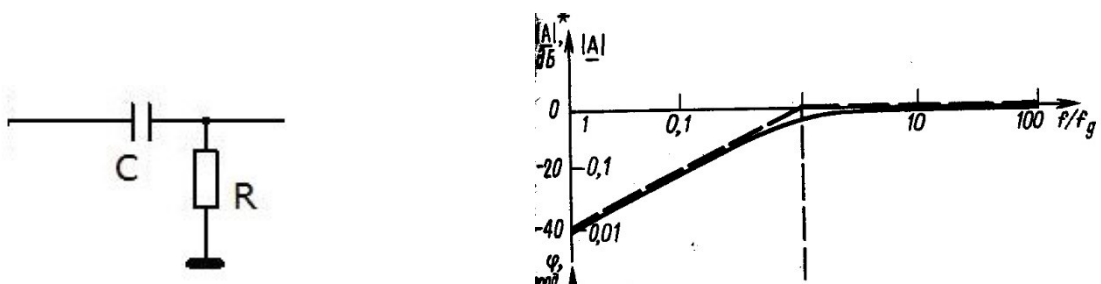


Рисунок 11 – Пассивный фильтр верхних частот (ФВЧ) и его амплитудно-частотная характеристика

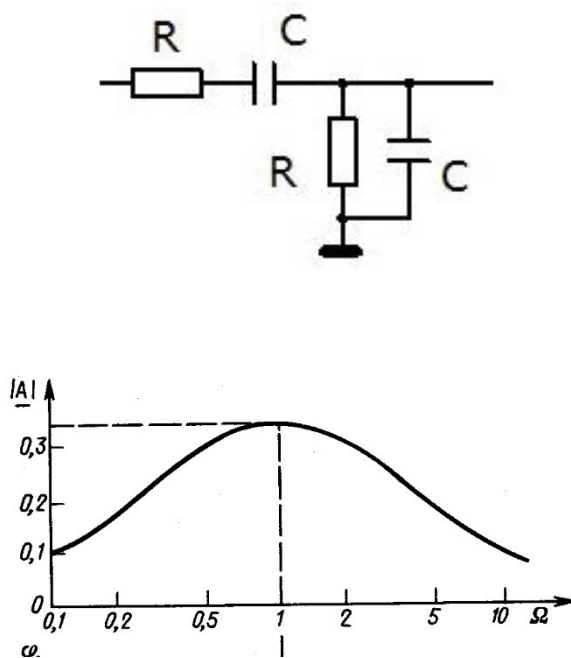


Рисунок 12 – Пассивный полосовой фильтр (ПФ) и его амплитудно-частотная характеристика

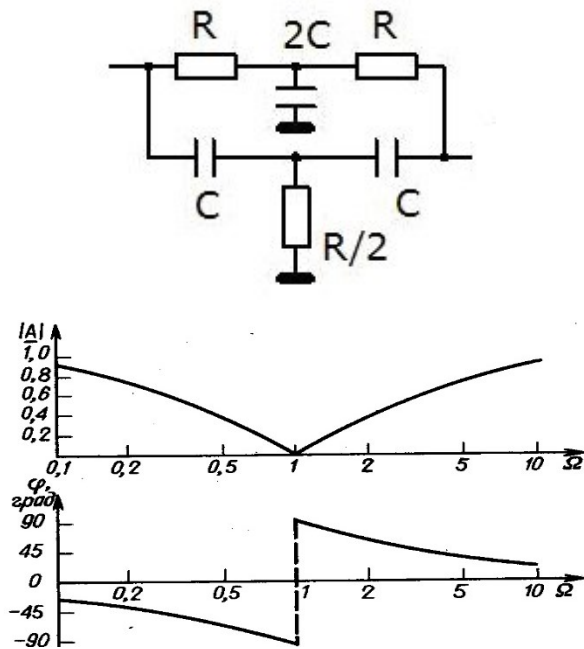


Рисунок 13 – Двойной Т-образный мост (фильтр-пробка – ФП) и его амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики

Расчет резонансной частоты (частоты среза) для всех перечисленных типов фильтров производится по формуле:

$$f_r = 1/2\pi RC.$$

### Практическая часть

#### *Описание измерительной системы*



Рисунок 14 – Структура модуля контроля линейного перемещения

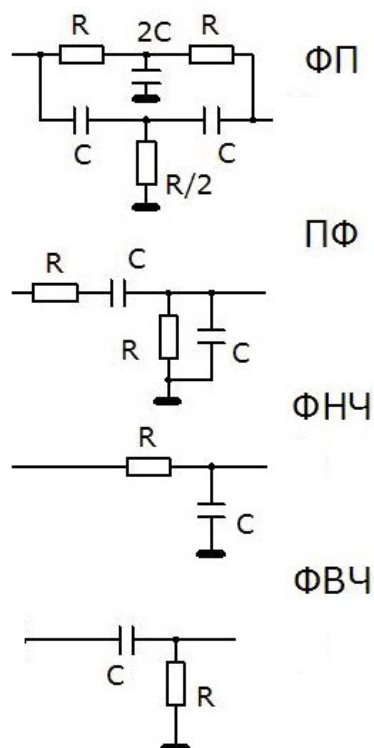


Рисунок 15 – Принципиальные схемы фильтров, входящих в комплект блока RC-фильтров



Рисунок 16 – Внешний вид блока RC-фильтров

### Порядок выполнения работы

1. Рассчитать параметры фильтров (частоту среза) при следующих номинальных значениях емкости и сопротивления:  $R = 1 \text{ кОм}$ ;  $C = 0,15 \text{ мкФ}$ .
2. Подключить выход генератора сигналов ко входу комплекта фильтров, а к выходам фильтров (последовательно) – вход цифрового осциллографа.
3. Подать на вход фильтров синусоидальное напряжение размахом 5 В с частотой 100 Гц. С помощью осциллографа определить размах сигнала на выходе ФВЧ. Последовательно изменять частоту сигнала на входе ФВЧ

(значения 100, 500, 750, 1000, 2500, 5000, 10000, 25000 Гц) при неизменной амплитуде входного сигнала и фиксировать выходное напряжение в таблицу.

Таблица 1 – Результаты измерений

Параметр	Частота сигнала, Гц											
	100	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	5000	10000	25000
ФВЧ												
Амплитуда сигнала, В												
ФНЧ												
Амплитуда сигнала, В												
ПФ												
Амплитуда сигнала, В												
ФП												
Амплитуда сигнала, В												

4. Повторить п. 3 для ФНЧ, ПФ, ФП.

5. Построить АЧХ фильтров, используя полученные данные.

**Содержание отчета:**

1. Цели и задачи лабораторной работы.
2. Описание используемых технических средств.
3. Расчет частоты среза, таблица с результатами измерений, АЧХ фильтров.
4. Вывод.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

### Цели:

- Ознакомление с основными типами датчиков измерения температуры.
- Практическое изучение характеристик измерительных преобразователей температуры.

### Задачи:

1. Ознакомиться с общими сведениями о разновидностях датчиков измерения температуры.
2. Изучить принципы работы термодатчиков.
3. Экспериментальным путем определить зависимости сопротивления датчиков температуры. Построить графики.
4. Предложить способы включения термисторов в измерительную цепь. Нарисовать схемы.

### Теоретическая часть

**Измерительный преобразователь** – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

**Измерительная цепь** – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода. Измерительную цепь измерительной системы называют **измерительным каналом**.

**Чувствительный элемент** – это часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал.

**Датчик** – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию).



Примеры: датчик температуры, датчик силы, датчик перемещения. Датчик, используемый в области измерений ионизирующих излучений, называют детектором.

К основным характеристикам первичных измерительных преобразователей относятся:

- **Входная величина**, воспринимаемая и преобразуемая датчиком;
- **Выходная величина**, используемая для передачи информации; она обычно модулируется по амплитуде, по временному признаку (частота, фаза и др.), по кодовому признаку, а также по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи);
- **Статическая характеристика датчика**. Для каждого измерительного преобразователя можно установить связь между выходной и входной величинами:

$$Y = f(X).$$

Математическое или графическое описание этой связи называется функцией преобразования измерительного преобразователя (или для датчика в целом - функцией преобразования датчика).

Отношение изменения выходной величины  $\Delta Y$  к соответствующему изменению входной величины  $\Delta X$  называется **чувствительностью** датчика:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

В общем случае, если функция преобразования **не линейна**, отношение изменения выходной величины к соответствующему изменению входной величины для любого  $X_i$  определяется **коэффициентом преобразования**

$$K_i = \Delta Y_i / \Delta X_i,$$

а чувствительность является функцией входной величины.

Если зависимость между выходной и входной величинами является линейной, то чувствительность преобразователя не зависит от входной величины:

$$Y = SX.$$

В этом случае чувствительность и коэффициент преобразования равны, поэтому для линейных датчиков используют как термин «чувствительность», так и термин «коэффициент преобразования».

**Методы и средства измерения температуры** принято делить на две большие группы – контактные и бесконтактные, которые, в свою очередь, подразделяются по физическим эффектам, положенным в основу принципа их действия.

К контактным методам относятся термометры расширения (ртутные, спиртовые и др.), а также биметаллические и дилатометрические термометры. К этому классу относят термопарные датчики, терморезистивные преобразователи, световодные датчики и многие термоиндикаторы. Группу бесконтактных измерителей температуры составляют методы пирометрии и термометрии излучения.

*Термопары* относятся к классу термоэлектрических преобразователей, принцип действия которых основан на явлении Зеебека: если спаи двух разнородных металлов, образующих замкнутую электрическую цепь, имеют неодинаковую температуру ( $T_1 \neq T_2$ ), то в цепи протекает электрический ток (рисунок 1). Изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления тока.

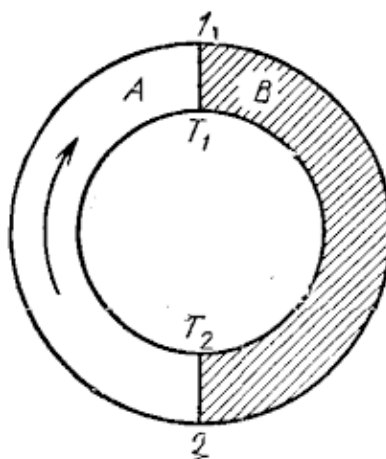


Рисунок 1 – Явление Зеебека

Под термоэлектрическим эффектом понимается генерирование термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), возникающей из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов и сплавов.

Таким образом, термопара может образовывать устройство (или его часть), использующее термоэлектрический эффект для измерения температуры. В сочетании с электроизмерительным прибором термопара образует термоэлектрический термометр. Измерительный прибор или электронную измерительную систему подключают либо к концам термоэлектродов (рисунок 2а), либо в разрыв одного из них (рисунок 2б).

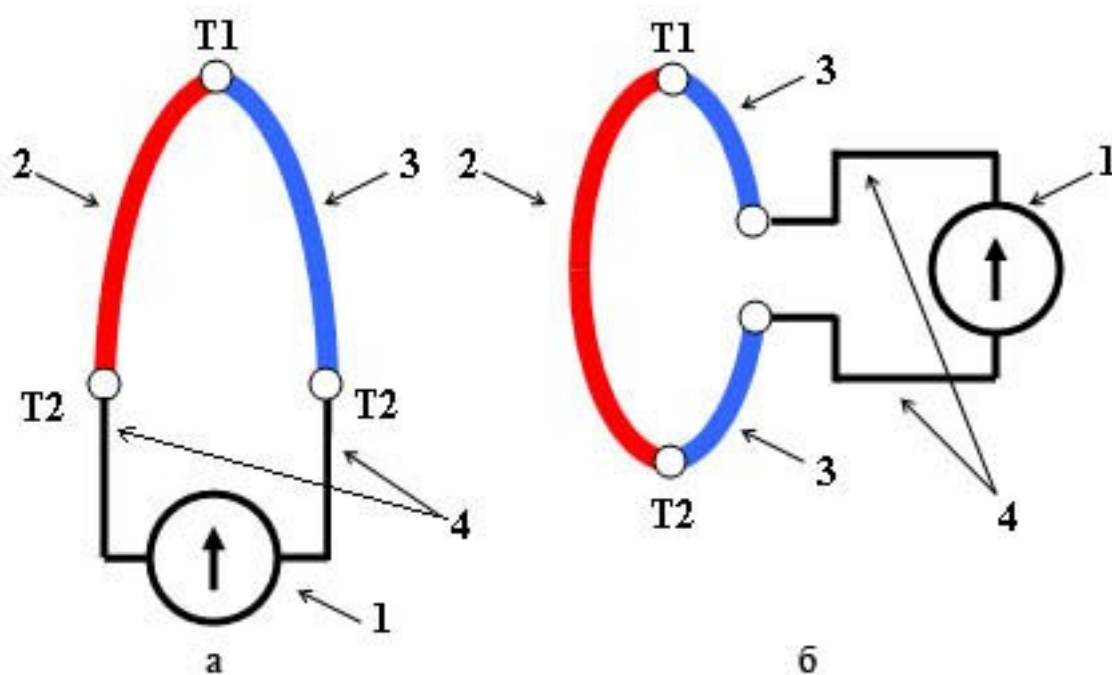


Рисунок 2 – Подключение термопары к измерительному прибору

В местах подключения проводников термопары к измерительной системе возникают дополнительные термоЭДС. В результате их действия на вход измерительной системы фактически поступает сумма сигналов от рабочей термопары и от «термопар», возникших в местах подключения (рисунок 3).

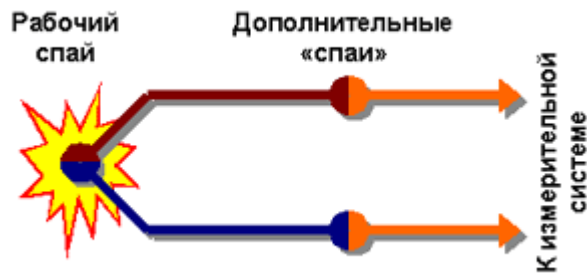


Рисунок 3 – Принцип работы термопары

Существуют различные способы избежать этого эффекта. Самым очевидным из них является поддержание температуры холодного спая постоянной.

На практике при измерении температур широко используется техника «компенсации холодного спая»: температура холодного спая измеряется другим датчиком температуры, а затем величина термоЭДС холодного спая программно или аппаратно вычитается из сигнала термопары (рисунок 4). Места подключения термопары к измерительной системе должны иметь одинаковую температуру, то есть находиться в изотермальной зоне. Кроме того, в схеме с компенсацией холодного спая в этой же зоне должен находиться и датчик температуры холодного спая. Разработчик должен учитывать эти требования при конструировании измерительной системы.

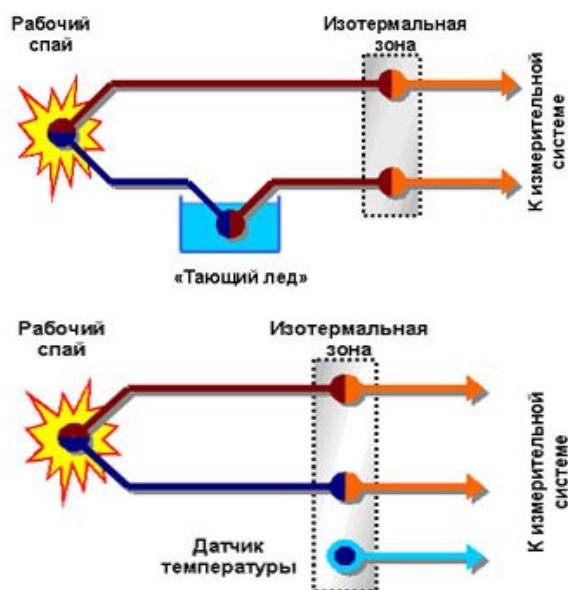


Рисунок 4 – Техника компенсации холодного спая



Таблица 1 – Типы термопар

Тип термопары	Буквенное обозначение НСХ*	Материал термоэлектродов		Коэффициент термоЭДС, мкВ/°С (в диапазоне температур, °С)	Диапазон рабочих температур, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
		положительного	отрицательного			
ТЖК	J	Железо (Fe)	Сплав константен (45% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	50-64 (0-800)	от -200 до +750	900
ТХА	K	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав алюмель (94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co)	35-42 (0-1300)	от -200 до +1200	1300
ТМК	T	Медь (Cu)	Сплав константан (55% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	40-60 (0-400)	от -200 до +350	400
ТХКн	E	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав константан (55% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	59-81 (0-600)	от -200 до +700	900
ТХК	L	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав копель (56% Cu + 44% Ni}	64-88 (0-600)	от -200 до +600	800
ТНН	N	Сплав никросил (83,49% Ni + 13,7% Cr + 1,2% Si + 0,15% Fe + 0,05% C + 0,01% Mg)	Сплав нисил (94,98% Ni + 0,02% Cr + 4,2% Si + 0,15% Fe + 0,05% C + 0,05% Mg)	26-36 (0-1300)	от -270 до +1300	1300
ТПП13	R	Сплав платина-родий (87% Pt + 13% Rh)	платина (Pt)	10-14 (600-1600)	от 0 до +1300	1600
ТПП10	S	Сплав платина-родий (87% Pt — 13% Rh)	платина (Pt)	10-14 (600-1600)	от 0 до +1300	1600
ТПР	B	Сплав платина-родий (70% Pt - 30% Rh}	Сплав платина-родий (94% Pt-6%Rh)	10-14(1000-1800)	от 600 до+1700	1800
ТВР	A-1 A-2 A-3	Сплав вольфрам-рений (95% W - 5% Re)	Сплав вольфрам-рений (80% W-20% Re)	14-7 (1300-2500)	от 0 до +2200 от 0 до +1800 от 0 до +1800	2500

ТСС	I	Сплав сизьд	Сплав силин	-	от 0 до + 800	900
-----	---	-------------	-------------	---	---------------	-----

**Примечание:** НСХ — номинальные статические характеристики преобразования по международной классификации ТСС

*Терморезистор (термистор)* – полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление которого существенно убывает с ростом температуры.

Для термистора характерны большой температурный коэффициент сопротивления (ТКС) (в десятки раз превышающий этот коэффициент у металлов), простота устройства, способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках, стабильность характеристик во времени.

Терморезистор изготавливают в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок преимущественно методами порошковой металлургии. Их размеры могут варьироваться в пределах от 1–10 мкм до 1–2 см.

Основными параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, интервал рабочих температур, максимально допустимая мощность рассеяния.

*Термометр сопротивления (ТС)* это термометр, как правило, в металлическом или керамическом корпусе, чувствительный элемент которого представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Самый популярный тип термометра – платиновый термометр сопротивления, это объясняется высоким температурным коэффициентом платины, ее устойчивостью к окислению и хорошей технологичностью. В качестве рабочих средств измерений применяются также медные и никелевые термометры. Главное преимущество термометров сопротивления – широкий диапазон температур, высокая стабильность, близость характеристики к линейной зависимости, высокая взаимозаменяемость. Пленочные платиновые термометры сопротивления отличаются повышенной вибропрочностью, но

меньшим диапазоном температур. Изготавливаются также герметичные чувствительные элементы термометров сопротивления различных размеров, что позволяет их использовать в местах, где важно устанавливать миниатюрный датчик температуры. Недостаток термометров и чувствительных элементов сопротивления – необходимость использования для точных измерений трех- или четырех- проводной схемы включения, т.к. при подключении датчика с помощью двух проводов, их сопротивление включается измеренное сопротивление термометра. Важнейшей технологической проблемой для ТС проволочного типа является герметизация корпуса ЧЭ специальной глазурью, состав глазури должен быть подобран так, чтобы при колебаниях температуры в пределах рабочего диапазона не происходило разрушение герметизирующего слоя.

*Интегральные датчики температуры* отличаются от других типов термодатчиков тем, что работают в диапазоне, обычно ограниченном температурой от -55 до 150°C. Часть интегральных датчиков температуры имеет указанный диапазон измерения, часть имеет более узкий диапазон, что обусловлено либо используемым типом корпуса, либо сделано для снижения стоимости. Самой главной отличительной особенностью интегральных датчиков по сравнению с другими типами датчиков температуры является их богатая функциональность. Интегральный кремниевый датчик температуры включает в себя термочувствительный элемент - первичный преобразователь температуры и схему обработки сигнала, выполненные на одном кристалле и заключенные в единый корпус. В отличие от использования термопар, в данном случае отсутствует необходимость разрабатывать схему компенсации холодного спая и схему линеаризации выходного сигнала. Также нет необходимости разрабатывать и применять внешние схемы компараторов или АЦП для преобразования аналоговых сигналов в логические уровни или цифровой код на выходе - все эти функции уже встроены в некоторые серии интегральных датчиков температуры.

### **Практическая часть**



## Описание измерительной системы

Модуль измерительного канала контроля температуры типа «первичный преобразователь–промежуточный преобразователь–устройство отображения» состоит из нагревающего устройства 1 и емкости с водой 2, в которую помещены термодатчики РТ-100 3, термистор 4, интегральный цифровой датчик 5, эталонный цифровой измеритель 6, контроллера для обработки сигналов и вывода на ПК, мультиметра для контроля параметров измерительного сигнала (рисунок 1).

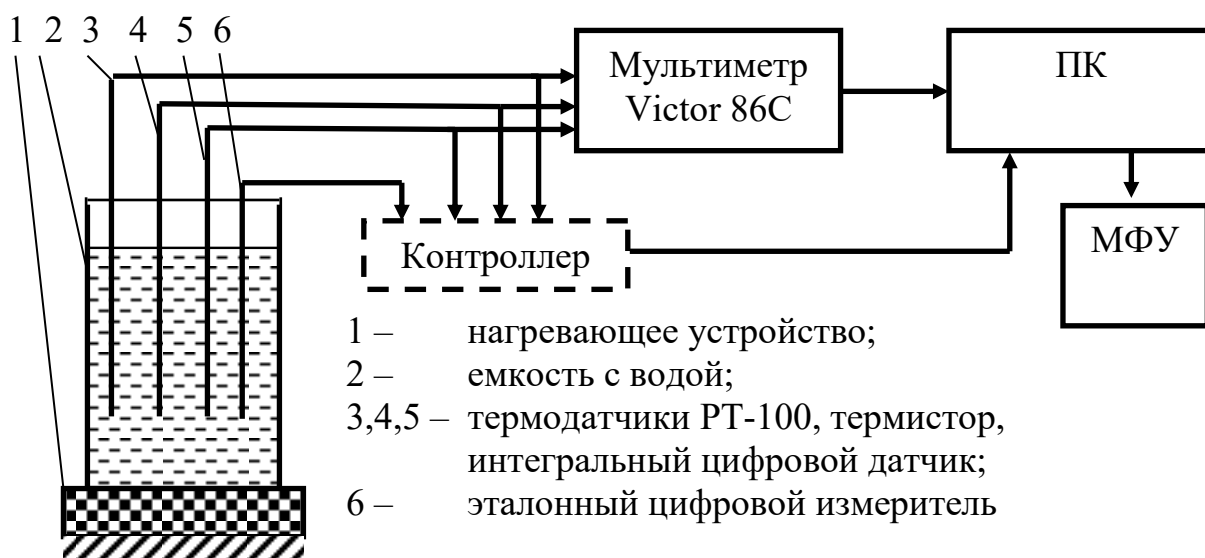


Рисунок 5 – Схема модуля измерительного канала контроля температуры

Основные технические характеристик измерительного канала контроля температуры:

- диапазон измерений, 0-100°C;
- максимальная допустимая погрешность, не более 0,5°C;
- рабочий диапазон эксплуатационных температур, не менее 10-40°C;
- электропитание 1-фазное, 230 В, 50 Гц;
- объект измерения - вода;
- устройство подогрева объекта измерения – термопот;
- в составе модуля используются аналоговые ДТС035Л-РТ100 и ДТС035Л-50М и цифровой DS18B20 датчики измерения температуры объекта, имеющие технические характеристики приведенные в табл 2.

Таблица 2 – Технические характеристики датчиков измерения температуры

	ДТС035Л-РТ100	ДТС035Л-50М	DS18B20
Диапазон измерения температуры; °С	-50... +500	-50... +500	-55... +125
Точность; °С	± 0,30	± 0,30	±0.5 (в диапазоне -10°С..+85°С)
Быстродействие; сек	10...30	10...30	0,75
Диапазон допустимых напряжений питания; V	12...36	12...36	3,0...5,5
Интерфейс	-	-	1-WIRE

### **Порядок выполнения работы:**

1. Установить датчики температуры в зону нагрева.
2. Измерить внутреннее сопротивление испытуемых датчиков при комнатной температуре.
3. Включить нагревающее устройство в сеть 220 В 50 Гц.
4. Зафиксировать результаты измерений в условных единицах преобразования датчиков и определить их сопротивления в контрольных точках (комнатная температура, 30°С, 40°С, 50°С, 60°С, 70°С, 80°С, 90°С, 100°С).  
Определение сопротивлений для ДТС035Л-РТ100 и ДТС035Л-50М осуществляется косвенным способом по результатам прямых измерений падений напряжений на них. С этой целью:

- 1) измерить падение напряжения на датчике  $U_{\delta}$  в каждой контрольной точке;
- 2) определить значение сопротивления датчика косвенным способом согласно закону Ома:

$$R_{\delta} = U_{\delta} / I_{\delta},$$

где  $I_{\delta} = 10,4$  мА для ДТС035Л-РТ100 и  $I_{\delta} = 20,1$  мА для ДТС035Л-50М.

5. Полученные данные занести в табл 3.

Таблица 3 – Результаты 1-го цикла измерений ( $k = 1$ )

Тип датчика	Параметр	Контрольные точки температур, °C								
			30	40	50	60	70	80	90	
ДТС035Л-РТ100	у.е. пр-я, $X_i$									
	$U_{\partial i}, B$									
	$R_{\partial i}, Ом$									
ДТС035Л-50М	у.е. пр-я, $X_i$									
	$U_{\partial i}, в$									
	$R_{\partial i}, Ом$									
DS18B20	у.е. пр-я, $X_i$									

6. Провести пять циклов измерений ( $k = 5$ ). Полученные данные занести в таблицы 4, 5, 6, 7, аналогичные таблице измерений 1.

7. Рассчитать для каждой контрольной температурной точки средние значения результатов измерений. Данные занести в табл 8. Для датчика **ДТС035Л-РТ100** сравнить измеренные значения сопротивлений с паспортными (Приложение А).

8. По результатам измерений построить графики зависимостей средних значений температур датчиков в условных единицах преобразования и средних значений их сопротивлений от температуры. Провести анализ результатов. Сделать выводы относительно линейности преобразования (функции преобразования). В случае нелинейности преобразования определить линейный интервал и рассчитать чувствительность датчика.

Таблица 8 – Усредненные результаты измерений

Тип датчика	Параметр	Контрольные точки температур, °C								
			30	40	50	60	70	80	90	

ДТС035Л-РТ100	у.е. пр-я, $X_{иср}$									
	$R_{диср}$ , Ом									
ДТС035Л-50М	у.е. пр-я, $X_{иср}$									
	$R_{диср}$ , Ом									
DS18B20	у.е. пр-я, $X_{иср}$									

9. Произвести оценку средних квадратических отклонений результатов наблюдений сопротивлений датчиков ДТС035Л-РТ100 и ДТС035Л-50М для каждой контрольной точки:

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^5 (R_k - \overline{R_{cpk}})^2}{k-1}}, \quad k = 1...5.$$

Результаты занести в табл 9.

Таблица 9– СКО результатов наблюдений

Тип датчика	Параметр	Контрольные точки температур, °С								
			30	40	50	60	70	80	90	
ДТС035Л-РТ100	$S_R$ , Ом									
ДТС035Л-50М	$S_R$ , Ом									

10. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

11. Оформить отчет.

### Содержание отчета:

1. Цели и задачи лабораторной работы.
2. Описание измерительной установки.

3. Таблицы с результатами измерений и расчетов.
4. Графики зависимостей.
5. Выводы.

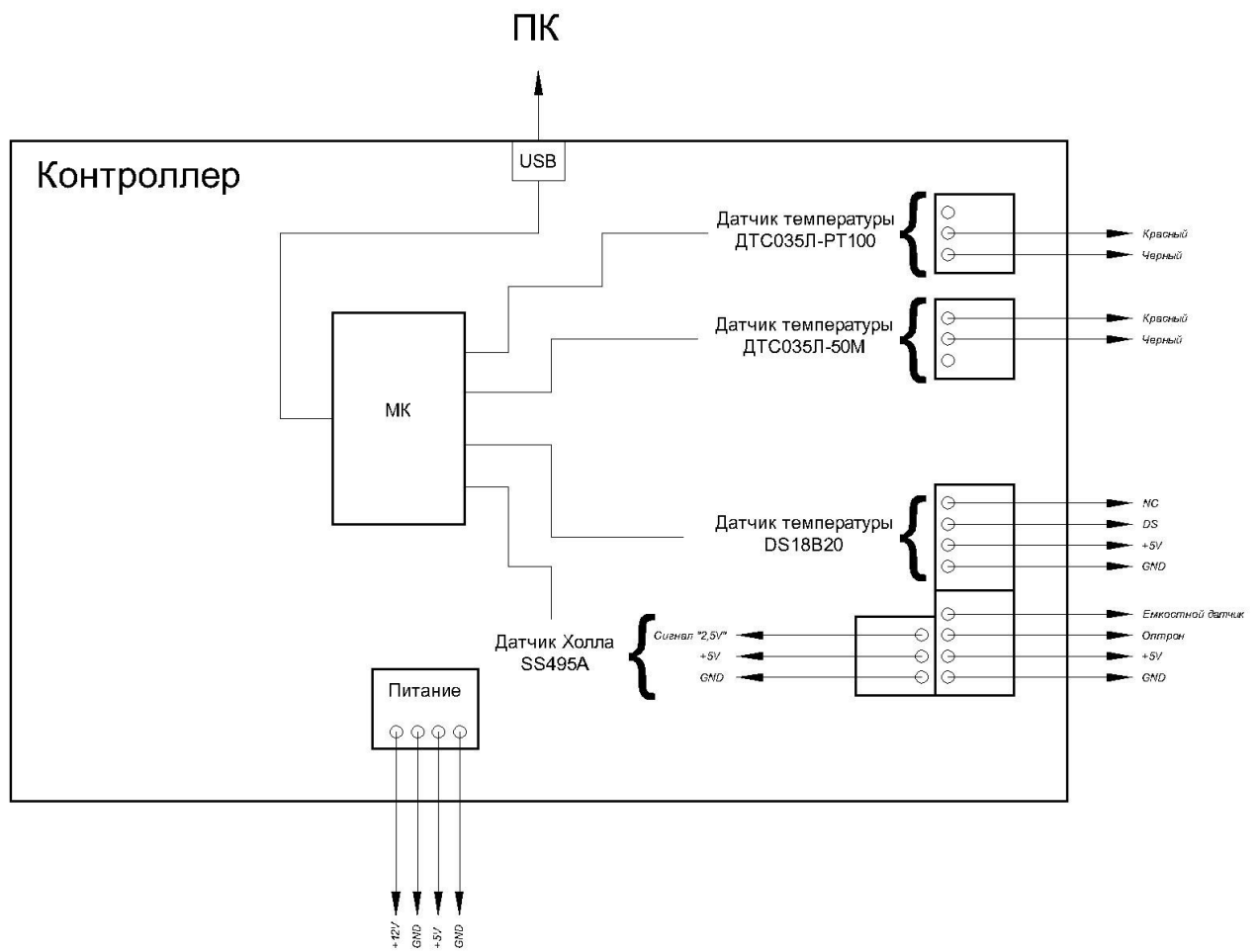
## Приложение А

(таблица сопротивлений ДТС035Л-РТ100)

Pt100										
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,953	102,343	102,733	103,123	103,513
10	103,903	104,292	104,682	105,071	150,460	105,849	106,238	106,627	107,016	107,405
20	107,794	108,182	108,570	108,959	109,347	109,735	110,123	110,510	110,898	111,286
30	111,673	112,060	112,447	112,835	113,221	113,608	113,995	114,382	114,768	115,155
40	115,541	115,927	116,313	116,699	117,085	117,470	117,856	118,241	118,627	119,012
50	119,397	119,782	120,167	120,552	120,936	121,321	121,705	122,090	122,474	122,858
60	123,242	123,626	124,009	124,393	124,777	125,160	125,543	125,926	126,309	126,692
70	127,075	127,458	127,840	128,223	128,605	128,987	129,370	129,752	130,133	130,515
80	130,897	131,278	131,660	132,041	132,422	132,803	133,184	133,565	133,946	134,326
90	134,707	135,087	135,468	135,848	136,228	136,608	136,987	137,367	137,747	138,126
100	138,506	138,885	139,264	139,643	140,022	140,400	140,779	141,158	141,536	141,914
110	142,293	142,671	143,049	143,426	143,804	144,182	144,559	144,937	145,314	145,691
120	146,068	146,445	146,822	147,198	147,575	147,951	148,328	148,704	149,080	149,456
130	149,832	150,208	150,583	150,959	151,334	151,710	152,085	152,460	152,835	153,210
140	153,584	153,959	154,333	154,708	155,082	155,456	155,830	156,204	156,578	156,952
150	157,325	157,699	158,072	158,445	158,818	159,191	159,564	159,937	160,309	160,682
160	161,054	161,427	161,799	162,171	162,543	162,915	163,286	163,658	164,030	164,401
170	164,772	165,143	165,514	165,885	166,256	166,627	166,997	167,368	167,738	168,108

# Приложение Б

(условная схема контроллера)



## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

### Цель:

- Ознакомиться с принципами работы и устройством основных типов преобразователей линейного перемещения.
- Практически ознакомиться с работой преобразователей линейного перемещения на примере датчика Холла.

### Задачи:

1. Изучить теоретический материал.
2. Провести эксперимент, демонстрирующий преобразование линейного перемещения в электрический сигнал.
3. Исследовать измерительные сигналы в устройстве для оценки линейного перемещения на базе датчика Холла.

### Теоретическая часть

**Измерительный преобразователь** – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

**Измерительная цепь** – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода. Измерительную цепь измерительной системы называют **измерительным каналом**.

**Чувствительный элемент** — это часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал.



**Датчик** – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию). Примеры: датчик температуры, датчик силы, датчик перемещения. Датчик, используемый в области измерений ионизирующих излучений, называют детектором.

К основным характеристикам первичных измерительных преобразователей относятся:

- **Входная величина**, воспринимаемая и преобразуемая датчиком;
- **Выходная величина**, используемая для передачи информации; она обычно модулируется по амплитуде, по временному признаку (частота, фаза и др.), по кодовому признаку, а также по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи);
- **Статическая характеристика датчика**. Для каждого измерительного преобразователя можно установить связь между выходной и входной величинами:

$$Y = f ( X ).$$

Математическое или графическое описание этой связи называется функцией преобразования измерительного преобразователя (или для датчика в целом - функцией преобразования датчика).

Отношение изменения выходной величины  $\Delta Y$  к соответствующему изменению входной величины  $\Delta X$  называется **чувствительностью** датчика:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

В общем случае, если функция преобразования **нелинейна**, отношение изменения выходной величины к соответствующему изменению входной величины для любого  $X_i$  определяется **коэффициентом преобразования**:

$$K_i = \Delta Y_i / \Delta X_i,$$

А чувствительность, в свою очередь является функцией входной величины.

Если зависимость между выходной и входной величинами является линейной, то чувствительность преобразователя не зависит от входной величины:

$$Y = SX.$$

В этом случае чувствительность и коэффициент преобразования равны, поэтому для линейных датчиков используют как термин «чувствительность», так и термин «коэффициент преобразования».

Понятие перемещения относится к двум и более телам. Определить перемещение одного тела, не рассматривая при этом другого, невозможно. Всегда надо рассматривать систему тел. Тело, от которого непосредственно производится измерение перемещения, называется телом отсчета, и считается неподвижным. Можно определять точку отсчета в какой-то нулевой момент, после которого и надо измерить перемещение. Таким образом, перемещение можно определить как, расстояние на котором оказалось данное тело относительно тела или точки отсчета через определенное время. Тело может двигаться в разных направлениях от тела отсчета и по разной траектории. Линейное перемещение – это длина прямой от начальной до конечной точки перемещения. Траектория движения может быть любой.

Часто в течение какого-то технологического процесса необходимо точно измерить перемещение объекта, его смещение. Для автоматизации этих измерений удобно использовать датчики, которые преобразуют линейное перемещение на входе в электрическую величину на выходе. Датчики линейных перемещений можно классифицировать по методу преобразования входной величины в выходную. Датчики линейных перемещений определяют положение линейной оси без дополнительных механических передаточных элементов. Если определение положения производится при помощи датчика линейного перемещения, то контур регулирования охватывает механику приводов. Таким образом, датчиком линейного перемещения определяется ошибка передачи механики оси и компенсируется в управляющей электронике. Данный способ помогает исключить целый ряд источников погрешностей: ошибка

позиционирования, вызванная нагревом шарико-винтовой пары (ШВП), ошибка, вызванная наличием зазоров в ШВП и кинематическая ошибка, вызванная позиционной ошибкой ШВП. Для станков с высокими требованиями к точности позиционирования и к скорости обработки использование линейных датчиков является необходимым.

### **Классификация датчиков линейного перемещения**

Датчики перемещения бывают:

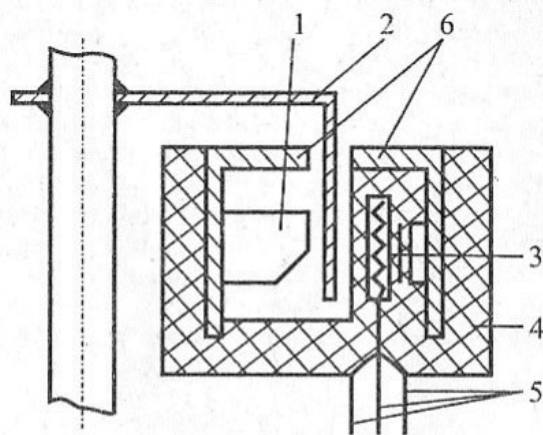
- емкостные;
- оптические;
- индуктивные;
- вихретоковые;
- ультразвуковые;
- магниторезистивные;
- датчики на основе эффекта Холла;
- магнитострикционные;
- потенциометрические.

Основными типами датчиков являются:

1. емкостные;
2. индуктивные;
3. резистивные.

Принцип работы датчика на основе эффекта Холла

Датчики Холла имеют, как правило, щелевую конструкцию. На одной из сторон щели располагается полупроводник, по нему протекает электрически ток, а на противоположной щели расположен постоянный магнит. Когда ток протекает в магнитном поле, на него действует сила, если при этом в магнитное поле поместить полупроводниковую пластинку, то на других сторонах пластинки возникнет разность потенциалов. Устройство датчика Холла представлен на рисунке 1.



Устройство датчика Холла:  
 1 - постоянный магнит, 2 - ротор,  
 3 - микросхема,  
 4 - пластмассовый корпус, 5 - выводы,  
 6 - магнитопроводы.

Рисунок 1- Устройство датчика Холла

В зазоре между пластинкой и магнитом находится экран. Экран служит для замыкания силовых линий. Если экран убрать, то разность потенциалов на пластинке будет, сниматься. Если экран находится в зазоре, то силовые линии будут, замыкаются через экран. Ну а при прохождении экрана (экран – лопасть ротора) через зазор то индукция будет нулевая на интегральной микросхеме, а напряжение появится на выходе.

Работа датчика Холла позволяет применять его в виде регистрирующего устройства без механического контакта с механизмом находящемся в движении, что увеличивает его моторесурс по сравнению с другими похожими устройствами

## Практическая часть

### *Описание измерительной системы*

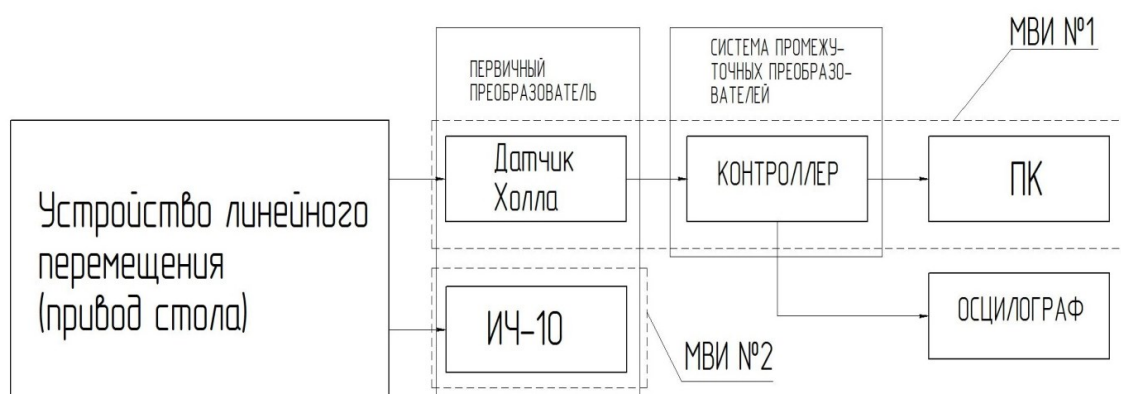


Рисунок 2 – Структура модуля контроля линейного перемещения

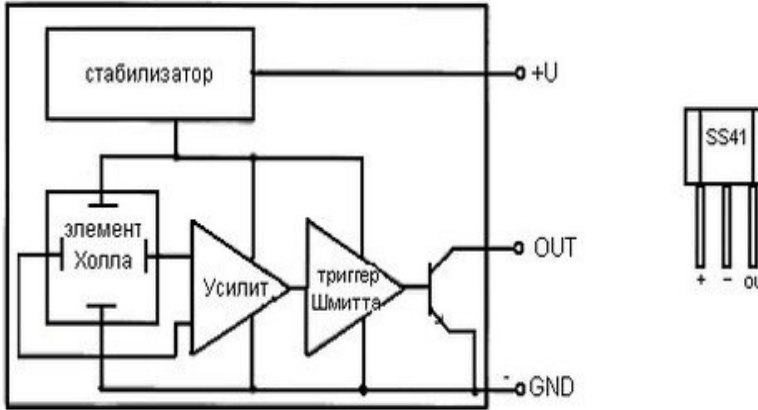

На схеме, представленной на рисунке 2, показаны:

- устройство линейного перемещения (привод стола), выполняющий функцию создания линейного перемещения;
- датчик Холла SS495A (МВИ №1);
- ИЧ-10 (МВИ №2);
- контроллер, преобразующий сигнал в форму удобную для обработки на ПК (компьютер);
- осциллограф RIGOL DS1052E, выполняющий функцию исследования характеристик различных сигналов.

Основные характеристики датчика Холла SS495A и прибора ИЧ – 10

Основные характеристики датчика Холла SS495A и прибора ИЧ – 10 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики датчика Холла SS495A и прибора ИЧ – 10

Датчика Холла SS495A		ИЧ-10	
			
диапазон рабочих величин магнитного потока, Гс	$\pm 670$	верхний предел измерения, мм	10
полярность датчика	биполярен	нижний предел измерения, мм	0
напряжение питания U, В	4,5-10,5	размах показаний индикатора для диапазона измерения, мкм	3
максимальное выходное напряжение, В	U - 0,4	вариация показаний индикатора для диапазона измерения, мкм	2
чувствительность, мВ/Гс	3,125	наибольшая разность погрешностей, мм	2
потребляемый ток, мА	8,7	наибольшее измерительное усилие при прямом ходе, Н	1,5
диапазон рабочих температур	- 40...+150		
температурная погрешность, %/°C	$\pm 0,06$		

### **Порядок выполнения работы:**

1. Включить модуль контроля линейного перемещения;
2. Установить стол привода в начальное положение:
  - магнит примыкает торцом к датчику Холла;
  - ИЧ-10 устанавливается с обратной стороны стола привода относительно датчика Холла (рис. 3).

Боковой вид



Вид сверху



Рисунок 2 – Установка датчика Холла и ИЧ-10

3. Зафиксировать и записать в таблицу результаты измерений в контрольных точках:

- 0,1...2 мм, шаг 0,1 мм;
- 2...10 мм, шаг 0,5 мм.

Таблица 2 – Результаты измерений

Измеряемый параметр	Контрольные точки, $x_{эт}$ , мм							
	0	0,1	0,2	0,3	...	...	...	10
Условные единицы преобразования								
Амплитуда, В								

4. Построить графики зависимости:

- условных единиц преобразования от перемещения;
- условных амплитуды сигнала от перемещения.

5. Определить интервалы линейной зависимости условных единиц преобразования от перемещения. Рассчитать для каждой точки в определенном интервале значения результатов измерений в миллиметрах:

$$X_i = U_i / U_{0,1cp},$$

где  $U_i$  – измеренное значение в условных единицах преобразования,  
 $U_{0,1cp}$  – среднее значение соответствующее 0,1 мм для линейного интервала  
 $U_i$  в условных единицах преобразования.

6. Провести сравнительный анализ результатов серии измерений, который включает:

1) оценку среднего квадратического отклонения для каждой контрольной точки (КТ):  $\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \Sigma(x_i - x_{эт})^2}$ ;

2) характеристику линейности/нелинейности функции преобразования датчика (измерительного преобразователя), определив чувствительность датчика (измерительного преобразователя). В случае нелинейности определить линейный интервал и чувствительность датчика в его зоне;

7. Сделать выводы по полученным данным;

8. Оформить отчет.

#### **Содержание отчета:**

1. Цели и задачи лабораторной работы.
2. Описание измерительной установки.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Графики зависимостей, расчеты  $U_{0,1cp}$ , среднего квадратического отклонения, определение линейности функции преобразования и чувствительности измерительного преобразователя.

5. Вывод.



Лабораторная работа № 6  
**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВОГО  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**

**Цель:**

- Ознакомиться с принципами работы и устройством основных типов преобразователей углового перемещения.
- Практически ознакомиться с работой преобразователей углового перемещения на примере емкостного датчика.

**Задачи:**

- Изучить теоретический материал.
- Провести эксперимент, демонстрирующий преобразование углового перемещения в электрический сигнал.
- Исследовать измерительные сигналы в устройстве для оценки углового перемещения на базе емкостного датчика.

**Теоретическая часть**

**Измерительный преобразователь** – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

**Измерительная цепь** – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода. Измерительную цепь измерительной системы называют **измерительным каналом**.

**Чувствительный элемент** – это часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал.

**Датчик** – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию).

[К началу](#)

Примеры: датчик температуры, датчик силы, датчик перемещения. Датчик, используемый в области измерений ионизирующих излучений, называют детектором.

К основным характеристикам первичных измерительных преобразователей относятся:

- **Входная величина**, воспринимаемая и преобразуемая датчиком;
- **Выходная величина**, используемая для передачи информации; она обычно модулируется по амплитуде, по временному признаку (частота, фаза и др.), по кодовому признаку, а также по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи);
- **Статическая характеристика датчика**. Для каждого измерительного преобразователя можно установить связь между выходной и входной величинами:

$$Y = f ( X ).$$

Математическое или графическое описание этой связи называется функцией преобразования измерительного преобразователя (или для датчика в целом – функцией преобразования датчика).

Отношение изменения выходной величины  $\Delta Y$  к соответствующему изменению входной величины  $\Delta X$  называется **чувствительностью** датчика:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

В общем случае, если функция преобразования **нелинейна**, отношение изменения выходной величины к соответствующему изменению входной величины для любого  $X_i$  определяется **коэффициентом преобразования**:

$$K_i = \Delta Y_i / \Delta X_i,$$

А чувствительность является функцией входной величины.

Если зависимость между выходной и входной величинами является линейной, то чувствительность преобразователя не зависит от входной величины:

$$Y = SX.$$

В этом случае чувствительность и коэффициент преобразования равны, поэтому для линейных датчиков используют как термин «чувствительность», так и термин «коэффициент преобразования».

### **Классификация датчиков углового перемещения**

Датчики угла бывают:

- емкостные;
- оптические;
- индуктивные;
- вихретоковые;
- резисторные;
- трансформаторные и др.

Основными типами датчиков являются:

1. емкостные;
2. индуктивные;
3. резистивные.

Емкостные преобразователи являются параметрическими преобразователями. Используемый физический эффект – изменение емкости конденсатора под действием измеряемой физической величины.

**Емкостным датчиком** называют преобразователь **параметрического** типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкостного сопротивления.

Обычно емкостный датчик представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, одна из обкладок которого перемещается под действием входной величины, вызывая изменение емкости. Обкладкой конденсатора в некоторых случаях может служить и сам контролируемый объект.

Используются в системах регулирования и управления в различных областях, например, для контроля линейных и угловых перемещений, давления, заполнения резервуаров, как конечные выключатели в технологическом оборудовании, в системах сигнализации и т.д. Широкое распространение получили датчики приближения (присутствия).

**Преимущества емкостных датчиков** по сравнению с датчиками других типов:

- простота изготовления, использование недорогих материалов для производства; - малые габариты и вес; - низкое потребление энергии; - высокая чувствительность;

- отсутствие контактов (в некоторых случаях – один токосъем);
- долгий срок эксплуатации;
- потребность весьма малых усилий для перемещения подвижной части емкостного датчика;

- простота приспособления формы датчика к различным задачам и конструкциям.

#### **Недостатки емкостных датчиков:**

- при негерметичном исполнении высокая чувствительность к изменениям параметров окружающей среды, например, пыли, коррозии, влажности, ионизирующей радиации;

- высокие требования к экранировке деталей;
- необходимость работы на повышенной (по сравнению с 50 Гц) частоте.

**Переменными факторами** при использовании емкостных датчиков могут быть:

- диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$ ;

- площадь перекрытия обкладок  $S$ ;

расстояние между обкладками  $d$ .

## Практическая часть

### *Описание измерительной системы*

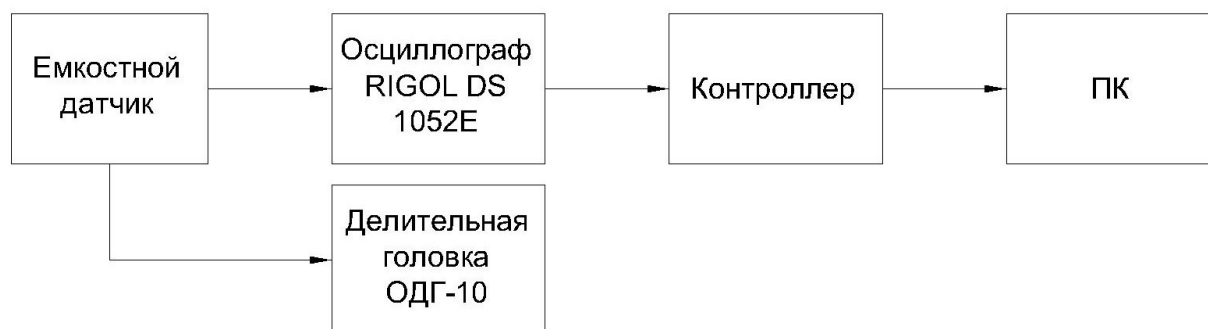


Рисунок 1 – Структура модуля контроля углового перемещения

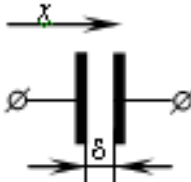
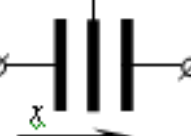
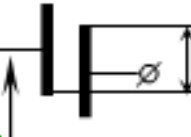

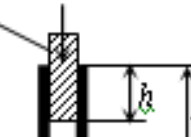

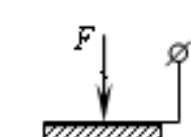
В лабораторной работе используется конденсатор переменной емкости, в котором изменяется площадь перекрытия пластин при повороте подвижных пластин относительно неподвижных. Устройство показано на рис.2.



Рисунок 2 – Емкостный преобразователь углового положения (конденсатор переменной емкости)

Принцип действия применяемого в лабораторной работе емкостного преобразователя углового положения, а также иных емкостных преобразователей представлен в табл. 1

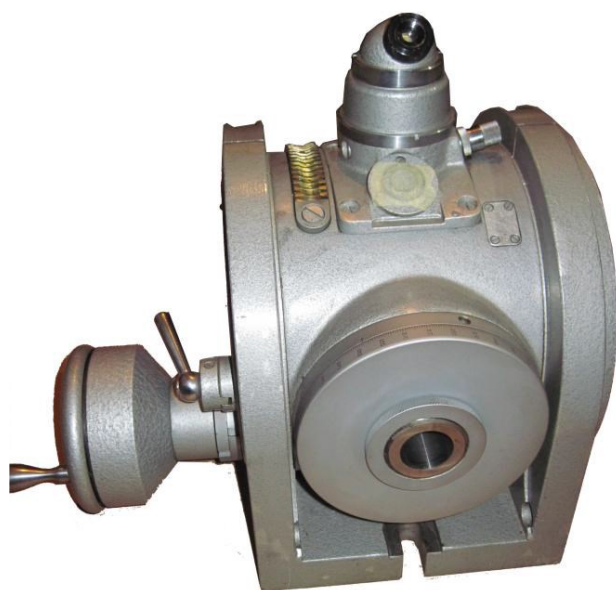
Таблица 1 – Емкостного преобразователя углового положения

Тип датчика	Схема	Основные соотношения
Датчик с изменением зазора.		$C = \epsilon S \frac{1}{\delta}$
Дифференциальный датчик с изменением зазора.		$C = \epsilon S \frac{1}{\delta}$
Датчик с изменением площади зазора.		$C = \frac{\epsilon}{\delta} S$
Дифференциальный датчик с изменением площади зазора.		$C = \frac{\epsilon}{\delta} S$
Датчик с изменением диэлектрической проницаемости.		
		
Датчик и изменением диэлектрической проницаемости вещества за счет деформации		$C = \frac{b}{\delta} [H \epsilon_0 + h(\epsilon - \epsilon_0)]$

## ОПТИЧЕСКАЯ ДЕЛИТЕЛЬНАЯ ГОЛОВКА ОДГ-10

### Основные технические характеристики:

1. Цена деления шкалы лимба –  $1^\circ$ .
2. Линейная величина деления шкалы лимба 0,8 мм.
3. Цена деления окулярной шкалы –  $10'$ .
4. Гарантируемая точность оптической делительной головки при измерительных работах –  $20''$ .
5. Предел поворота оси шпинделя в вертикальной плоскости -  $90^\circ$ .
6. Высота центров – 130 мм.
7. Вес головки и задней бабки – 76 кг.
8. Посадочное отверстие шпинделя - конус Морзе №4.
9. Увеличение отсчетного микроскопа – 60х.



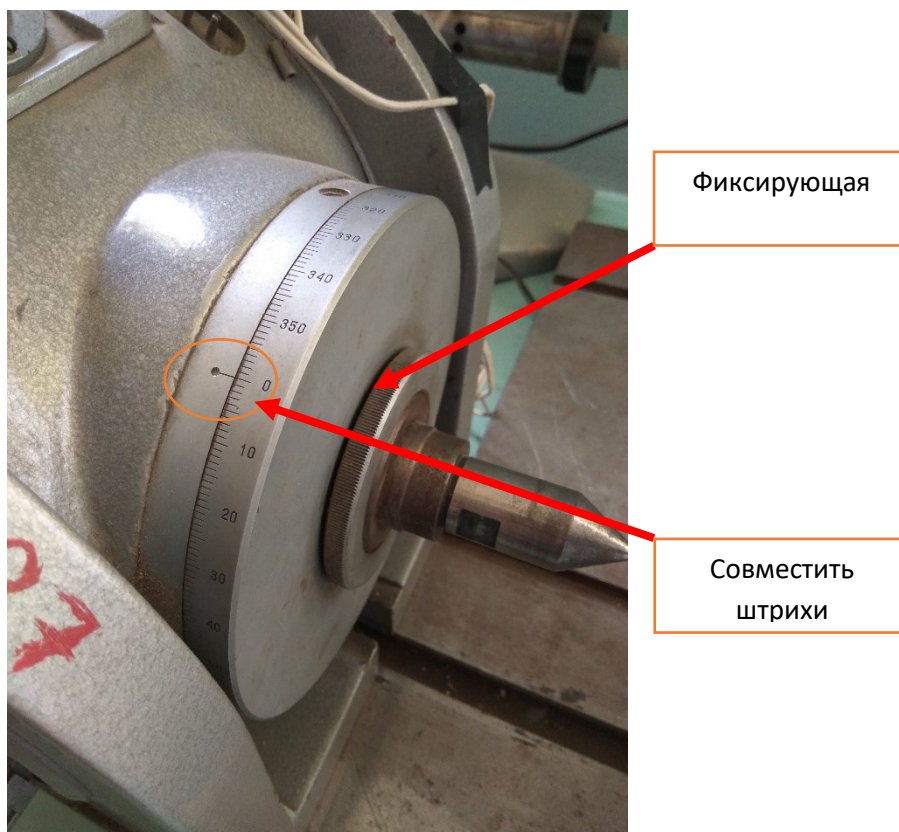
Головки представляют собой высокоточные измерительные приборы с отсчетным устройством проекционного типа. Принцип действия головок заключается в одновременном вращении вокруг одной и той же оси угломерного лимба и закрепленного проверяемого изделия. Такой осью является шпиндель головки, на котором жестко закреплен угломерный лимб и устанавливается проверяемое изделие.

Свет от источника излучения через гибкие световоды освещает диаметрально противоположные штрихи лимба. Лимб имеет деления через  $10'$  с

оцифровкой каждого штриха в градусах и десятках минут. Например: 232°2, 232°3 и т.д.

### ***Порядок выполнения работы:***

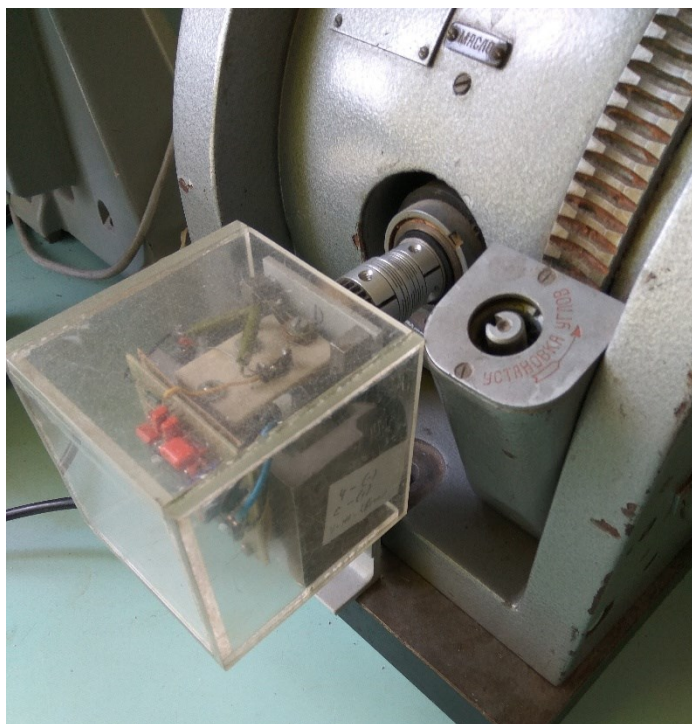
1. Включить модуль контроля углового перемещения;
2. Присоединить световод к головке, подключить разъем световода к элементу питания.
3. Установить в начальное положение шкалу прибора (оптический лимб на шпинделе и вспомогательный лимб грубой настройки). Для оптического лимба на шпинделе необходимо вращением маховика установить нулевое положение секундной шкалы и, вращая шпиндель, установить нулевое положение лимба, т.е. совместить штрихи 0° и 180° на линии раздела в окуляре. Для настройки на ноль вспомогательного лимба грубой настройки необходимо открутить фиксирующую гайку и установить ноль напротив штриха, вращая сам лимб.



4. Установить в начальное положение емкостной датчик. Для этого необходимо повернуть чувствительный элемент датчика до нулевого положения (отображается в ПО) и установить его в отверстие вала шпинделя с торцевой (обратной) стороны корпуса головки.

[К началу](#)





5. Вращая маховик головки изменять угол на  $10^\circ$ . Зафиксировать и записать в таблицу результаты измерений в контрольных точках:

Таблица 2 – Результаты измерений

Параметр	Контрольные точки, $x_{ЭТ}$							
	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	...	...	...	$330^\circ$
Угол (емкостной датчик), $x_i$								
Амплитуда сигнала, В								

6. Построить графики зависимости угла поворота от амплитуды сигнала.

7. Провести сравнительный анализ результатов серии измерений, который включает:

1) оценку среднего квадратического отклонения для каждой контрольной

точки (КТ): 
$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \Sigma (x_i - x_{ЭТ})^2};$$

2) характеристику линейности/нелинейности функции преобразования датчика (измерительного преобразователя), определив чувствительность датчика (измерительного преобразователя). В случае нелинейности определить линейный интервал и чувствительность датчика в его зоне;

[К началу](#)

8 Сделать выводы по полученным данным;

9. Оформить отчет.

**Содержание отчета:**

1. Цели и задачи лабораторной работы.
2. Описание измерительной установки.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Графики зависимости, расчет среднего квадратического отклонения и определение линейности функции преобразования и чувствительности измерительного преобразователя.
5. Вывод.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

### Цель:

- Ознакомиться с принципами работы и устройством основных типов оптоэлектронных преобразователей.
- Практически ознакомиться с работой оптоэлектронных преобразователей на примере оптопары открытого типа.

### Задачи:

- Изучить теоретический материал.
- Провести эксперимент, демонстрирующий обратимость фотоэффекта на примере светоизлучающих фотодиодов.
- Исследовать измерительные сигналы в устройстве для оценки частоты вращения роторной системы на базе фотодиодной оптопары открытого типа.

### Теоретическая часть

**Измерительный преобразователь** – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

**Измерительная цепь** – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода. Измерительную цепь измерительной системы называют **измерительным каналом**.

**Чувствительный элемент** – это часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал.

**Датчик** – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию).

[К началу](#)

Примеры: датчик температуры, датчик силы, датчик перемещения. Датчик, используемый в области измерений ионизирующих излучений, называют детектором.

К основным характеристикам первичных измерительных преобразователей относятся:

- **Входная величина**, воспринимаемая и преобразуемая датчиком;
- **Выходная величина**, используемая для передачи информации; она обычно модулируется по амплитуде, по временному признаку (частота, фаза и др.), по кодовому признаку, а также по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи);
- **Статическая характеристика датчика**. Для каждого измерительного преобразователя можно установить связь между выходной и входной величинами:

$$Y = f ( X ).$$

Математическое или графическое описание этой связи называется функцией преобразования измерительного преобразователя (или для датчика в целом – функцией преобразования датчика).

Отношение изменения выходной величины  $\Delta Y$  к соответствующему изменению входной величины  $\Delta X$  называется **чувствительностью** датчика:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

В общем случае, если функция преобразования **нелинейна**, отношение изменения выходной величины к соответствующему изменению входной величины для любого  $X_i$  определяется **коэффициентом преобразования**:

$$K_i = \Delta Y_i / \Delta X_i,$$

А чувствительность является функцией входной величины.

Если зависимость между выходной и входной величинами является линейной, то чувствительность преобразователя не зависит от входной величины:

$$Y = SX.$$

В этом случае чувствительность и коэффициент преобразования равны, поэтому для линейных датчиков используют как термин «чувствительность», так и термин «коэффициент преобразования».

Оптоэлектронный прибор представляет собой радиоэлектронное устройство, предназначенное для генерации, приема и преобразования световых потоков с целью передачи информации. Оптопара является разновидностью оптоэлектронного прибора, практическая реализация которой осуществляется в виде неразъемной конструкции, содержащей гальванически связанные излучатели и приёмники световых излучений. В качестве генераторов света используются светодиоды и полупроводниковые лазеры, а приемников – фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и т.д. По типу преобразований сигналов оптроны разделяются на следующие основные группы (рис.1).

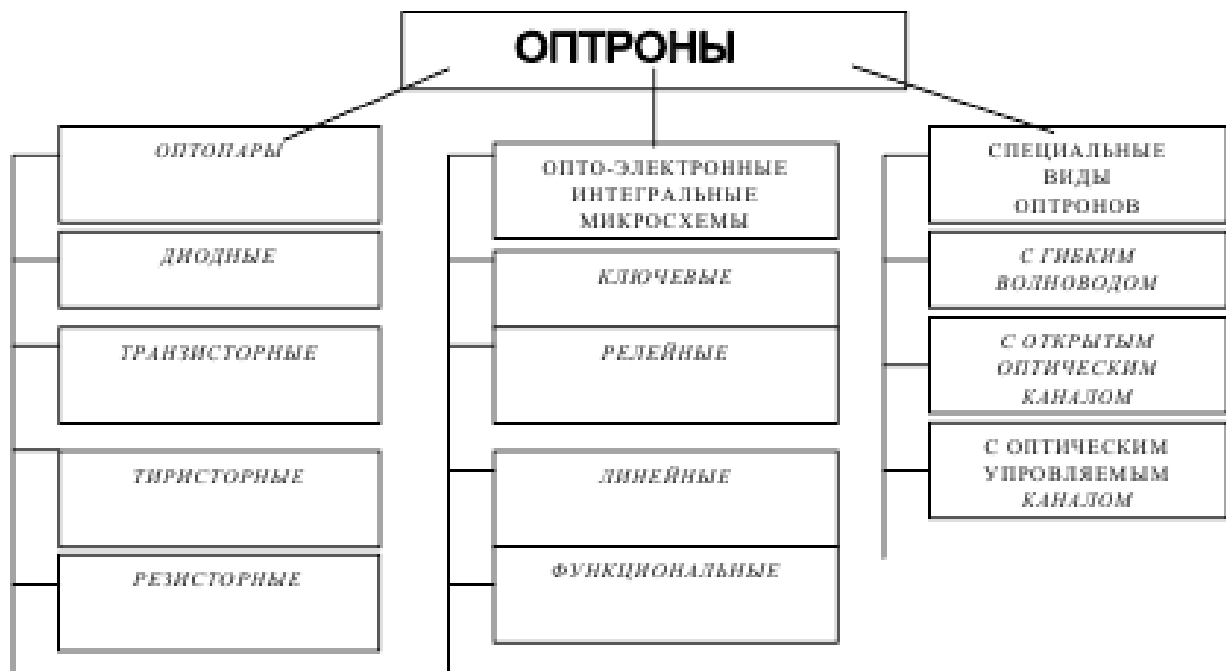


Рисунок 1 – Классификация оптопар, используемых в радиоэлектронике и компьютерной технике

Связи между элементами оптопары могут быть прямыми или обратными, положительными или отрицательными, причем, если это необходимо одна из связей (электрическая или оптическая) может отсутствовать (рис. 2).

[К началу](#)

Иногда в конструкцию оптопары встраивают дополнительные микроэлектронные и оптические элементы. И тогда конструктивно и функционально такие приборы существенно отличаются от параметров элементарной оптопары.

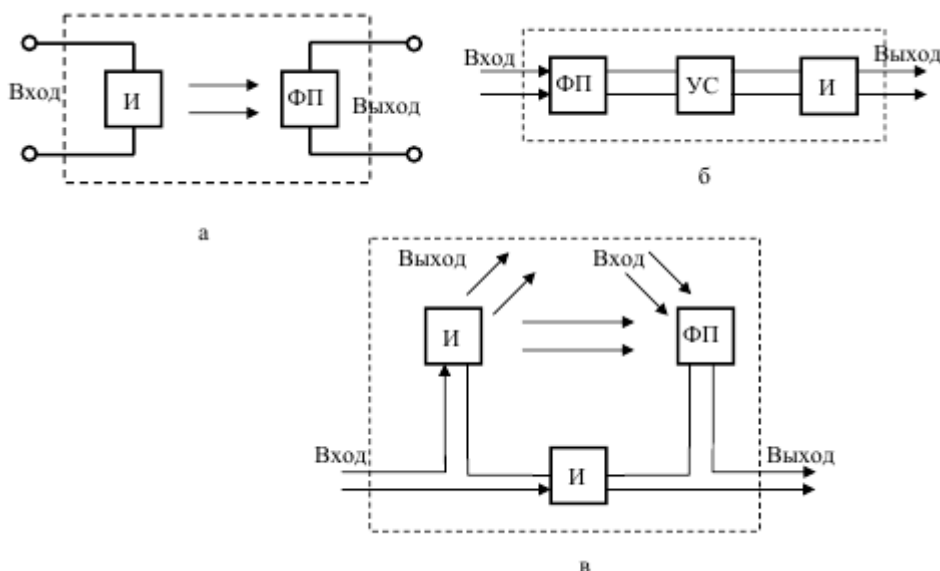


Рисунок 2 – Электрические и оптические связи излучателя (И), фотоприёмника (ФП) и электронное устройство связи, включающее схемы питания (И) и ФП (УС): а – оптопара для электрической развязки входного и выходного сигналов; б - оптрон с оптическими входом и выходом; в – регенеративный оптрон

Работа оптоэлектронных приборов основана на электронно-фотонных процессах получения, передачи и хранения информации.

Простейшим оптоэлектронным прибором является оптоэлектронная пара, или оптрон. Принцип действия оптрона, состоящего из источника излучения, иммерсионной среды (световода) и фотоприемника, основан на преобразовании электрического сигнала в оптический, а затем снова в электрический.

Оптроны как функциональные приборы обладают следующими преимуществами перед обычными радиоэлементами:

- полной гальванической развязкой «вход – выход» (сопротивление изоляции превышает  $10^{12} - 10^{14}$  Ом);

- абсолютной помехозащищенностью в канале передачи информации (носителями информации являются электрически нейтральные частицы – фотоны);

- однонаправленностью потока информации, которая связана с особенностями распространения света;

- широкополосностью из-за высокой частоты оптических колебаний,

- достаточным быстродействием (единицы наносекунд);

- высоким пробивным напряжением (десятки киловольт);

- малым уровнем шумов;

- хорошей механической прочностью.

По выполняемым функциям оптрон можно сравнивать с трансформатором (элементом связи) при реле (ключом).

В оптронных приборах применяют полупроводниковые источники излучения – светоизлучающие диоды, изготавливаемые из материалов соединений группы  $A^{III} B^V$ , среди которых наиболее перспективны фосфид и арсенид галлия. Спектр их излучения лежит в области видимого и ближнего инфракрасного излучения (0,5 – 0,98 мкм). Светоизлучающие диоды на основе фосфида галлия имеют красный и зеленый цвет свечения. Перспективны светодиоды из карбида кремния, обладающие желтым цветом свечения и работающие при повышенных температурах, влажности и в агрессивных средах.

Светодиоды, излучающие свет в видимом диапазоне спектра, используют в электронных часах и микрокалькуляторах.

Светоизлучающие диоды характеризуются спектральным составом излучения, который достаточно широк, диаграммой направленности; квантовой эффективностью, определяемой отношением числа испускаемых квантов света к количеству прошедших через p-n-переход электронов; мощностью (при невидимом излучении) и яркостью (при видимом излучении); вольт-амперными, люмен-амперными и ватт-амперными характеристиками; быстродействием (нарастанием и спадом электролюминесценции при импульсном возбуждении),

рабочим диапазоном температур. При повышении рабочей температуры яркость светодиода падает и снижается мощность излучения.

**Фоторезисторы** (фотосопротивление) — полупроводниковый прибор, который изменяет свою электрическую проводимость в зависимости от интенсивности и спектрального состава падающих на него лучей.

Поглощение лучистой энергии полупроводником, из которого состоит фоторезистор, вызывает ионизацию атомов и увеличение числа свободных носителей заряда электронов и дырок, что вызывает уменьшение его сопротивления.

Фоторезисторы имеют высокую чувствительность к излучению в самом широком диапазоне - от инфракрасной до рентгеновской области спектра, причем сопротивление их может меняться на несколько порядков. Фоторезисторам присущи высокая стабильность во времени, они имеют небольшие габариты и выпускаются на различные номиналы сопротивлений. Наибольшее распространение получили фоторезисторы, изготовленные из сернистого свинца, сернистого кадмия, селенистого кадмия.

Фоторезистор (рис. 1) представляет собой стеклянную пластинку 1, на которую путем испарения в вакууме нанесен тонкий слой полупроводника 2, а по краям расположены два металлических электрода 3. Полупроводниковый слой покрывается прозрачным лаком для защиты от влаги.

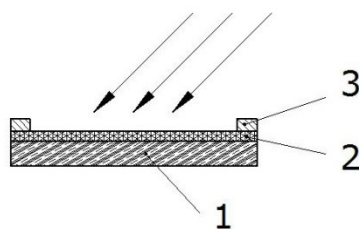


Рисунок 1 – Устройство фоторезистора

В зависимости от назначения фоторезисторы имеют различное конструктивное оформление. Они могут быть без корпусными – полупроводник на стеклянном основании с ток несущими выводами (рис. 2,а), в других случаях



фоторезистор имеет пластмассовый или металлический корпус (рис. 2,б).  
Условное обозначение фоторезистора на схемах приведено на рис. 2, в.



Рисунок 2 – Конструктивное устройство и условное обозначение фоторезисторов

В **фотоэлементах** под действием падающего света возникает электродвижущая сила (фото ЭДС) или электрический ток (фототок). Фотоэлементы служат преобразователями оптического излучения в электрические сигналы. Существуют электровакуумные и полупроводниковые фотоэлементы.

Очень широко используются полупроводниковые фотоэлементы (рис.3). Их действие основано на внутреннем фотоэффекте. Под действием оптического излучения возникает фото ЭДС и при подключении фотоэлемента к внешней электрической цепи через сопротивление нагрузки  $R_n$  протекает электрический ток, пропорциональный световому потоку. Для изготовления фотоэлементов используют германий (чистый или легированный примесями золота, меди или цинка), кремний и др.

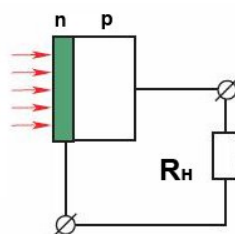


Рисунок 3 – Полупроводниковый фотоэлемент

Полупроводниковые фотоэлементы используют, например, для прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию – в солнечных батареях (напр., на космических станциях), в фотоэлектрических генераторах.

### **Основные параметры фотоэлемента.**

Световая (интегральная) чувствительность ( $S$ ) – отношение фототока к вызывающему его световому потоку. У полупроводниковых фотоэлементов определяют при короткозамкнутых выводах. Для определения  $S$  используют, как правило, калиброванные источники света (напр., лампу накаливания с воспроизводимым значением цветовой температуры нити, обычно равным 2860 К).

Спектральная чувствительность ( $Sl$ ) – отношение фототока к вызывающему его лучистому потоку с длиной волны  $\lambda$ . У кремниевых фотоэлементов диапазон спектральной чувствительности находится в области спектра 400...1100 нм, у германиевых – 500...2000 нм.

**Фото ЭДС** кремниевого фотоэлемента, освещаемого лампой накаливания в расчёте на 1 см<sup>2</sup> освещаемой поверхности, может достигать несколько десятых В.

**Фотодиод** – полупроводниковый диод, в котором используется зависимость его характеристики от освещенности (рис. 4). Он имеет два электрода, разделенные р-п-переходом (рис. 4, а). Обозначения фотодиода показано на рис. 4, б. Фотодиод может работать как с внешним источником питания – фото-преобразовательный режим, так и без него – генераторный режим (рис. 4, в).

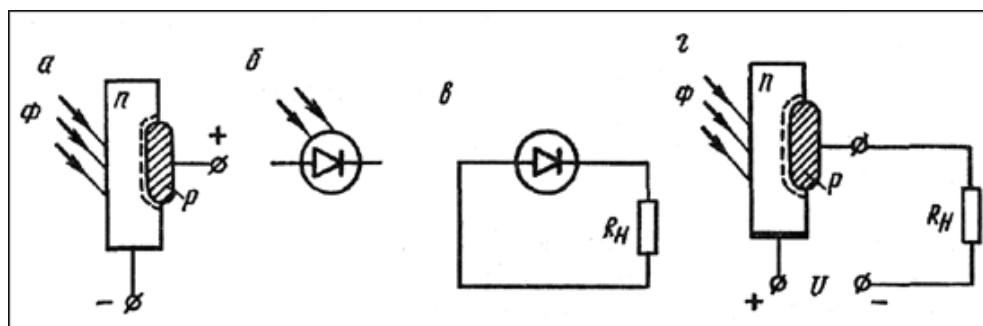


Рисунок 4 – Фотодиод: устройство, обозначение, включение

При освещении фотодиода создаются дополнительные пары электрон-дырка, часть которых, перемещаясь, достигает р-п-перехода. Здесь под действием электрического поля р-п-перехода дырки переходят в р-область, а электроны остаются в п-области, так как они не могут преодолеть потенциального барьера. Происходит накопление дырок в р-области и электронов п-области. При этом между электродами устанавливается некоторая разность потенциалов, представляющая собой фото-эдс, которая может достигнуть 1 В. При подсоединении сопротивления нагрузки  $R_H$  в цепи пойдет ток. В фото-преобразовательном режиме (рис. 4, г) напряжение источника приложено в обратном направлении. При отсутствии освещения через фотодиод происходит темновой ток. При освещении возникают пары электрон-дырка. Дырки доходят до р-п-перехода и под действием его электрического поля переходят в р-область. Ток в цепи возрастает и появляется световой ток. Изменение тока в цепи, зависящее от освещенности диода, вызывает в нагрузке падение напряжения, пропорциональное величине светового потока, действующего на фотодиод. Фотодиод, работающий в режиме фото-преобразования, подобен фоторезистору, обладающему большей интегральной чувствительностью. У кремниевых диодов типа ФД-К1 она имеет значение 4...5, а у германиевых типа ФД-2 - 20...25 мА/лм. Темновой ток ФД-К1 составляет 1...3 мкА, а ФД-2 – 10 мкА.

**Светодиод** или светоизлучающий диод (англ. **LED** – Light-emitting diode) – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока.

[К началу](#)

Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра. Его спектральные характеристики зависят во многом от химического состава использованных в нём полупроводников.

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом (оптопара закрытого типа), чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода. Полупроводниковые приборы, использующие пары «светодиод – фотодиод», называются **оптронами** (рис. 5).

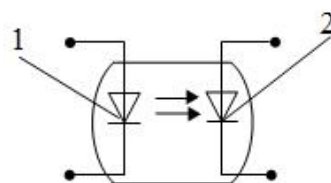


Рис. 5 – Оptron: 1 – светодиод, 2 – фотодиод

### *Обобщенная структурная схема оптрона*

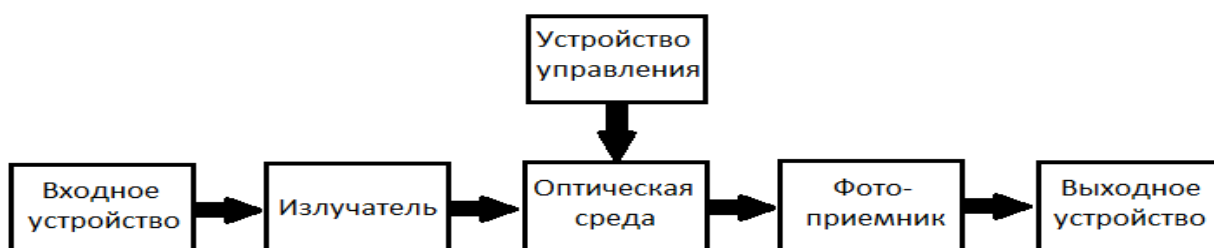


Рисунок 6 – Обобщенная структурная схема оптрона

В структурной схеме на рисунке 6 входное устройство служит для оптимизации рабочего режима излучателя (например, смещения светодиода на линейный участок ватт-амперной характеристики) и преобразования (усиления) внешнего сигнала. Входной блок должен обладать высоким КПД преобразования, высоким быстродействием, широким динамическим диапазоном допустимых входных токов (для линейных систем), малым значением "порогового" входного тока, при котором обеспечивается надежная передача информации по цепи.

Оптической среда - передача энергии оптического сигнала от излучателя к фотоприемнику, а также во многих случаях обеспечение механической целостности конструкции.

В фотоприемнике происходит "восстановление" информационного сигнала из оптического в электрический; при этом стремятся иметь высокую чувствительность и высокое быстродействие.

Наконец, выходное устройство призвано преобразовать сигнал фотоприемника в стандартную форму, удобную для воздействия на последующие за оптроном каскады. Практически обязательной функцией выходного устройства является усиление сигнала, так как потери после двойного преобразования очень значительны. Нередко функцию усиления выполняет и сам фотоприемник.

Общая структурная схема рисунок 6 реализуется в каждом конкретном приборе лишь частью блоков. В соответствии с этим выделяют три основные группы приборов оптронной техники; ранее названные оптопары (элементарные оптроны), использующие блоки светоизлучатель - оптическая среда - фотоприемник; оптоэлектронные (оптронные) микросхемы (оптопары с добавлением выходного, а иногда и входного устройства); специальные виды оптронов - приборы, функционально и конструктивно существенно отличающиеся от элементарных оптронов и оптоэлектронных ИС.

К контурным размерам оптрона предъявляются определенные требования по точности изготовления. Входные и выходные цепи в таких приборах оказываются электрически никак не связанными, поскольку передача сигнала осуществляется через оптическое излучение.

**Оптопара закрытого типа** устроена аналогично, за исключением того, что светодиод и фотодиод размещены не в закрытом корпусе, а в пространстве между ними может помещаться управляющая шторка, перекрывающая или открывающая световой поток от светодиода к фотодиоду. Используются оптопары открытого типа в датчиках положения (концевых выключателях),

датчиках линейных и угловых перемещений, измерителях частоты вращения и т.п.

## Практическая часть

### *Описание измерительной системы*

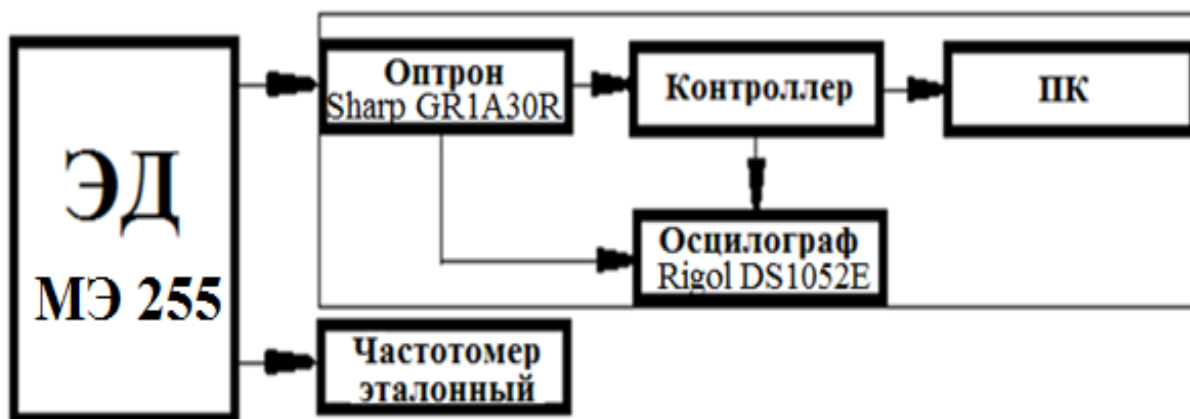


Рисунок 7 – Структура модуля контроля частот

На схеме, представленной на рисунке 7, показаны:

- двигатель МЭ 255 (ЭД), выполняющий функцию создания вращательного движения;
- оптрон Sharp GR1A30R, предназначенный для контроля вращательного движения;
- контроллер, преобразующий сигнал в форму удобную для обработки на ПК (компьютер);
- осциллограф RIGOL DS1052E, выполняющий функцию исследования характеристик различных сигналов;
- частотомер эталонный, выполняющий функцию воспроизведения эталонной частоты.

### Порядок выполнения работы:

1. Включить модуль контроля частоты;
2. С помощью регулятора частоты устанавливать требуемую частоту вращения;

[К началу](#)

3. Зафиксировать и записать в таблицу результаты измерений;

Таблица – Результаты измерений

Измеряемый параметр	Хэт							
	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	3300
Частота вращения $x$ , об/мин								
Амплитуда, В								
частота сигнала $f$ , Гц								

4. Повторить п. 2 и 3 еще два раза.

5. Построить графики зависимостей частот сигнала  $f$  от частоты вращения  $X_{эт}$  для каждой серии измерений;

6. Провести сравнительный анализ результатов каждой отдельной серии, который включает:

1) оценку размахов результатов измерений и оценку наличия тенденции изменения (построить диаграммы значений частоты вращения для каждой контрольной точки). При наличии явно выраженной тенденции оценить размах результатов  $R' = X_{\max} - X_{\min}$  (общий размах), затем на диаграмму нанести аппроксимирующую линию и оценить размах отклонений от аппроксимирующей линии  $R$ , складывая по модулю максимальные отклонения от нее с противоположными знаками.

2) оценку среднего квадратического отклонения для каждой контрольной

точки (КТ): 
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum (x_i - x_{\text{ср}})^2}$$

КТ1 = 500 об/мин, КТ2 = 1000 об/мин, КТ3 = 2000 об/мин, КТ4 = 3000 об/мин.

3) характеристику линейности/нелинейности функции преобразования датчика (измерительного преобразователя), определив чувствительность датчика (измерительного преобразователя). В случае нелинейности определить

линейный интервал и чувствительность датчика в его зоне:

$$S_i = Y_{\text{ср}}/X_{\text{эт}},$$

где  $Y_{\text{ср}} = 1/n * \sum f_i$ , Гц.

7. Сделать выводы по полученным данным;
8. Оформить отчет.

**Содержание отчета:**

1. Цели и задачи лабораторной работы.
2. Описание измерительной установки.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Графики зависимостей, оценки размахов, среднего квадратического отклонения, определения линейности функции преобразования и чувствительности измерительного преобразователя.
5. Вывод.



### III РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Контрольные вопросы к зачету и самостоятельной подготовке по учебной дисциплине «Анализ и преобразование измерительной информации»:

1. Измерительная информация. Измерительные системы: разновидности.
2. Измерительные сигналы. Физическая природа, разновидности, основные параметры.
3. Средства измерений. Классификация. метрологические характеристики.
4. Визуализация и измерения параметров электрических измерительных сигналов с помощью осциллографа.
5. Измерительный канал как совокупность измерительных преобразователей.
6. Измерительные преобразователи. Классификация.
7. Первичные измерительные преобразователи. Датчики. Характеристики.
8. Физические явления и принципы преобразования физических величин, лежащие в основе работы первичных измерительных преобразователей.
9. Генераторные и параметрические первичные измерительные преобразователи.
10. Мост Уитстона. Виды. Характеристики.
11. Мостовые схемы включения параметрических датчиков. Балансировка моста.
12. Модуляция и демодуляция сигналов как принцип передачи измерительной информации.
13. Основные виды модуляции. Достоинства и недостатки.
14. Тензорезистивные преобразователи. Принцип работы. Области применения. Схемы включения.
15. Первичные измерительные преобразователи температуры. Виды. Области применения.
16. Термопары. Принцип работы. Характеристики. Источники и компенсация погрешностей.

17. Термисторы и термометры сопротивления. Характеристики.
18. Оптоэлектронные преобразователи. Оптроны. Области применения.
19. Электромагнитные преобразователи. Виды. Принципы работы.
20. Линейные дифференциальные трансформаторы.
21. Бесконтактные индуктивные преобразователи.
22. Датчики Холла. Устройство и принцип работы.
23. Применение датчиков Холла.
24. Пьезоэлектрические преобразователи. Принцип работы. Области применения.
25. Емкостные датчики. Принцип работы. Области применения.
26. Датчики на основе MEMS-технологий. Области применения.
27. Масштабирующие преобразователи электрических сигналов. Виды, назначение, характеристики, погрешности преобразования сигнала.
28. Фильтрация электрических измерительных сигналов. Типы и назначение электрических фильтров. Области применения.
29. Амплитудно-частотные характеристики основных видов пассивных фильтров.
30. Аналого-цифровые преобразователи. Назначение. Основные характеристики.
31. Программируемые микроконтроллеры. Области использования. «Интеллектуальные» датчики.
32. Интерфейсы измерительно-информационных систем. Разновидности. Области использования.
33. Особенности метрологического обеспечения информационно-измерительных систем.

## **IV ВСПОМАГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ**

**Белорусский национальный технический университет**

### **АНАЛИЗ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности  
1-54 01 01-01 Метрология, стандартизация и сертификация  
(машиностроение и приборостроение)**

2020 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта  
ОСВО 1 – 54 01 01-01 - 2013.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

Ю.С.Коробко, доцент кафедры «Стандартизация, метрология и  
информационные системы» Белорусского национального технического  
университета, кандидат технических наук, доцент

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

В.Л.Гуревич, директор Белорусского государственного института метрологии,  
кандидат технических наук.

В.Л.Габец, доцент кафедры «Конструирование и производство приборов»  
Белорусского национального технического университета, кандидат технических  
наук, доцент.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа по учебной дисциплине «Анализ и преобразование измерительной информации» разработана для специальности 1-54 01 01-01 «Метрология, стандартизация и сертификация (машиностроение и приборостроение)».

Целью изучения учебной дисциплины является изучение структуры информационно-измерительных систем, принципов преобразования физических величин в измерительные сигналы, конструкций распространенных первичных измерительных преобразователей, современных методов преобразования измерительной информации, способов уменьшения погрешностей при преобразовании сигналов в информационно-измерительных системах.

Основными задачами преподавания учебной дисциплины являются: формирование знаний и приобретение навыков в областях теории преобразования физических величин, моделирования измерения как процесса, обеспечения достоверности оценки точности измерения.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин как: «Физика», «Математика», «Химия», «Электроника», «Физические основы измерений», «Автоматизация информационного обеспечения», «Теоретическая метрология» и т.д. Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для освоения последующих специальных дисциплин и дисциплин специализаций, связанных с проектированием и расчетом машин, механизмов, их деталей и узлов, таких как: контрольно-измерительные приборы и измерения, программно-технические комплексы средств автоматизации и др.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен:

**знать:**

- основные принципы действия первичных измерительных преобразователей физических величин в электрический сигнал;

- принципы построения систем преобразования измерительных сигналов;
- способы представления результатов измерений на выходе информационно- измерительной системы;
- методы уменьшения погрешностей преобразования измерительной информации;

**уметь:**

- определять тип и технические характеристики первичных измерительных преобразователей для задач измерений физических величин;
- осуществлять выбор измерительных преобразователей из числа серийно выпускаемых;
- выбирать оптимальную структуру информационно-измерительной системы для конкретных условий измерений;
- анализировать возможные источники возникновения и практически применять способы уменьшения погрешностей преобразования измерительной информации;

**владеть:**

- методами и средствами измерений;
- методами контроля и испытаний;
- методиками обработки и представления данных.

Освоение данной учебной дисциплины должно обеспечить формирование следующих компетенций:

- АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
- АК-3. Владеть исследовательскими навыками.
- АК-4. Уметь работать самостоятельно.
- СЛК-4. Владеть навыками здоровья сбережения.
- СЛК-6. Уметь работать в команде.
- ПК-1. Работать с юридической, нормативной, справочной литературой и трудовым законодательством.

[К началу](#)

- ПК-5. Взаимодействовать со специалистами смежных профилей.
- ПК-6. Оценивать и анализировать собранные данные, формировать корректные выводы.
- ПК-9. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.
- ПК-10. Владеть современными средствами телекоммуникаций.
- ПК-13. Проектировать и разрабатывать эффективные методы и средства измерений, контроля и испытаний, методики их аттестации, валидации и верификации, методы сбора, обработки и представления данных, основанных на принципах системного и процессного подходов.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено:

- для очной формы получения высшего образования всего 130 ч., из них аудиторных – 68 часа;

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
3	5	34	34	-	зачет

# **СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

## **Тема 1. Введение**

Роль дисциплины в системе подготовки специалистов. Измерительная информация – основные понятия и определения. Измерительные сигналы, их виды и типы. Обработка сигналов.

## **Тема 2. Измерительные системы**

Измерительные системы. Общие сведения. Структура информационно-измерительной системы. Измерительный канал. Измерительные преобразователи. Классификация, структурные схемы, способы соединения измерительных преобразователей. Метрологические и технические характеристики. Представление измерительного канала как совокупности измерительных преобразователей.

## **Тема 3. Первичные измерительные преобразователи**

Общие сведения. Физические явления и принципы преобразования физических величин, лежащие в основе работы первичных измерительных преобразователей. Классификация. Области применения. Основные параметры первичных измерительных преобразователей. Генераторные и параметрические преобразователи. Схемы включения первичных измерительных преобразователей: последовательная, параллельная, дифференциальная, логарифмическая, компенсационная. Источники погрешностей. Методы компенсации и минимизации погрешностей.

## **Тема 4. Первичные преобразователи для измерений различных физических величин**

Термоэлектрические преобразователи. Резистивные датчики температуры, терморезисторы, термопары, полупроводниковые датчики. Интегральные



датчики температуры. Источники погрешностей. Методы повышения точности измерений.

Оптические датчики. Оптопары открытого типа: щелевой оптрон, отражательный оптрон. Оптрон с закрытым оптическим каналом. Основные характеристики, области применения. Схемы включения. Особенности работы в различных частотных диапазонах. Источники погрешностей. Измерительные преобразователи на основе оптоволоконных систем.

Магниточувствительные измерительные преобразователи. Линейные дифференциальные трансформаторы. Преобразователи с переменным магнитным сопротивлением. Датчики Холла. Области применения. Разновидности. Схемы включения.

Резистивные измерительные преобразователи. Реостатные преобразователи. Конструкции, схемы включения. Тензорезисторы. Основные типы и особенности. Области использования. Конструкции измерительных преобразователей. Схемы включения тензорезисторов. Погрешности и способы их компенсации.

Емкостные измерительные преобразователи. Принципы действия и конструкции. Особенности применения, схемы включения. Погрешности и методы их компенсации. Пьезоэлектрические преобразователи. Кварц, пьезокерамика, конструкции датчиков. Конструкции датчиков. Погрешности.

Электромагнитные измерительные преобразователи. Индуктивные преобразователи. Принцип действия, конструкции, области применения. Характеристики измерительного сигнала, схемы включения преобразователей. Трансформаторные преобразователи. Индукционные преобразователи. Погрешности электромагнитных преобразователей, методы их минимизации.

Струнные датчики. Конструкции и применяемые материалы. Магнитные системы, способы возбуждения колебаний. Области использования. Схемы включения. Источники погрешностей.

Выбор первичных преобразователей применительно к решению конкретных измерительных задач.

[К началу](#)

## **Тема 5. Преобразование измерительных сигналов**

Задачи обработки измерительных сигналов. Аналоговые и цифровые сигналы. Масштабирующие и функциональные преобразователи. Нормирующие усилители. Сглаживание измерительных сигналов. Погрешности преобразования и методы их коррекции. Модуляция и демодуляция электрических сигналов. Подавление шумов. Электрические фильтры. Структуры фильтров, выбор фильтров в зависимости от характера измерительной задачи.

## **Тема 6. Аналоговые измерительные устройства**

Классификация. Структура и типовые узлы аналоговых измерительных устройств. Нормирование и анализ метрологических характеристик. Методы регулирования и экспериментальных исследований параметров аналоговых измерительных каналов. Современная элементная база для построения аналоговых устройств.

## **Тема 7. Цифровые измерительные устройства**

Основные узлы цифровых измерительных устройств. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование измерительных сигналов. Дискретизация во времени, квантование по уровню, кодирование. Устройства выборки-хранения, источники опорного напряжения. Типы АЦП, сравнение технических характеристик. Области применения, разновидности, функциональные схемы цифровых измерительных устройств. Анализ и нормирование метрологических характеристик.

## **Тема 8. Отображение и регистрация измерительной информации**

Способы и устройства визуализации измерительных сигналов, основные характеристики. Аналоговые показывающие приборы. Конструкции, технические характеристики. Осциллографические измерения. Семи-сегментные светодиодные индикаторы. Жидкокристаллические индикаторы и

мониторы. Кодирование сигналов. Регистрирующие устройства. Типы, основные особенности. Регистрация и визуализация измерительной информации с помощью компьютера. Программное обеспечение.

### **Тема 9. Интерфейсы измерительных устройств**

Виды и основные характеристики стандартных интерфейсов. Параллельные и последовательные интерфейсы. Выбор интерфейса в зависимости от решаемых задач. Линии связи.

Приборный интерфейс IEEE-488. Последовательный периферийный интерфейс токовая петля 4 – 20 мА. Подключение датчиков к сетям. Последовательный периферийный интерфейс IEEE 1451.2. Интерфейсы RS-232, RS-422, RS-485, I2C (TWI), UART, USB.

### **Тема 10. Преобразование и анализ измерительных сигналов во временной и частотной областях**

Характеристики спектров сигналов, методы измерения спектра. Основные процедуры анализа сигналов во временной области. Анализ сигналов в частотной области: характеристики спектров сигналов, методы измерения спектра. Аналоговые анализаторы спектра параллельного и последовательного типов. Вычислительные анализаторы спектра. Быстрое преобразование Фурье. Структура анализатора на основе быстрого преобразования Фурье.

### **Тема 11. Современные аппаратные и программные средства информационно-измерительных систем.**

Интеллектуальные измерительные преобразователи. Применение микроконтроллеров в системах сбора данных. Предварительная обработка измерительной информации с помощью микроконтроллеров. Построение информационных измерительных систем на основе интеллектуальных измерительных преобразователей. Современные серийно выпускаемые узлы и программное обеспечение.

[К началу](#)

## **Тема 12. Особенности метрологического контроля информационно-измерительных систем и их компонентов**

Основные принципы организации поверки информационно-измерительных систем. Поверка функциональных узлов и системы в целом. Особенности метрологического контроля разветвленных измерительных систем, содержащих большое число удаленных датчиков, а также систем передачи измерительной информации на большие расстояния.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы, занятия	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Ведение	2						
2	Измерительные системы	2						
3	Первичные измерительные преобразователи	2						
4	Первичные преобразователи для измерений различных физических величин.	8						
	Лабораторная работа № 1. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей температуры				4			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа № 2. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей линейного перемещения				4			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа № 3. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей углового перемещения				4			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа № 4. Исследование метрологических характеристик измерительных преобразователей частоты вращения				4			Защита лабораторной работы

5	Преобразование измерительных сигналов	4						
	Лабораторная работа № 5. Преобразование электрического сигнала в измерительном канале. Электрические фильтры				4			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа № 6. Преобразование электрического сигнала в измерительном канале. Детекторы				4			Защита лабораторной работы
6	Аналоговые измерительные устройства	2						
	Лабораторная работа № 7. Анализ метрологических характеристик осциллографа				4			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа № 8. Калибровка каналов осциллографа. исследование измерительных сигналов с помощью осциллографа				4			Защита лабораторной работы
7	Цифровые измерительные устройства	4						
8	Отображение и регистрация измерительной информации	2						
	Лабораторная работа № 9. Осциллографические методы исследования измерительной информации				2			Защита лабораторной работы
9	Интерфейсы измерительных устройств	2						
10	Преобразование и анализ измерительных сигналов во временной и частотной областях	2						
11	Современные аппаратные и программные средства информационно-измерительных систем	2						
12	Особенности метрологического контроля информационно-измерительных систем и их компонентов	2						
	Итого за семестр	34			34			зачет
	Всего аудиторных часов				68			

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Список литературы

#### Основная литература:

1. Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. – 89 с.: ил. 64. – ISBN 978-5-91646-188-6
2. Микроэлектронные измерительные преобразователи [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Б. Топильский. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 493 с.: ил.
3. Датчики электрических систем автоматического управления: учеб. пособие / М.В. Рогова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 88 с.

#### Дополнительная литература

1. Болл Стюарт Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. / Болл Стюарт Р. – М.: Издательский дом «Додэко – XXI», 2007. – 360 с.
2. Измерения в промышленности. Справочник: в 3-х кн. / Под ред. П.Профоса. Пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1990. – 2 кн.
3. Х. Харт. Введение в измерительную технику. Пер. с нем. – М.: Мир, 1999. – 391 с.
4. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства. Теория погрешностей, испытания, поверка. / Вострокнутов Н.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
5. Садчиков Д.А. Современные цифровые мультиметры. / Садчиков Д.А. – М.: Солон-Р, 2001. – 107 с.
6. Коломбет В.А. Микроэлектронные средства обработки сигналов. / Коломбет В.А. – М.: Радио и связь, 1991.
7. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП. Функционирование и параметры. Применение. / Федорков Б.Г., Телец В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

8. Морозов В.П. Микросхемы аналоговых вычислительных устройств. / Морозов В.П. – М.: СИТБТ, 2005.

9. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. / Бриндли К. – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 144 с.

### **Средства диагностики результатов учебной деятельности**

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- проведение текущих контрольных работ (заданий) по отдельным темам;
- защита отчетов по выполненным лабораторным работам и практическим занятиям;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- сдача зачета по дисциплине.

### **Тематика рефератов**

1. Анализ влияния электрических и электромагнитных полей на измерительный сигнал.
2. Анализ и исследование характеристик оптронов щелевого и отражательного типов.
3. Анализ и исследование характеристик интегральных температурных датчиков.
4. Анализ применения серийно выпускаемых датчиков Холла в информационно-измерительных системах.
5. Анализ применения бесконтактных индуктивных датчиков в информационно-измерительных системах.
6. Структуры и алгоритмы функционирования измерительных систем.
7. Компьютерные измерительные системы.
8. Измерительные роботы.



9. Приборы с фотоэлектрическими преобразователями.

### **Перечень контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы студентов**

1. Измерительная информация. Измерительные системы: разновидности.
2. Измерительные сигналы. Физическая природа, разновидности, основные параметры.
3. Средства измерений. Классификация. метрологические характеристики.
4. Визуализация и измерения параметров электрических измерительных сигналов с помощью осциллографа.
5. Измерительный канал как совокупность измерительных преобразователей.
6. Измерительные преобразователи. Классификация.
7. Первичные измерительные преобразователи. Датчики. Характеристики.
8. Физические явления и принципы преобразования физических величин, лежащие в основе работы первичных измерительных преобразователей.
9. Генераторные и параметрические первичные измерительные преобразователи.
10. Мост Уитстона. Виды. Характеристики.
11. Мостовые схемы включения параметрических датчиков. Балансировка моста.
12. Модуляция и демодуляция сигналов как принцип передачи измерительной информации.
13. Основные виды модуляции. Достоинства и недостатки.
14. Тензорезистивные преобразователи. Принцип работы. Области применения. Схемы включения.
15. Первичные измерительные преобразователи температуры. Виды. Области применения.

16. Термопары. Принцип работы. Характеристики. Источники и компенсация погрешностей.
17. Термисторы и термометры сопротивления. Характеристики.
18. Оптоэлектронные преобразователи. Оптроны. Области применения.
19. Электромагнитные преобразователи. Виды. Принципы работы.
20. Линейные дифференциальные трансформаторы.
21. Бесконтактные индуктивные преобразователи.
22. Датчики Холла. Устройство и принцип работы.
23. Применение датчиков Холла.
24. Пьезоэлектрические преобразователи. Принцип работы. Области применения.
25. Емкостные датчики. Принцип работы. Области применения.
26. Датчики на основе MEMS-технологий. Области применения.
27. Масштабирующие преобразователи электрических сигналов. Виды, назначение, характеристики, погрешности преобразования сигнала.
28. Фильтрация электрических измерительных сигналов. Типы и назначение электрических фильтров. Области применения.
29. Амплитудно-частотные характеристики основных видов пассивных фильтров.
30. Аналого-цифровые преобразователи. Назначение. Основные характеристики.
31. Программируемые микроконтроллеры. Области использования. «Интеллектуальные» датчики.
32. Интерфейсы измерительно-информационных систем. Разновидности. Области использования.
33. Особенности метрологического обеспечения информационно-измерительных систем.

## **Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов**

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- подготовка рефератов по индивидуальным темам, в том числе с использованием патентных материалов;
- подготовка рефератов по индивидуальным заданиям, в том числе разноуровневым заданиям.

### **Методы (технологии) обучения**

Основными методами (технологиями) обучения, отвечающими целям изучения дисциплины, являются:

- элементы проблемного обучения (проблемное изложение, вариативное изложение, частично-поисковый метод), реализуемые на лекционных занятиях;
- элементы учебно-исследовательской деятельности, творческого подхода, реализуемые на лабораторных работах и при самостоятельной работе.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

*Целью ЭУМК по дисциплине «Анализ и преобразование измерительной информации» является изучение теоретических основ обработки и преобразования измерительной информации, принципов построения различного рода измерительных преобразователей, используемых в измерительных приборах и измерительных системах для направления специальности 1 – 54 01 01 – 01 «Метрология, стандартизация и сертификация».*

*Особенностями структурирования и подачи учебного материала являются освоение и изучение следующих навыков и материалов:*

- изучить структуры, разновидности и характеристики измерительных систем;
- представлять измерительные системы как средства измерений, состоящих из различного рода измерительных преобразователей;
- изучить способы представления и методы обработки измерительной информации;
- научиться анализировать взаимосвязи между измерительными преобразователями, образующими измерительные каналы в измерительных системах, выявлять потенциальные источники потерь точности измерений;
- ознакомиться с принципами работы первичных преобразователей для измерений различных физических величин и выявления источников их погрешностей;
- ознакомиться с принципами работы преобразователей измерительных сигналов, входящих в измерительные приборы и выявления источников их погрешностей;
- ознакомиться с устройством и получение навыков работы с типовыми измерительными приборами, научиться определять погрешности измерений и представлять результаты измерений;
- научиться осуществлять достоверную оценку точности измерения измерительными системами.

*Рекомендации по организации работы с ЭУМК:*

для успешного усвоения материала изучаемой учебной дисциплины и приобретения практических навыков необходимо ознакомиться с рекомендациями учебно-методического пособия по основам теоретической метрологии, а также изучить принципы обеспечения единства измерений и методы решения метрологических задач.