

## ВВЕДЕНИЕ

В практической жизни человек всюду имеет дело с измерениями. На каждом шагу встречаются измерения таких величин, как длина, объем, вес, время и др. Измерения количественно характеризуют окружающий материальный мир, раскрывая действующие в природе закономерности. Об этом очень образно сказал основоположник отечественной метрологии Дмитрий Иванович Менделеев: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять».

Велико значение измерений в современном обществе. Они служат не только основой научно-технических знаний, но имеют первостепенное значение для учета материальных ресурсов и планирования, для внутренней и внешней торговли, для обеспечения качества и безопасности продукции, работ и услуг, совершенствования технологии, для обеспечения безопасности труда, и других видов человеческой деятельности.

Основой материального обеспечения измерений является средства измерительной техники, специально предназначенные для измерений.

Во всем мире ежедневно производятся сотни, тысячи миллиардов измерений. Для нормального функционирования экономики любой страны, а также при проведении внешнеторговых операций необходимо, чтобы результаты измерений, где бы они не выполнялись, могли бы быть согласованы. Другими словами, необходимо, чтобы результаты измерений одинаковых величин, полученные в разных местах и с помощью различных измерительных средств, были бы воспроизведимы на уровне требуемой точности.

Вопросами теории и практики обеспечения единства измерений занимается научная дисциплина – метрология. Метрология в настоящее время занимает особое место среди технических наук, т.к. метрология впитывает в себя самые последние научные достижения и это выражается в совершенстве ее эталонной базы и способов обработки результатов измерений, применения новейших информационных технологий в развитии измерительной техники. Без знания основ метрологии не может обойтись ни один специалист любой отрасли.

В широком смысле метрология является важнейшей отраслью экономики. Успешное функционирование экономики при множестве предприятий, изготавливающих средства измерений, и при еще большем множестве предприятий, организаций и учреждений, производящих измерения невозможно без государственного регулирования в области обеспечения единства измерений. В России на базе метрологии создана государственная система обеспечения единства измерений,

которая регламентируют деятельность всех предприятий, организаций, учреждений при производстве средств измерений и при проведении измерений.

## 1. СОВРЕМЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ

*Метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, а также способах достижения требуемой точности.

В более широком плане метрология может быть определена как наука об определении количественных характеристик физических объектов. Предметом метрологии являются методы и средства измерений, а также методы и средства достижения и обеспечения установленной точности.

Измерения всегда представляют собой физический эксперимент. Выполняются измерения техническими средствами, к свойствам которых предъявляются соответствующие требования, гарантирующие установленную точность в оговоренных условиях.

В целом метрология – комплексная научная дисциплина, охватывающая математические, физические и технические аспекты, как самих измерений, так и проблемы обеспечения установленной точности. В соответствии с кругом охватываемых проблем метрология состоит из теоретической метрологии, законодательной метрологии и практической (прикладной) метрологии.

*Теоретическая метрология* – раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии. Она представляет исходные положения, результаты анализа физических процессов и явлений, используемых при измерениях, аппарат формализованного описания объектов, условий, процедур и средств измерений, алгоритмическое обеспечение метрологического анализа и метрологического синтеза, принципы выбора и определения единиц измерений, их воспроизведения и передачи от эталонов рабочим средствам измерений.

Теоретическая метрология динамично развивающаяся область науки, которая во многом определяет уровень развития общественного производства и в тоже время неразрывно связана с самыми последними достижениями в области естественных наук. Это положение подтверждается историей развития науки и техники, например, развитием мировой эталонной базы.

*Законодательная метрология* – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимости точности измере-

ний в интересах общества. Законодательная метрология обеспечивает формирование нормативной базы создания и использования средств измерений, гарантирующей достижение требуемых характеристик получаемых результатов измерений.

В России положения законодательной метрологии закреплены конституцией (ст. 71) и федеральным законом «Об обеспечении единства измерений».

*Прикладная метрология* – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

## 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Метрология как научная и техническая область решает важнейшую задачу – обеспечивает единство измерений.

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в РФ единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Данное определение дано в Федеральном законе «Об обеспечении единства измерений» (принят 11.06.2008). Действует также ГОСТ «Государственная система обеспечения единства измерений».

Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах и в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Определение понятия «единство измерений» довольно емкое. Оно охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц, разработку систем воспроизведения единиц и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью, проведение измерений с погрешностью, не превышающей установленные пределы и др. Единство измерений должно выдерживаться при любой точности измерений, необходимой владельцу процесса.

Единство измерений обеспечивается путем *метрологического обеспечения* – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности проводимых измерений.

В следующих разделах дисциплины вопросам обеспечения единства измерений будет уделено особое внимание.

### 3. МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ

Назначение любой продукции, включая продаваемые услуги – удовлетворить определенную потребность людей и общества. Ключевым свойством продукции является ее качество, которое в условиях рыночной экономики определяет конкурентоспособность производителя на рынке товаров, услуг, работ. Особое значение придается обеспечению безопасности, которая является необходимым условием допуска продукции услуг, работ на рынок.

В соответствии с международным стандартом терминов в области качества (ГОСТ ISO 9000: 2011) качество определено как – «степень соответствия совокупности присущих характеристик требованиям».

В этом определении термина качество содержится три ключевых компоненты: *характеристики, требования и соответствие*, которые и увязывают в единое целое такие фундаментальные области общественного производства, как *метрология, стандартизация и подтверждение соответствия*. Как будет показано ниже, эти три области образуют триаду, на основе которой обеспечивается качество и безопасность продукции, работ, услуг.

Международный стандарт терминов в области качества (ГОСТ ISO 9000:2011) определяет характеристику качества следующим образом: «характеристика – это отличительное свойство, которое присуще продукции, процессу или системе и вытекает из требований, предъявляемых к продукции, процессу или систем». Из этого определения следует, что ассоциация термина «качество» только с продукцией является ошибочной.

*Степень соответствия* – результат деятельности по подтверждению соответствия, представляющей собой документальное удостоверение соответствия продукции или иных объектов, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

*Взаимодействие метрологии, стандартизации и сертификации* на основе правовых норм технического регулирования с целью *обеспечения безопасности и качества продукции, работ и услуг* можно представить следующим образом, рис. 1.

Дадим определения основным мероприятиям, обеспечивающим качество и безопасность продукции.

1. *Техническое регулирование* сводится к трем видам деятельности:

- первый вид деятельности реализуется через принятие и применение технических регламентов, имеющих силу закона, подзаконных актах и обязательных для применения;
- второй реализуется деятельностью по *стандартизации* через разработку и утверждение стандартов, которые должны применяться на добровольной основе;
- третий вид деятельности основывается на оценке соответствия (сертификация, декларирование соответствия).

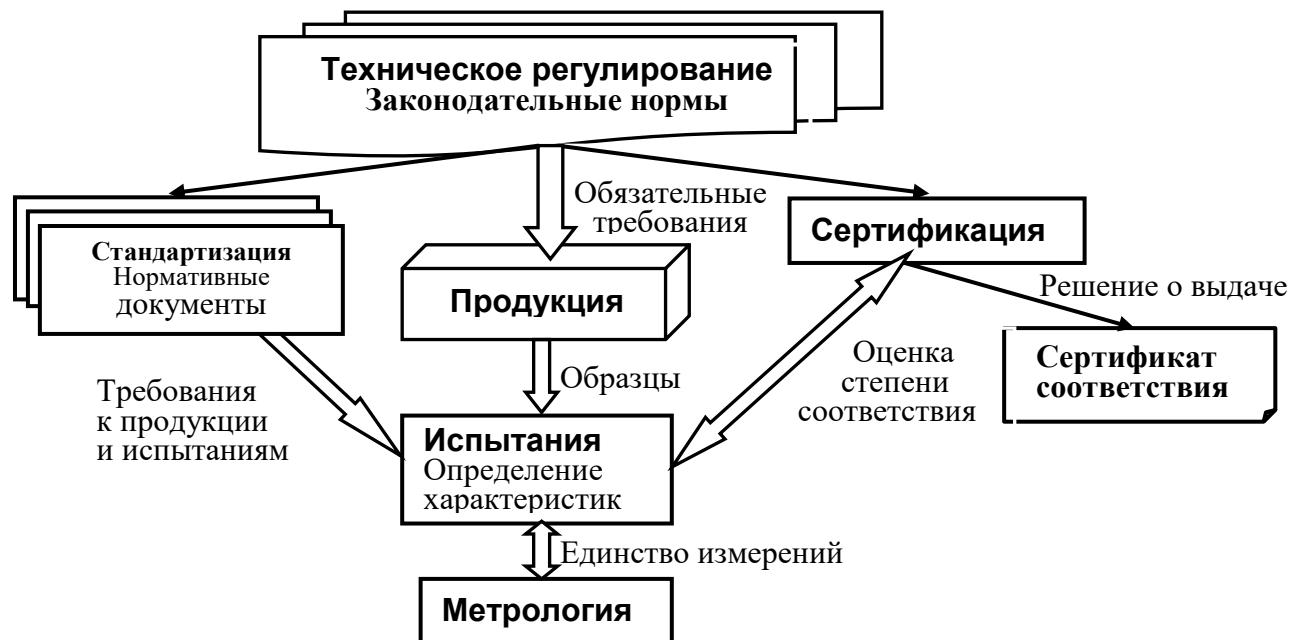


Рисунок 1 – Взаимодействие метрологии, стандартизации и сертификации с целью обеспечения безопасности и качества продукции

2. *Стандартизация* – деятельность по установлению норм, правил и требований к товарам и услугам с целью защиты интересов потребителей и государства по вопросам качества продукции и услуг, обеспечения их безопасности для жизни и здоровья людей, сохранности окружающей среды. Нормы, правила, требования к товарам и услугам, а также к испытаниям при сертификации устанавливаются в нормативных документах.

3. *Сертификация* – форма осуществляемого органом по сертификации обязательного подтверждения соответствия продукции, услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов правил или условиям дого-

воров. В процессе сертификации проводятся испытания продукции. По итогам испытаний принимается решение о выдаче или об отказе в выдаче сертификата соответствия.

4. *Испытания* – экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик объекта путем измерений. Научной, правовой, методической, организационной основой измерений является метрология.

5. *Метрология* обеспечивает единство и требуемую точность измерений при испытаниях и тем самым гарантирует достоверность результатов испытаний продукции при сертификации.

Более подробно эти мероприятия будут рассмотрены ниже.

#### 4. ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

В Российской Федерации на основе мирового и отечественного опыта принят закон, имеющий основополагающее социально-экономическое значение, регулирующий правовые отношения в областях стандартизации и оценки соответствия (Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002). При дальнейшем изложении будут использоваться терминология, нормы и положения данного Закона.

*Техническое регулирование* – правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации, выполнению работ, оказанию услуг и правовое регулирование в области оценки соответствия.

*Объектами технического регулирования* являются продукция, здания, строения и сооружения, процессы производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

Закон РФ «О техническом регулировании» предусматривает два основных вида нормативных документов:

- *технические регламенты*, имеющие статус законодательных документов, которые содержат обязательные к исполнению требования;

— *стандарты* — документы, в которых в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила выполнения работ, оказания услуг.

В этом же Законе даются следующие определения.

*Технический регламент* — нормативный правовой акт, устанавливающий обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования направленные на обеспечение безопасности.

*Безопасность продукции* и связанных с ней процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации — состояние, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений.

*Стандарт* — документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов проектирования, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг.

Стандарт также может содержать правила и методы исследований (испытаний) и измерений, правила отбора образцов, требования к терминологии, символике, упаковке, маркировке или этикеткам и правилам их нанесения.

При установлении *обязательных требований* технические регламенты устанавливают *минимально необходимые требования*, обеспечивающие: безопасность излучений; биологическую безопасность; взрывобезопасность; механическую безопасность; пожарную безопасность; промышленную безопасность; термическую безопасность; химическую безопасность; электрическую безопасность; ядерную и радиационную безопасность; электромагнитную совместимость в части обеспечения безопасности работы приборов и оборудования; *единство измерений*.

Не включенные в технические регламенты требования к продукции и связанным с продукцией процессам проектирования, производства и др., не могут носить обязательный характер.

Технический регламент в общем случае может быть представлен следующими *структурными элементами* (разделами): область применения регламента и объекты технического регулирования; основные понятия; общие положения, ка-

сающиеся размещения продукции на рынке РФ; требования к продукции; применение стандартов (презумпция соответствия); подтверждение соответствия; государственный контроль (надзор).

В РФ действуют *общие технические регламенты и специальные технические регламенты*. Требования общего технического регламента обязательны для применения и соблюдения в отношении любых видов продукции.

Требованиями специального технического регламента учитываются технологические и иные особенности отдельных видов продукции, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

## 5. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ В ОБЛАСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ

### 5.1. Виды нормативных документов

Требования к продукции, услугам, работам устанавливаются в нормативных документах в области стандартизации.

*Нормативный документ* – документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

Закон РФ «О техническом регулировании» устанавливает виды нормативных документов в области стандартизации, действующие на территории РФ (табл.1).

Таблица 1.

Нормативные документы	Сокращенное наименование
Национальные стандарты Российской Федерации.	ГОСТ Р
Международные стандарты, принятые Международной организацией по стандартизации.	ISO (ИСО)
Межгосударственные стандарты СНГ (действующие Государственные стандарты бывшего СССР).	ГОСТ
Общероссийский классификатор технико-экономической и социальной информации; Общероссийский классификатор стандартов; Общероссийский классификатор продукции.	ОКТЭСИ ОКС ОКП
Стандарты организаций.	СТО
Своды правил: Санитарные правила и нормы, Строительные нормы и правила.	СанПиН, СНиП.

1. *Национальные стандарты* – принимаются национальным органом по стандартизации одной страны. Национальные стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р) принимаются Росстандартом. Разработка и принятию национального стандарта может предшествовать принятие *предварительного национального*

*стандарта* – документа, утвержденного национальным органом по стандартизации на ограниченный срок с целью накопления в процессе его применения необходимого опыта, на котором должен базироваться национальный стандарт.

2. *Межнациональные стандарты* – принимаются международными организациями по стандартизации. Наиболее признанными и распространенными являются международные стандарты ISO (ИСО) (International Organization for Standardization – Международной организацией по стандартизации).

3. *Межгосударственные стандарты* – принимаются государствами, присоединившимися к соглашению о проведении согласованной политики в области стандартизации и применяемые ими непосредственно. К межгосударственным стандартам относятся действующие Государственные стандарты (ГОСТ) бывшего СССР – Межгосударственные СНГ.

4. *Общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации* – нормативные документы, распределяющие технико-экономическую и социальную информацию в соответствии с ее классификацией (классами, группами, видами и другим) и являющиеся обязательными для применения при создании государственных информационных систем и информационных ресурсов и межведомственном обмене информацией.

Примерами классификаторов в отдельных областях являются [«Общероссийский классификатор стандартов»](#) (ОКС); [«Общероссийский классификатор продукции»](#) (ОКП).

5. *Стандарты организаций* (СТО) (комерческих, общественных, научных организаций, объединений юридических лиц и др.) могут разрабатываться и утверждаться ими самостоятельно исходя из необходимости применения этих стандартов для совершенствования производства, обеспечения качества продукции, выполнения работ, оказания услуг. Порядок разработки, утверждения, учета, изменения и отмены стандартов организаций устанавливается ими самостоятельно.

6. *Свод правил* – документ в области стандартизации, содержащий технические правила и (или) описание процессов проектирования, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции. Свод правил применяется на добровольной основе в целях соблюдения требований технических регламентов.

Своды правил разрабатываются в случае отсутствия национальных стандартов применительно к отдельным требованиям технических регламентов или к

объектам технического регулирования в целях обеспечения соблюдения требований технических регламентов.

Разработка и утверждение сводов правил осуществляются федеральными органами исполнительной власти, например, *строительные нормы и правила* (СНиП), *санитарные правила и нормы* (СанПиН).

## 5.2 Национальные стандарты РФ

В соответствии с Постановлением Росстандарта от 30.01.2004 N 4 «О национальных стандартах» со дня вступления в силу Закона «О техническом регулировании» государственные и межгосударственные стандарты, принятые Росстандартом до 01.07.2003, признаны национальными стандартами. Название «национальный стандарт», в отличие от используемого ранее «государственный стандарт», отражает его негосударственный (необязательный) статус, но указывает на возможность его применения на территории РФ.

*Обозначение* национального стандарта состоит из индекса «ГОСТ Р», регистрационного номера и отделенных от него четырех цифр года утверждения (принятия) стандарта, например, ГОСТ Р 1.13-2004. Регистрационные номера вновь разработанным стандартам присваивают в порядке возрастания номеров по мере их регистрации. При отмене стандарта его номер другому стандарту не присваивают, за исключением его пересмотра или принятия взамен другого стандарта.

Национальный стандарт *применяют добровольно*, после чего все его требования становятся *обязательными для соблюдения*. Это следует из того, что Закон «О техническом регулировании», излагая принципы стандартизации, указывает на добровольность применения стандартов. Но раз уж принято решение о применении стандарта, то его положения и требования становятся обязательными.

Добровольный характер применения национальных стандартов отражает требования рыночной экономики, способствует развитию конкуренции и учитывает готовность предприятий к внедрению прогрессивных решений.

*Обязательность применения стандартов* наступает при прямом указании на них:

- в действующем законодательстве, например, если есть соответствующая ссылка в техническом регламенте;
- в правомерно принятых документах Федеральных органов исполнительной власти;
- в договорах, контрактах предприятий, организаций.

Ввиду большого значения национальных стандартов для обеспечения качества и безопасности, для повышения конкурентоспособности отечественных продукции, работ и услуг, основные правила их разработки и утверждения установлены Законом РФ «О техническом регулировании» и в силу этого являются общеподзательными.

## 6. ОСНОВЫ СЕРТИФИКАЦИИ

Регулирование деятельности в области подтверждения соответствия и сертификации осуществляется в соответствии с Законом РФ «О техническом регулировании». В терминологическом разделе Закона (статья 2) даются определения ряду основных терминов, которые будут применяться при дальнейшем изложении.

*Подтверждение соответствия* – документальное удостоверение соответствия продукции или иных объектов, процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, сводов правил, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

Участниками процесса подтверждения соответствия могут быть три стороны:

1. Заявитель (изготовитель, поставщик, исполнитель);
2. Потребитель (заказчик);
3. Орган, признаваемый независимым от первых двух других участующих сторон.

*Заявитель* – физическое или юридическое лицо, которое для подтверждения соответствия принимает декларацию о соответствии или обращается за получением сертификата соответствия, получает сертификат соответствия.

Между первой и второй сторонами возникает противоречие в оценке соответствия продукции, услуги, работ одним и тем же требованиям. Поэтому наиболее объективной является оценка соответствия третьей независимой стороной (органом по сертификации) – сертификация.

*Сертификация* – форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов сводов правил или условиям договоров.

*Сертификат соответствия* – документ, удостоверяющий соответствие объекта требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов

правил или условиям договоров. Сертификаты выдаются аккредитованными в системе Росстандарта органами по сертификации на основании протокола, составленного по результатам испытаний в аккредитованной лаборатории. В РФ установлен порядок ведения единого реестра выданных сертификатов.

*Декларирование соответствия* – форма подтверждения соответствия продукции требованиям технических регламентов.

*Декларация о соответствии* – документ, удостоверяющий соответствие выпускаемой в обращение продукции требованиям технических регламентов. В декларации заявитель на основе имеющихся у него доказательств удостоверяет, что поставляемая им продукция соответствует нормативным требованиям. Декларация регистрируется органом по сертификации.

## 6.1 Формы подтверждения соответствия

Подтверждение соответствия применяется на дорыночной стадии обращения продукции и может быть осуществлено как изготовителями, то есть первой стороной (декларирование соответствия), так и независимыми от изготовителей и потребителей органами – третьей стороной (сертификация).

Подтверждение соответствия на территории РФ может носить добровольный или обязательный характер (рис. 2).

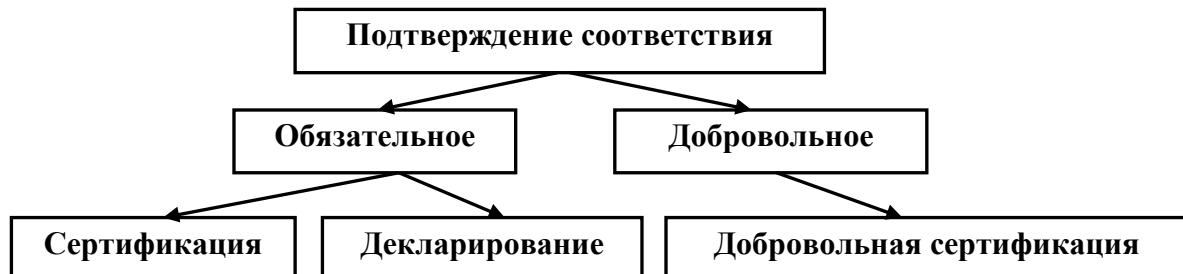


Рисунок 2 – Формы подтверждения соответствия

Обязательное подтверждение осуществляется в формах: 1) декларирования соответствия; 2) обязательной сертификации.

Единый перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации и единый перечень продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии, определен в Постановлении Правительства РФ.

Закон РФ «О техническом регулировании» в статье 23 «Обязательное подтверждение соответствия» устанавливает:

1. Обязательное подтверждение соответствия проводится только в случаях, установленных соответствующим техническим регламентом, и исключительно на

соответствие требованиям технического регламента. Объектом обязательного подтверждения соответствия может быть только продукция, выпускаемая в обращение на территории Российской Федерации.

2. Форма и схемы обязательного подтверждения соответствия могут устанавливаться только техническим регламентом с учетом степени риска недостижения целей технических регламентов.

3. Декларация о соответствии и сертификат соответствия имеют равную юридическую силу и действуют на всей территории РФ в отношении каждой единицы продукции, выпускаемой в обращение на территории РФ во время действия декларации о соответствии или сертификата соответствия.

4. Работы по обязательному подтверждению соответствия подлежат оплате заявителем. Правительством Российской Федерации устанавливается методика определения стоимости работ по обязательному подтверждению соответствия, которая предусматривает применение единых правил и принципов установления цен на продукцию одинаковых или сходных видов независимо от страны и (или) места ее происхождения, а также лиц, которые являются заявителями.

*Обязательная сертификация* – это подтверждение уполномоченным органом соответствия продукции (услуги, работы) обязательным требованиям. Обязательное требование – это требование нормативного документа, подлежащее обязательному выполнению с целью достижения соответствия этому документу. Обычно обязательными являются требования по обеспечению безопасности людей, их имущества и окружающей среды, технической и информационной совместности и взаимозаменяемости продукции и некоторые другие, связанные с необходимостью обеспечения единства методов контроля и маркировки.

В качестве обязательных требований при сертификации продукции, услуг, работ могут являться:

- законодательные акты Российской Федерации, например, Технические регламенты;
- национальные стандарты (в том числе признанные в Российской Федерации межгосударственные и международные стандарты), СанПиНы, СНиПы, а также другие документы, которые в соответствии с законодательством Российской Федерации устанавливают обязательные требования к продукции, услугам, работам;
- правила выполнения отдельных видов работ и оказания отдельных видов услуг, утвержденные постановлениями Правительства Российской Федерации.

*Декларирование соответствия* осуществляется по одной из следующих схем:

- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств, представленных заявителем;
- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств, доказательств, полученных с участием органа по сертификации и (или) аккредитованной испытательной лаборатории (центра).

Заявителем при декларировании соответствия может выступать:

- юридическое лицо, зарегистрированное в соответствии с законодательством Российской Федерации;
- физическое лицо, зарегистрированное в соответствии с законодательством Российской Федерации в качестве индивидуального предпринимателя, выступающие в либо в качестве продавца или изготовителя.

При декларировании соответствия заявитель на основании собственных доказательств самостоятельно формирует доказательственные материалы в целях подтверждения соответствия продукции требованиям технического регламента.

Декларация о соответствии регистрируется аккредитованным органом по сертификации в соответствии с кодом ОКП, присвоенным данной продукции. Аккредитованный орган по сертификации, где регистрируется декларация о соответствии, присваивает ей регистрационный номер, который содержит код органа по сертификации и порядковый номер самой декларации соответствия. Декларация о соответствии имеет юридическую силу наравне с сертификатом соответствия и действует на всей территории РФ.

*Добровольная сертификация* осуществляется по инициативе заявителя на условиях договора между заявителем и органом по сертификации. Объектами добровольной сертификации являются продукция, процессы производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, работы и услуги, а также иные объекты, в отношении которых стандартами, системами добровольной сертификации и договорами устанавливаются требования.

*Маркировка продукции.* Если продукция успешно прошла процедуру оценки соответствия, то она маркируется определенным знаком обращения на рынке, приведенным в табл.2.

Если изделие сертифицировано на безопасность, то оно может маркироваться специальными знаками соответствия, имеющим отношение, либо к конкретным видам продукции (например, электротехническим бытовым приборам), либо имеющим более общий характер (информируют о безопасности).

Таблица 2

Форма подтверждения соответствия	Знак
<b>Знак соответствия при обязательной сертификации.</b> В данном знаке соответствия отражена информация об органе по сертификации, который выдал сертификат соответствия. Буквенное и цифровое обозначение внизу знака соответствует номеру органа по сертификации.	
<b>Знак соответствия при добровольной сертификации.</b> В данном знаке соответствия отражена информация «добровольная сертификация». Нанесение знака не является обязательным требованием законодательства. При маркировке товара знаком код органа по сертификации не отражается.	
<b>Знак соответствия при декларировании соответствия.</b> Продукция маркируется знаком без информационного кода органа по сертификации. Нанесение знака является обязательным требованием при маркировке товаров, отраженных в номенклатуре продукции, подлежащих подтверждению качества в форме принятия декларации о соответствии.	
<b>Знак соответствия техническому регламенту.</b> Продукция, подлежащее обязательной сертификации по техническому регламенту (ТР), маркируются знаком обращения на рынке. Знак соответствия ТР наносится на те товары, в отношении которых уже действует ТР и получен сертификат соответствия.	
<b>Знак соответствия техническому регламенту Евразийского экономического союза (до 31 декабря 2014 года Таможенного союза)</b>	<b>ЕАС</b>

## 6.2. Сертификационные испытания

Целью *сертификационных испытаний* является определение существенных характеристик продукции с последующей оценкой их соответствия установленным требованиям.

Сертификационные испытания продукции проводятся только в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах) по специальной программе, составленной на основании общепринятой методики сертификационных испытаний и в зависимости от вида продукции.

В соответствии с определением, данным в международном стандарте ISO/IEC 17000:2004, *аккредитация* – «подтверждение соответствия третьей стороной, относящейся к органу по оценке соответствия и служащее официальным признанием его компетентности для выполнения конкретных задач по оценке соответствия».

Аkkредитация органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров) осуществляется в целях:

- подтверждения компетентности органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работы по подтверждению соответствия;
- обеспечения доверия изготовителей, продавцов и приобретателей к деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров);
- создания условий для признания результатов деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров).

Ниже будут рассмотрены наиболее важные стороны проведения сертификационных испытаний и даны определения ряду терминов.

*Испытания* – техническая операция, заключающаяся в определении характеристик продукции, процесса или услуги в соответствии с установленной процедурой. При испытаниях используются стандарты на методы контроля (испытания, измерения), которые обеспечивают полный контроль над выполнением обязательных требований к качеству продукции, определенному стандартами. В этом типе стандартов должны утверждаться объективные методы контроля, дающие воспроизводимые и сопоставимые результаты.

Для эффективной оценки показателя качества в стандарте, как правило, предлагаются несколько методик контроля. В стандарте для методик контроля должны быть утверждены инструменты и устройства, с помощью которых должны проводиться испытания, этапы подготовки испытания, алгоритм проведения испытания, указания к порядку обработки исходов испытания, требования к оформлению результатов, допустимая погрешность определения характеристик при испытаниях продукции.

Сертификационные испытания проводятся при определенных *условиях испытаний* путем задания совокупности воздействующих факторов и режимов функционирования объекта при испытаниях. Воздействия на объект определяются внешними воздействующими факторами – климатическими, тепловыми, химическими и т.п., как естественными, так и создаваемыми искусственно. Испытания по проверке устойчивости или прочности продукции при воздействии на нее факторов проводятся для целей подтверждения соответствия, если соответствующие требования и методы испытаний установлены в нормативной документации на продукцию.

Важным требованием при проведении сертификационных испытаний является их *метрологическое обеспечение* – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, метрологических правил и норм,

необходимых для получения достоверной измерительной информации о значениях показателей качества и безопасности продукции, а также о значениях характеристик воздействующих факторов и режимов функционирования объекта при испытаниях, других условий испытаний.

По завершении полных испытаний составляется *протокол*. Он подтверждает или не подтверждает соответствие продукции требованиям нормативных документов. Протокол испытаний передается в орган по сертификации или на руки заявителю. Лаборатория обязана хранить копию протокола не менее 3-х лет.

Орган по сертификации на основе протокола выдает экспертное заключение. Эти документы являются основополагающими при выдаче различных сертификатов. Если для получения того или иного конкретного сертификата необходимо подтверждение безопасности в разных областях сертификации, то может потребоваться проведение исследований в нескольких лабораториях с соответствующими аккредитациями, каждая из которых составит свой протокол испытаний.

Полученная в ходе исследований информация является конфиденциальной. Предусматривается персональная ответственность за разглашение данных сведений. Юридически результаты лабораторных испытаний принадлежат в равной степени, как заказчику, так и лаборатории. При опубликовании результатов испытаний, на это должно быть получено согласие каждой из сторон.

Срок действия протоколов испытаний, как правило, составляет:

- протокол для первичной обязательной сертификации действителен в течение 1 года с момента даты окончания испытаний (или даты протокола испытаний). При последующих обращениях в орган по сертификации протокол может быть действителен в течение 3-х лет;
- протокол для добровольной сертификации – его срок действия согласовывается заявителем и органом по сертификации (но не более 3-х лет).

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.
2. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. <http://www.fundmetrology.ru>.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

### 1.1. Основные термины

Приведем ряд основных терминов, применяемых в метрологии:

*физическая величина* – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них;

*единица измерения физической величины* – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин;

*система единиц физических величин* – совокупность основных и произвольных единиц физических величин, образованная в соответствии с принципами для данной системы физических величин;

*размер физической величины* – количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Предполагается, что размер физической величины существует объективно (вне зависимости от того измеряем мы эту величину или нет);

*значение физической величины* – выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Конкретное значение физической величины является результатом ее измерения;

*истинное значение физической величины* – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину;

*действительное значение физической величины* – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Например, при поверке некоторого (испытуемого) вольтметра его показания сравнивают с показаниями более точного (образцового) вольтметра. В этом случае показания образцового вольтметра принимают за действительное значение напряжения;

*измерение физической величины* – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины

с ее единицей и получение значения этой величины (установление значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств);

*результат измерения физической величины* – значение величины, полученное путем ее измерения – установленное значение величины, характеризующей свойство физического объекта, представляемое действительным числом с принятой размерностью (размерность определяется выбранной единицей измерений);

*точность измерений* – одна из характеристик измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения;

*мера точности – погрешность результата измерения* – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины (истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях, на практике используют действительное значение);

*средство измерений* – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени;

*мера физической величины* – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью;

*метрологическая характеристика средства измерений* – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и его погрешность;

*метрологическое обеспечение измерений* – деятельность, направленная на создание эталонных средств измерений, а также разработку и применение метрологических правил и норм, обеспечивающих требуемое качество измерений.

## 1.2. Постулаты метрологии

В метрологии, как и в любой научной дисциплине, принят ряд постулатов, которые принимаются без доказательств. Важнейшие постулаты следующие:

1. Измерение без априорной информации невозможно;
2. Существует истинное значение измеряемой величины;
3. Истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.

Первый постулат метрологии относится к ситуации перед измерением и говорит о том, что если об интересующем нас свойстве мы ничего не знаем, то не сможем ни выбрать средство, ни метод измерения, ни провести измерение. Вместе с тем, если о нем известно все, то измерение не нужно. Таким образом, измерение обусловлено дефицитом количественной информации о том или ином свойстве объекта или явления и направлено на его уменьшение.

Второй и третий постулаты говорят о том, истинное значение физической величины определить невозможно, оно существует только в рамках принятых моделей. Причина этого неадекватность принятой модели измерения, несовершенство средств и методов измерений, недостаточная тщательность проведения измерений и обработки их результатов, воздействие внешних дестабилизирующих факторов, конечная длительность процесса измерений.

В большинстве случаев достаточно знать действительное значение измеряемой физической величины – значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данных целей может быть использовано вместо него.

Еще одним из важнейших положение метрологии является *основное уравнение измерений*, которое представлено в виде в виде:

$$x = NQ,$$

где  $x$  – результат измерения;  $N$  – действительное число;  $Q$  – единица измерения величины физической величины  $X$ .

Из этого уравнения следует, что любое измерение можно рассматривать как сравнение физической величины с ее единицей.

## 2. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Согласно Л. Эйлеру: «Невозможно определить или измерить одну величину иначе, как, приняв в качестве известной другую величину этого же рода и указав соотношение, в котором она находится к ней».

Развитие естественных и технических наук, необходимость обмена результатами привело к созданию систем единиц физических величин (ФВ).

Система физических единиц строится на основе знаний о физических процессах, протекающих в природе – известных физических законах. Так, выбрав произвольно единицы измерения нескольких физических величин и зная физические законы, связывающие их с другими величинами можно получить единицы ФВ.

Впервые понятие системы единиц физических величин ввел К. Гаусс. Согласно его методу сначала устанавливаются (выбираются) несколько произвольных величин, независящих от других. Единицы этих величин называются *основными*.

Важным является выбор основных единиц. С одной стороны, выбор может быть произвольным, с другой, желательно чтобы количество таких единиц было минимальным. Основные единицы выбираются таким образом, чтобы, используя физические законы можно было получить другие – *производные единицы*. Полная совокупность основных и производных единиц образуют *систему единиц Ф.В.*

*Кратные и дольные единицы.* Для многих практических приложений размерности метрических единиц неудобны, они либо велики, либо малы. Поэтому используют кратные и дольные единицы. В десятичной системе исчисления кратные или дольные единицы получаются путем умножения или деление исходной единицы на число 10 в соответствующей степени. Для наименования кратных и дольных единиц используются приставки. Кратные и дольные определения единиц для десятичной системы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Множитель	Наименование	Приставка	
		Обозначение	
		Русское	Международное
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{18}$	экса	Э	E
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{15}$	пета	П	P
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	Т	T
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гига	Г	G
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мега	М	M
$1\ 000 = 10^3$	кило	к	k
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деки	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санти	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м	m
$0,000\ 001 = 10^{-6}$	микро	мк	$\mu$
$0,000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	пико	п	p
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$	атто	а	a

*Относительные величины и единицы* часто используют для измерения физической величины отношение этой величины к одноименной физической величине. Это отношение является безразмерным. К таким относятся атомные или молекулярные массы химических элементов, которые выражаются по отношению к одной двенадцатой массы углерода-2. Отношения величин выражаются:

- в *безразмерных единицах*, когда отношение равно единицам;
- в *процентах*, когда отношение находится в диапазоне до  $10^{-2}$ ;
- в *промилле*, когда отношение находится в диапазоне до  $10^{-3}$ ;
- в *миллионных долях*, при отношении в диапазоне до  $10^{-6}$  и т.д.

*Логарифмические величины и единицы* широко применяются в технике. В виде логарифмических величин выражаются частотный интервал, ослабление, усиление, уровни звукового давления и др.

Единицей логарифмической величины является бел (Б), который выражается через логарифм отношения одноименных физических величин:

$$1\text{Б} = \lg(x/x_0) \text{ при } x = 10x_0, 1\text{дБ} = 0,1 \text{ Б.}$$

Часто в измерениях используется дольная единица бела – децибел (дБ) равная 0,1 Б.

На практике в зависимости от рода величин используются следующие формулы:

- $L_P = 10\lg(P/P_0)$  (дБ) – для энергетических величин (мощности, энергии, плотности энергии и т.п.);
- $L_F = 20\lg(F/F_0)$  (дБ) – для силовых величин (напряжения, силы тока, давления, напряженности поля и т.п.).

Для образования логарифмической единицы может использоваться не только десятичный логарифм, а также натуральный или по основанию 2, если это удобно для решения практической задачи.

### 3. СИСТЕМА ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН СИ

Первоначально в разных странах были созданы свои системы единиц. В основном они строились на базе трех единиц физических величин: длина, масса, время и условно назывались механическими. Например, системы: метр, килограмм, секунда (МКС); сантиметр, грамм, секунда (СГС).

Эти системы удобны в применении в механике, однако для электрических и магнитных величин встретились серьезные трудности. Наличие ряда систем создало неудобства при обмене результатами, при пересчете из одной системы единиц в другую, что привело к необходимости создания единой универсальной системы единиц, которая охватывала бы все отрасли науки и была бы принята в международном масштабе.

В 1948 г. на IX Генеральной конференции по мерам и весам было рассмотрено предложение о принятии единой практической системы единиц.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам принимает международную систему и присваивает ей наименование «Международная система единиц» (System International – SI, в русской транскрипции – СИ), в которой в качестве основных приняты единицы: *метр, килограмм, секунда, Ампер, Кельвин, кандела*. Позже в качестве основной в систему единиц была введена единица количества вещества – *моль*.

*Производные единицы.* Производные единицы могут быть выражены через основные с помощью известных физических законов.

*Размерность производной единицы* определяется математическим выражением, связывающим эту единицу с основными и показывающим, во сколько раз изменится производная единица при изменении основных единиц.

Если с изменением основной единицы в  $n$  раз производная единица изменится в  $n^p$  раз, то говорят, что данная производная единица обладает размерностью  $p$  относительно основной единицы. (Например, размерность площади равна двум –  $\text{м}^2$ , а размерность объема трем –  $\text{м}^3$  относительно единицы длины м.).

Формула размерности производной единицы представляет собой одночлен, составленный из размерностей основных единиц, причем эти размерности (степени) могут быть положительными, отрицательными, целыми и дробными. Размерности обладают следующими свойствами:

1. Если числовое значение величины  $A$  равно произведению величин  $B$  и  $C$ , то размерность  $A$  равна произведению размерностей  $B$  и  $C$  –  $[A]=[B] \cdot [C]$ ;

2. Если числовое значение величины  $A$  равно отношению величин  $B$  и  $C$ , то размерность  $A$  равна отношению размерностей  $B$  и  $C$  –  $[A]=[B]/[C]$ ;

3. Если числовое значение величины  $A$  равно степени  $n$  числового значения величины  $B$ , то размерность  $A$  равна степени  $n$  размерности  $B$  –  $[A]=[B]^n$ .

Эти свойства используются при преобразовании формул размерности.

В табл. 1 приведены выражения некоторых производных единиц через основные единицы системы СИ.

Таблица 1

Величина	Название единицы измерение	Обозначение	Выражение через основные единицы системы СИ
Сила	ньютон	Н	$\text{кг} \cdot \text{м}/\text{s}^2$
Энергия	дюйль	Дж	$\text{Н} \cdot \text{м} = \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{s}^2$
Мощность	вatt	Вт	$\text{Дж}/\text{s} = \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{s}^3$
Давление	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Заряд	кулон	Кл	$\text{А} \cdot \text{с}$
Напряжение	вольт	В	$\text{Дж}/\text{Кл} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Сопротивление	ом	Ом	$\text{В}/\text{А} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$

## 4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ШКАЛЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерению подлежат различные проявления свойств тел, веществ, явлений, процессов. Многообразие (количественное или качественное) проявлений любого свойства образуют множества, отображение элементов которых на упорядоченные множества чисел или, в более общем случае, на систему условных знаков образуют шкалы измерения этих свойств. Измерительная шкала – одно из ключевых понятий метрологии.

*Измерительная шкала* – отображение множества различных проявлений количественного или качественного свойства на принятую по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений).

Измерение – сравнение конкретного проявления измеряемого свойства (величины) со шкалой измерений этого свойства (величины) в целях получения результата измерений (оценки свойства или значения величины).

Упорядоченным множеством чисел или системой логически связанных знаков (обозначений) являются, например, множество обозначений цветов, совокупность классификационных символов или понятий, множество баллов оценки состояний объекта, множество действительных чисел и т.д.

Элементы множеств проявления свойств объекта находятся в определенных логических отношениях между собой. Такими отношениями могут быть:

- «эквивалентность» (равенство) или «сходство» (близость) этих элементов;
- «порядок» их количественная различимость («больше», «меньше»),
- «пропорциональность» во сколько раз больше или меньше;
- «аддитивность» возможность суммирования значений;
- допустимость выполнения определенных математических операций сложения, вычитания, умножения деления с элементами множеств и т.д.

Эти особенности элементов множеств проявлений свойств определяют типы соответствующих им измерительных шкал. В теории измерений различают пять основных типов шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные шкалы. Каждый тип шкалы обладает определенными признаками, основные из которых рассматриваются ниже.

### 4.1. Неметрические измерительные шкалы

В этих шкалах нельзя ввести понятия единицы измерения; в них отсутствует нулевой элемент, эти шкалы, по существу, качественны.

*Шкалы наименований* – отражают качественные свойства. Их элементы характеризуются только отношениями эквивалентности (равенства) и сходства конкретных качественных проявлений свойств.

Примерами таких шкал является шкала классификации (оценки) цвета объектов по наименованиям (красный, оранжевый, желтый, зеленый и т.д.), опирающаяся на стандартизованные атласы цветов, систематизированные по сходству. Измерения в шкале цветов выполняются путем сравнения при определенном освещении образцов цвета из атласа с цветом исследуемого объекта и установления эквивалентности их цветов.

*Шкалы порядка* – описывают свойства, для которых имеют смысл не только отношения эквивалентности, но и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. Характерным примером шкал порядка являются существующие шкалы чисел твердости тел, шкалы баллов землетрясений, шкалы баллов ветра, шкала ЕГЭ. Шкалы порядка допускают монотонные преобразования, в них может быть или отсутствовать нулевой элемент.

#### 4.2. Метрические измерительные шкалы

Основной признак этих шкал – наличие единицы измерения. Особенности метрических типов шкал систематизированы и приведены в табл.3.

Таблица 3

Шкала	Эквивалентность	Порядок	Пропорциональность	Наличие нуля	Единица измерения	Операции	Аддитивность
Разностей	есть	есть	нет	условный	размерная	сложение, вычитание для интервалов	для интервалов
Отношений	есть	есть	есть	естественный	размерная	умножение, деление, вычитание	не для всех величин
Абсолютная	есть	есть	есть	естественный	безразмерная	арифметические операции, логарифмирование	есть

*Шкалы разностей (интервалов)* – отличаются от шкал порядка тем, что для описываемых ими свойств имеют смысл не только отношения эквивалентности и порядка, но и суммирования интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойств.

Шкалы разностей имеют условные (принятые по соглашению) единицы измерений и условные нули. К этому типу шкал относятся и шкалы температур по Цельсию, Фаренгейту, Реомюру.

Характерный пример – шкала интервалов времени. Интервалы времени (например, периоды работы, периоды учебы) можно складывать и вычитать, но складывать даты каких-либо событий бессмысленно.

*Шкалы отношений.* К множеству количественных проявлений в этих шкалах применимы отношения эквивалентности и порядка, пропорциональности (шкалы отношений 1-го рода – пропорциональные шкалы), а во многих случаях и суммирования (шкалы отношений 2-го рода – аддитивные шкалы).

К шкалам отношений 1-ого рода применимы только операции вычитания, деления, умножения, но не суммирования. Пример – термодинамическая температурная шкала, можно определять разности и отношения температур различных объектов, но сумма температур не имеет физического смысла.

В шкалах отношений 2-го рода (аддитивных) возможна операция суммирования, например, шкала массы. Допустимо вычислять не только разности и отношения масс различных объектов, но и их суммы.

*Абсолютные шкалы* – обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно в них существует естественное однозначное определение безразмерной единицы измерений. Такие шкалы используются для измерений относительных величин (отношений одноименных величин: коэффициентов усиления, ослабления, КПД, коэффициентов отражений и поглощений и т.д.). Эти шкалы допускают любые арифметические операции и логарифмирование.

#### 4.3. Логарифмические измерительные шкалы

*Логарифмические шкалы* – логарифмическое преобразование шкал, часто применяемое на практике, приводит к изменению типа шкал. Практическое распространение получили логарифмические шкалы на основе применения систем десятичных, натуральных логарифмов, логарифмов с основанием два.

Логарифм есть число безразмерное, поэтому перед логарифмированием преобразуемая размерная величина в начале обращается в безразмерную путем ее деления на принятое по соглашению произвольное (опорное) значение той же величины, после чего выполняется операция логарифмирования.

В зависимости от типа шкалы, подвергнутой логарифмическому преобразованию, логарифмические шкалы могут быть двух видов. При логарифмическом преобразовании абсолютных шкал получаются абсолютные логарифмические

шкалы, называемые иногда логарифмическими шкалами с плавающим нулем, т.к. в них не фиксируется опорное значение. Примерами таких шкал являются шкалы усиления (ослабления) сигнала в дБ. Для значений величин в абсолютных логарифмических шкалах допустимы операции сложения и вычитания.

При логарифмическом преобразовании шкал отношений и интервалов получается логарифмическая шкала интервалов с фиксированным нулем, соответствующим принятому опорному значению преобразуемой шкалы.

К этим шкалам в общем случае нельзя прямо применять ни одно арифметическое действие; сложение и вычитание величин, выраженных в значениях таких шкал, должно проводиться путем нахождения их антилогарифмов, выполнения необходимых арифметических операций и повторного логарифмирования результата.

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.
2. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. <http://www.fundmetrology.ru>.

## 1. ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

*Государственное регулирование обеспечения единства измерений* – это процесс воздействия государства на измерения, единицы величин, эталоны единиц величин, стандартные образцы и средства измерений к которым установлены обязательные требования.

К сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений относятся области национальной экономики, в которых государство взяло на себя ответственность за обеспечение единства измерений и осуществляет непосредственное регулирование, определяя виды измерений и устанавливая к ним метрологические требования, в целях обеспечения достоверности измерений, а также безопасности высокотехнологичных производств и предоставления услуг.

Определим два ключевых понятия.

*Единство измерений* – результаты выражены в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы.

*Метрологическое обеспечение* – совокупность действий для достижения единства и требуемой точности измерений.

Метрологическое обеспечение на Государственном уровне включает следующие основы (подсистемы) (рис. 1).



Рисунок 1

Вводится понятие государственной системы обеспечения единства (ГСИ), которая будет рассмотрена ниже.

## 1.1. Правовая подсистема обеспечения единства измерений

*Правовая подсистема ГСИ* – это комплекс взаимосвязанных законодательных и подзаконных актов (в том числе межотраслевых нормативных документов), объединенных общей целевой направленностью и устанавливающих согласованные требования к объектам деятельности по обеспечению единства измерений. Основу нормативной базы ГСИ составляет Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [2].

*Конституция РФ* (ст. 71, п), устанавливает, что в ведении Российской Федерации находятся стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени, и закрепляет централизованное руководство основными вопросами законодательной метрологии (единицы величин, эталоны и связанные с ними другие метрологические основы).

Сфера государственного регулирования в области обеспечения единства измерений (ОЕИ) регламентируется Федеральным законом от 26.06.2008 N 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», который устанавливает обязательные требования к измерениям, эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений, единицам величин, выполнению работ и (или) оказанию услуг по обеспечению единства измерений (рис.2).



Рисунок 2

Основными объектами регламентации в области обеспечения единства измерений являются общие основополагающие метрологические нормы и правила, государственные поверочные схемы (ГПС), методики поверки средств измерений (МП) и методики выполнения измерений (МВИ).

По состоянию на 20018 год нормативная база метрологии представлена более 2800 нормативными документами: 420 национальных и межгосударственных стандартов (ГОСТ Р, ГОСТ), 28 Российских правил по метрологии (ПР), 2186 рекомендаций государственных метрологических научных центров (МИ) и пр.

*Государственный реестр средств измерений* – это особый документ, который предназначен для регистрации типов средств измерений. Имеет статус госу-

дарственного документа, удостоверяющего, что зарегистрированное средство измерений и его изготовитель прошли необходимые формальные и существенные проверочные процедуры, на основании которых данное средство измерений включено в список измерительных устройств, для которых установлены официальные технические нормативы и правила метрологической поверки.

К применению в сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений допускаются только средства из госреестра, содержащего сведения, приведенные на рис. 3.

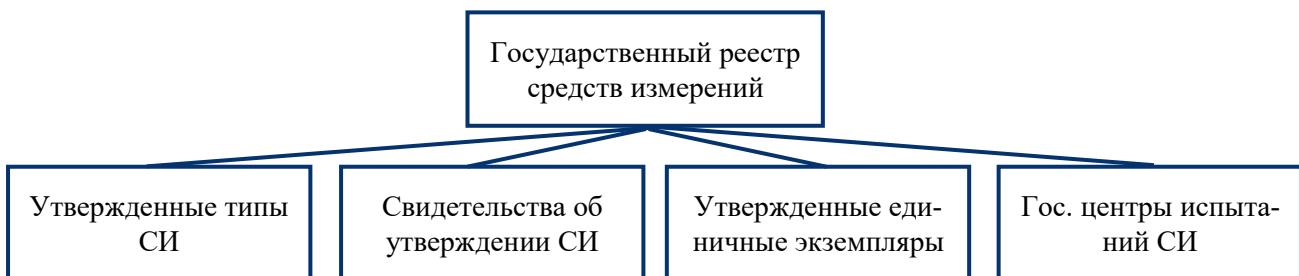


Рисунок 3

## 1.2. Организационная подсистема обеспечения единства измерений

Организационная подсистема ГСИ является многоуровневой и представлена следующими метрологическими и другими службами обеспечения единства измерений (ОЕИ) на государственном, ведомственном и уровне предприятий и организаций.

Метрологическая служба – служба, создаваемая в соответствии с законодательством для выполнения работ по ОЕИ и для осуществления метрологического контроля и надзора.

Организационная подсистема имеет иерархическую структуру и включает:

- головной орган – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) осуществляющие функции планирования, управления и контроля деятельностью по ОЕИ на государственном и межотраслевом уровне;
- иные государственные службы ОЕИ;
- государственные метрологические службы (ГМС) субъектов РФ, образованные по территориальному признаку, осуществляют региональную координацию деятельности по ОЕИ;
- ведомственные метрологические службы осуществляют отраслевую координация деятельности по ОЕИ;
- метрологические службы юридических лиц, осуществляют деятельность по ОЕИ на уровне предприятий, учреждений, организаций.

В состав ГМС входят также семь государственных научных метрологических центров и центры государственных эталонов, которые специализируются на различных единицах физических величин.

К иным государственным службам ОЕИ относятся:

- Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ);
- Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО);
- Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

### 1.3. Государственный метрологический контроль и надзор

Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» разделил понятия «Государственный метрологический контроль» (ГМК) и «Государственный метрологический надзор» (ГМН).

Для пояснения этих понятий рассмотрим общие понятия, связанные с контролем. Контроль – это управление каким-либо объектом и принятие решений. «Объект» – чем управляют, «Субъект» – кто управляет. Применительно к обеспечению единства измерений можно дать следующие определения:

**Контроль** – сравнение фактических (текущих) значений характеристик контролируемого объекта с заданными значениями этих характеристик, в данном случае объектом являются средства измерений.

**Надзор** – наблюдение за исполнением Субъектом обязательных требований (предписаний).



Любое предприятие может установить некие обязательные требования, действующие в пределах данного предприятия. Тогда метрологический надзор и метрологический контроль могут осуществляться силами самого предприятия.

Если обязательные требования задаются законодательно либо нормативными правовыми документами федерального уровня, а контроль и надзор осуществляются лицами, уполномоченными государственными органами, то это «государственный».

К ГМК относят процедуры утверждения типа средств измерений, поверки средств измерений, лицензирования деятельности по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений (рис.4).

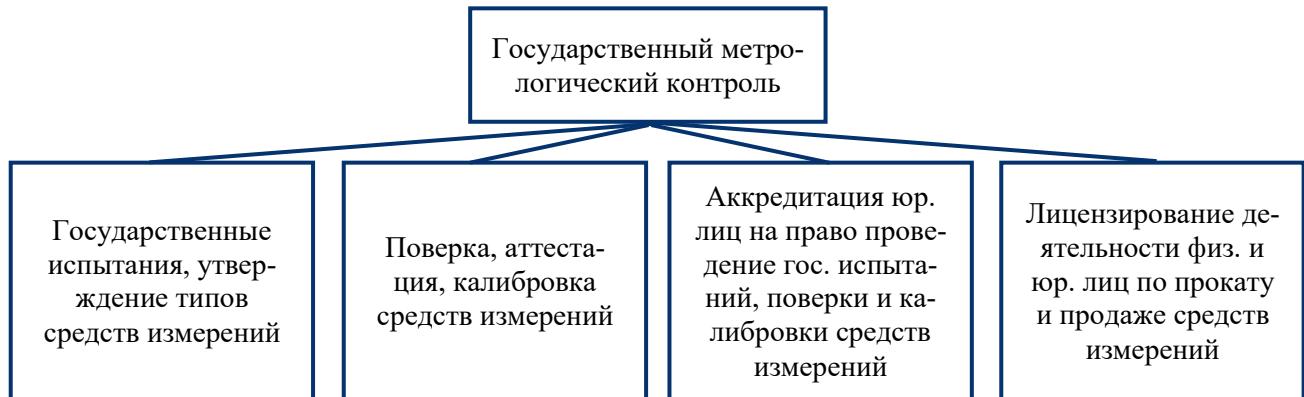


Рисунок 4

К ГМН относят процедуры проверок соблюдения требований Закона «Об единстве измерений», нормативных документов ГСИ (рис.5).

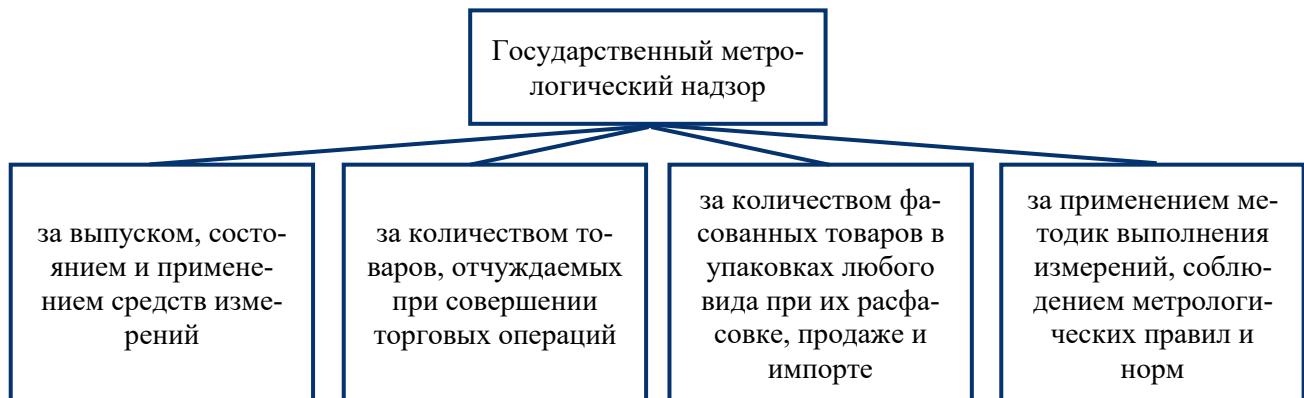


Рисунок 5

#### 1.4. Техническая подсистема обеспечения единства измерений

Техническую подсистему ГСИ составляют:

- совокупность межгосударственных, государственных эталонов и эталонов единиц величин и шкал измерений;
- совокупность военных эталонов – резерва государственных эталонов;
- совокупность стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов;
- совокупность стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;
- средства измерений и испытательное оборудование, необходимое для осуществления метрологического контроля и надзора;

- совокупность специальных зданий и сооружений для проведения высокоточных измерений в метрологических целях;
- совокупность научно-исследовательских, эталонных, испытательных, поверочных, калибровочных и измерительных лабораторий (в том числе передвижных) и их оборудования.

## 2. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ ВИДЫ

В соответствии с *основным уравнением измерений* результат измерения  $x$  представлен в виде:

$$x = NQ,$$

где;  $N$  – действительное число;  $Q$  – единица измерения величины  $x$ .

Для практического выполнения любого измерения недостаточно определить значение единицы физической величины, которая должна быть общепризнанной и воспроизводиться с наивысшей достижимой на данный момент точностью, необходимо в том или ином виде обеспечить передачу ее размера рабочим средствам измерений.

В техническом плане эта задача решается созданием и применением эталонов физической величины, которые во многом определяют современный уровень развития экономики в целом, что подтверждается историей развития эталонов.

Из основного уравнения измерений следует, что измерение с большей точностью, чем точность воспроизведения единицы физической величины эталоном невозможно.

### 2.1. История развития эталонов единиц физических величин

По мере развития техники и международных связей трудности использования и сравнения результатов измерений из-за различия применяемых единиц возрастили, они стали тормозить научно-технический прогресс. Так во второй половине XVIII века в Европе насчитывалось до сотни различных футов, как единиц измерения длины, около полусотни различных миль, свыше 120 различных фунтов. Кроме того, положение сложилось так, что соотношение между дольными и кратными единицами были необычайно разнообразными (например, 1 фут = 12 дюймам = 304,8 мм).

В 1795 г. во Франции была принята метрическая система мер. Было предложено считать единицей длины длину десятимилионной части четверти меридиана Земли, проходящего через Париж. Эту единицу назвали метром. За единицу массы была принята масса  $0,001 \text{ м}^3$  чистой воды при температуре наибольшей

плотности (+4°C); эта единица была названа килограммом. При введении метрической системы была не только установлена основная единица длины, взятая из природы, но и принята десятичная система образования кратных и дольных единиц, что является одним из важнейших ее преимуществ.

В 1872 г. Международной комиссией по прототипам было решено перейти от единицы длины и массы, основанных на естественных эталонах, к единицам, основанным на условных материальных эталонах (прототипах).

В 1875 г. была созвана дипломатическая конференция, на которой 17 государств подписали Метрическую конвенцию. В соответствии с этой конвенцией:

- устанавливались международные прототипы метра и килограмма;
- создавалось Международное бюро мер и весов - научное учреждение, средства на содержание которого обязались выделять государства, подписавшие конвенцию;
- учреждался Международный комитет мер и весов, состоящий из ученых разных стран;
- устанавливался созыв один раз в шесть лет Генеральных конференций по мерам и весам.

Были изготовлены образцы метра и килограмма из сплава платины и иридия. Прототип метра представлял собой платин-иридивую штриховую меру общей длиной 102 см, на расстояниях 1 см от концов которой были нанесены штрихи, определяющие единицу длины - метр.

В 1889 г. в Париже состоялась I-я Генеральная конференция по мерам и весам, утвердившая международные прототипы метра и килограмма, которые были переданы на хранение Международному бюро мер и весов.

До возникновения современной системы СИ в 1960 году несколько десятилетий базовыми единицами считали сантиметр, грамм, секунда (система СГС), потом в качестве базовых величин были выбраны метр, килограмм и секунда (МКС). В 1939 году предложили к ним добавить ампер и в 1946 году была утверждена система единиц МКСА.

В 1954 г. на Генеральной конференции по мерам базовыми единицами в дополнение к метру, килограмму и секунде стали ампер, кельвин и кандел. В 1960 году появилось название International System of Units (SI).

В результате споров и дискуссий между физиками и химиками 14-я конференция проголосовала за базовую единицу количества вещества и в 1971 году моль вошёл в систему СИ, став седьмой основной единицей.

Применение эталонов и договорённости между многими странами мира об их применении имели огромное значение и влияние на развитие международной торговли, сыграли важную роль в науке и в производстве. Но постепенно у учёных накопились претензии к выбранным в качестве эталонов физическим объектам. Нужна большая точность и стабильность эталонов.

В 2019 году вступили в силу кардинальные изменения в определении основных единиц системы СИ состоящие в том, что основные единицы стали определяться через *фиксированные значения фундаментальных физических постоянных*. При этом величины всех единиц остались неизменными, однако из их определений окончательно исчезла привязка к материальным эталонам. Подобные изменения предлагались давно, однако лишь к началу XXI века это стало возможно. Окончательное решение об изменениях было принято XXVI Генеральной конференцией по мерам и весам в 2018 году.

## 2.2. Виды эталонов единиц физических величин

*Эталон единицы физической величины (эталон)* – средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются физической величиной, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений.

Эталон должен обладать следующими основными свойствами:

*Неизменность* – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой единицы в течение длительного интервала времени.

*Воспроизводимость* – возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники.

*Сличаемость* – возможность обеспечения сличения с эталоном других средств измерения, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития измерительной техники.

Различают первичный и вторичные эталоны.

*Первичный эталон* – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью. Это уникальное средство измерений, часто представляющее собой сложный

измерительный комплекс, созданное на основе новейших достижений науки и техники.

*Государственный эталон* – первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства. Утверждение производит главный метрологический орган страны. Точность воспроизведение единицы физической величины соответствует уровню новейших достижений науки и техники. Государственные эталоны подлежат периодическому сличению с первичным эталоном и государственными эталонами других стран.

В составе эталонной базы России 162 государственных первичных эталона.

*Вторичный эталон* – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, предназначены для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона.

Вторичные эталоны по своему метрологическому назначению делятся на:

*эталон сравнения* – эталон, предназначенный для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом;

*эталон-свидетель* – предназначен для проверки сохранности и неизменности первичного или государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты;

*рабочий эталон* – эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Рабочие эталоны применяются во многих территориальных метрологических органах, лабораториях министерств и ведомств.

Погрешности государственных эталонов характеризуются неисключенной систематической погрешностью и случайной погрешностью. Для вторичного эталона указывается суммарная погрешность, включающая случайные составляющие погрешности сличаемых эталонов и погрешности передачи размеров единицы физической величины от первичного эталона, а также систематическую составляющую погрешности самого вторичного эталона.

### **2.3. Эталоны основных единиц системы СИ**

Рассмотрим реализацию эталонов основных единиц физических величин системы СИ на данный момент.

*Единица длины.* В 1983 г. на XVIII Генеральной конференции по мерам и весам было принято определение метра. По этому определению *единица длины – метр* представляет собой расстояние, проходимое светом за  $1/299792458$  долю секунды. Введению такого определения способствовало внедрение в эталонную технику лазеров. При этом размер единицы длины не изменился.

Основными нововведениями были: переход от криптоновой лампы к лазерному излучению в источнике света на эталонных установках; использование в качестве основного постулата постоянство скорости света  $c = 2,997925 \cdot 10^8$  м/с; объединение в одном эталоне воспроизведения размера трех величин: *длины, времени и частоты*; использование в эталоне источников света на пяти различных длинах волн.

*Единица массы.* До 2019 года эталоном килограмма был прототип в виде цилиндра из сплава 90% платины и 10% иридия диаметром 39 мм и такой же высоты.

С 20 мая 2019 года килограмм определяется через фундаментальную константу – постоянную Планка. Теперь килограмм будет определяться количеством энергии, необходимой для того, чтобы сдвинуть с места объект весом в килограмм. Новый эталон массы можно реализовать с помощью весов Киббла.

*Единица времени.* Измерение времени человек естественно связывал с движением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Так, продолжительность суток разбивается на часы, минуты, секунды –  $t = 24 \cdot 60 \cdot 60 = 86400$  с.

Международным бюро по мерам и весам в 1956 г. было принято определение так называемой «эфемеридной секунды»:

$$1 \text{ с} = (1 / 31556925,9747) \text{ тропического года 1900.}$$

Такое определение сохранялось до тех пор, пока не всталась проблема определения единицы времени с относительной погрешностью не хуже  $10^{-10}$ .

В 1967 г. Международный комитет по мерам и весам принял определение единицы времени: единица времени одна *секунда* – равна продолжительности  $9,192631770 \cdot 10^9$  колебаний излучения при квантовом переходе между линиями сверхтонкой структуры атома цезия  $^{133}\text{Cs}$ , соответствующих переходу  $[F = 4; m_F = 0] [F = 3; m_F = 0]$  основного состояния  $^2\text{S}_{1/2}$ .

Эталон единицы времени реализован на установке для наблюдения резонанса в атомном цезиевом пучке – установке для воспроизведения единицы частоты системы СИ – *Герца*. Зафиксировав резонанс атомного пучка на частоте 9 192 631 770 Гц, эталон воспроизводит единицу времени – 1 *секунду*.

*Единица силы тока.* В 1948 г. в основу эталона Ампера были положены токовые весы. Последние представляют собой рычажные равноплечие весы, в которых подвешенная подвижная катушка уравновешивается грузом. Подвижная катушка входит в неподвижную коаксиально расположенную катушку. При прохождении по этим последовательно соединенным катушкам постоянного электрического тока подвижная катушка опускается. Для достижения равновесия на противоположное плечо необходимо положить груз. По его массе и судят о силе электрического тока. Погрешность такого эталона не превышает  $10^{-3}\%$ .

В 1992 г. в качестве государственного первичного эталона силы постоянного электрического тока РФ утвержден эталон, позволяющий значительно повысить точность воспроизведения и передачи размера единицы силы тока (1 мА и 1А) с использованием косвенных измерений силы тока  $I = U/r$ , причем размер единицы электрического напряжения  $U$  – вольт – воспроизводится с помощью квантового эффекта Джозефсона, а размер единицы электрического сопротивления  $r$  – Ом – с помощью квантового эффекта Холла.

В 2019 году введено новое определение ампера: электрический ток, соответствующий потоку  $1/1,6021766208 \times 10^{-19}$  элементарных электрических зарядов в секунду. Для выражения единицы требуется заряд электрона.

*Единица термодинамической температуры.* Термодинамическая температура является универсальной физической величиной, она характеризует состояние многих физических тел и процессов.

Единица термодинамической температуры – Кельвин определяется как  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Тройная точка воды – это такое состояние чистой воды, когда лед, жидкая вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии. В условиях вакуума над тающим льдом устанавливается равновесное давление водяного пара, равное  $p = 611$  Па. Этому состоянию приписано значение термодинамической температуры  $T = 273,16$  К точно. Точка замерзания воды при нормальном атмосферном давлении  $p = 101\ 325$  Па = 1 атм. расположена ниже тройной точки воды на  $0,00993$  К.

XIII Генеральная ассамблея по мерам и весам в 1976 г. наряду с абсолютной термодинамической шкалой утвердила в качестве производной шкалу Цельсия, определив температуру как  $t^\circ\text{C} = (T - 273,15)$  К.

*Единица силы света.* В 1967 году XIII Генеральная конференция по мерам и весам утвердила единицу силы света – канделу.

*Кандела* – сила света в направлении нормали к отверстию абсолютно черного тела, имеющего температуру затвердевания платины  $T=2045$  К и площадь  $1/60\text{ см}^2$  при давлении 101325 Па.

В настоящее время воспроизведение единицы силы света с точностью 0,1% возможно с помощью источника (чаще всего используется вольфрамовая ленточная лампа накаливания, которая подбором силы тока излучает как черное тело с температурой 2045 К) и фотоприемника, рассчитанного на измерение энергетической мощности излучения на длине волны 555 нм. Измерения ведутся в единицах механической мощности – ваттах, а световой поток определяется через механический эквивалент света, равный 683 люмена на ватт (люмен – единица измерения светового потока).

*Единица количества вещества.* Для удобства описания химических процессов в систему СИ введена химическая основная единица – моль. На данный момент принято следующее определение моля: количество вещества системы, которая содержит  $6,022140857 \times 10^{23}$  специфицированных структурных единиц. Для выражения единицы требуется постоянная Авогадро (число Авогадро).

Для эталона числа Авогадро, а через него и моля учёные предлагают создать идеальную сферу из чистого кремния-28. У этого вещества идеально точная кристаллическая решётка, так что количество атомов в сфере можно определить, если точно измерить диаметр сферы (с помощью лазерной системы).

### **3. ПЕРЕДАЧА РАЗМЕРОВ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ**

Обеспечение правильной передачи размера единицы физической величины осуществляется с помощью поверочной схемы.

*Поверочная схема* – нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерения (с указанием метода и погрешности при передаче). Поверочная схема строится в соответствии с ГОСТ 8.061-80 «ГСИ. Поверочная схема. Содержание и построение» и рекомендациями МИ 83-76 «Методика определения параметров поверочных схем».

Различают государственные и локальные поверочные схемы.

*Государственная поверочная схема* – поверочная схема, распространяющаяся на все средства измерений данной физической величины, имеющиеся в стране. Она разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из чертежа поверочной схемы и текста, содержащего пояснения к чертежу.

*Локальная поверочная схема* – поверочная схема, распространяющаяся на средства измерения данной физической величины, применяемая в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (в организации). Локальная поверочная схема не должна противоречить государственной. Она не может быть составлена при отсутствии государственной поверочной схемы.

Поверочная схема включает эталон, объект поверки (средство измерений), метод поверки. Поверочная схема устанавливает метод передачи размера единицы физической величины или нескольких взаимосвязанных величин. Она включает не менее двух ступеней передачи размера. На чертеже поверочной схемы должны быть указаны: наименование средства измерения и метода поверки; номинальные значения физической величины или диапазон ее изменения; допускаемые значения погрешности средства измерения; допускаемые значения погрешностей методов поверки.

#### **4. ПОВЕРКА И КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Метрологическая надежность* средств измерений (СИ) обеспечивается проведением поверки и калибровки путем их периодического проведения через определенное время – *межповерочные интервалы*.

*Поверка* *средств измерений* - совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами) с целью определения и подтверждения соответствия СИ установленным техническим требованиям.

Виды поверок:

*Первичная* – осуществляется при введении в эксплуатацию нового экземпляра СИ, либо после его ремонта;

*Периодическая* – проводится в период эксплуатации СИ, в соответствии с установленными межповерочными интервалами;

*Внеочередная* – выполняется в случае несоответствия знака поверки форме, определенной действующим “Порядком поверки СИ”, воздействия на СИ механических нагрузок или иных неблагоприятных факторов, вызвавших сомнение в правильности его показаний.

*Инспекционная* – производится для выявления пригодности к применению средств измерений при осуществлении государственного метрологического надзора.

Проверку средств измерения могут выполнять Государственные научные метрологические центры (ГНМЦ), региональные центры метрологии, стандартизации и сертификации (ЦСМ), а также юридические лица и индивидуальные предприниматели, аккредитованные в установленном законом порядке.

*Калибровка СИ* – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик (МХ) и (или) пригодности применению СИ, не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору.

В табл. 1 приведены основные требования к поверке и калибровке средств измерений.

Таблица 1

	КАЛИБРОВКА	ПОВЕРКА
Порядок проведения	Добровольный порядок для СИ, не предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.	Обязательный порядок для СИ, допущенных к применению в сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений
Уполномоченные службы	Калибровочные лаборатории или метрологические службы юридических лиц с использованием рабочих эталонов, соподчиненных с государственными эталонами единиц величин.	Государственные научные метрологические центры, региональные центры метрологии, а также юридические лица и индивидуальные предприниматели, аккредитованные в установленном законом порядке.
Результат проведения	Определение действительных значений МХ СИ.	Подтверждение соответствия СИ установленным техническим требованиям.
Способ удостоверения	Калибровочный знак, наносимый на СИ и Сертификат о калибровке, а также запись в эксплуатационных документах.	Знак поверки и Свидетельство поверки, в котором указан срок проведения очередной поверки

Калибровку СИ выполняют калибровочные лаборатории или метрологические службы юридических лиц с использованием рабочих эталонов, соподчиненных с государственными эталонами единиц величин. Средства калибровки (эталоны) подлежат обязательной поверке и при проведении калибровочных работ должны иметь действующие свидетельства о поверке.

Результаты калибровки позволяют определять: действительные значения измеряемой величины; поправки к показаниям средств измерений; погрешность средств измерений.

Проверка и калибровка осуществляются, как правило, путем одновременного измерения рабочим СИ и эталонными средствами по установленным методикам.

Основное принципиальное отличие калибровки от поверки, заключается в следующем:

- калибровка не относится к процедуре подтверждения соответствия;
- подтверждением соответствия является только поверка;
- при калибровке определяются действительные значения МХ СИ и она скорее является исследовательской работой.

Для рабочих и образцовых СИ, не подлежащих государственным испытаниям, опытных и экспериментальных образцов СИ, приобретаемых по импорту в единичных экземплярах или мелкими партиями органами государственной метрологической службы проводится *метрологическая аттестация*.

*Метрологическая аттестация* – это признание СИ узаконенным для применения (с указанием его метрологического назначения и МХ) на основании тщательных исследований его метрологических свойств.

Метрологической аттестации могут подвергаться СИ, не подлежащие государственным испытаниям или утверждению типа органами государственных метрологических служб, опытные образцы СИ, выпускаемые или ввозимые из-за границы в единичных экземплярах или мелкими партиями СИ, измерительные системы и их каналы.

Основными задачами аттестации СИ являются:

- определение МХ и установление их соответствия требованиям нормативной документации;
- установление перечня МХ, подлежащих контролю при поверке;
- опробование методики поверки.

Метрологическая аттестация СИ проводится органами государственной или ведомственной метрологической службой по специально разработанной и утвержденной программе. Результаты оформляются в виде протокола определенной формы. При положительных результатах выдается *Свидетельство о метрологической аттестации* установленной формы, где указывают его установленные МХ.

## 5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПЫТАНИЙ ПРОДУКЦИИ

*Метрологическое обеспечение* – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности проводимых измерений.

На промышленных предприятиях, где и осуществляется основное использование средств измерений, основная ответственность за организацию метрологического обеспечения производства возлагается на метрологическую службу предприятия.

*Основные задачи метрологического обеспечения производства:*

1) обеспечение единства измерений при разработке, производстве и испытаниях продукции;

2) анализ и установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений при контроле показателей качества продукции, параметров технологических процессов, контроле характеристик технологического оборудования;

3) организация и обеспечение метрологического обслуживания средств измерений: учета, хранения, поверки, калибровки, наладки, ремонта;

4) разработка и внедрение в производственный процесс методик выполнения измерений, гарантирующих необходимую точность измерений;

5) осуществление надзора за контрольным, измерительным и испытательным оборудованием в реальных условиях эксплуатации, за соблюдением метрологических правил и норм;

6) проведение метрологической экспертизы конструкторской, технологической документации;

7) организация и обеспечение метрологического обслуживания испытательного оборудования: учет, аттестация в соответствии с установленными требованиями, ремонт;

8) организация и обеспечение метрологического обслуживания средств допускового контроля: учет, аттестация, ремонт;

9) организация и обеспечение метрологического обслуживания измерительных каналов измерительных систем: учет, аттестация, поверка, калибровка, наладка;

10) организация и выполнение особо точных измерений;

11) обеспечение достоверного учета расхода материальных, сырьевых и топливно-энергетических ресурсов;

12) внедрение современных методов и средств измерений, автоматизированного контрольно-измерительного оборудования, измерительных систем;

13) разработка и внедрение нормативных документов, регламентирующих вопросы метрологического обеспечения;

14) оценивание экономической эффективности.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.
2. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. <http://www.fundmetrology.ru>.

## 1. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. Понятие погрешности

Понятие точности является основополагающим понятием метрологии, характеризующим качество любого измерения. Точность характеризует близость к нулю погрешности результата измерения. Количественной оценкой точности является погрешность.

*Абсолютная погрешность результата измерения* – это разница между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины. Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой физической величины

$$\Delta x = x - x_i, \quad (1.1)$$

где:  $x$  – результат измерения,  $x_i$  – истинное значение измеряемой физической величины.

Так как, истинное значение измеряемой величины не известно, на практике используют *действительное значение*  $x_0$  этой величины, под которым подразумевается значение, найденное экспериментально настолько близкое к истинному, что может использоваться вместо него.

$$\Delta x = x - x_0,$$

В случае если  $x$  – показания измерительного средства, то  $\Delta x$  характеризует *погрешность средства измерения* равную разности между показаниями средства измерения и действительным значением измеряемой физической величины.

Определить абсолютную погрешность результата измерения точно нельзя, т.к. в этом случае возможно определение истинного значения. Используя соответствующие метрологические характеристики средства измерения можно оценить предельные значения абсолютной погрешности в виде  $\pm \Delta x$  и из (1.1) определить границы интервала, в котором находится истинное значение измеряемой величины относительно результата измерения  $x$

$$x_i = x \pm \Delta x.$$

Этот интервал наглядно представлен на рис. 1.1

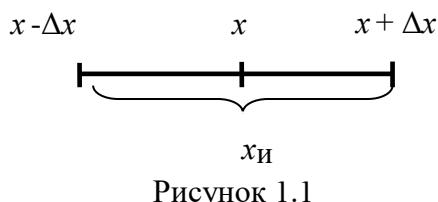


Рисунок 1.1

Вопросы задания метрологических характеристик средств измерений и оценивания погрешности измерений являются основными и будут рассматриваться на протяжении всего изучения данного курса.

## 1.2. Классификация погрешностей

Само понятие погрешность уже рассматривалось выше, в этом разделе хотелось бы остановиться на том, какие виды погрешностей существуют.

Погрешности классифицируются по некоторым признакам. Обобщенная классификация погрешностей приведена на рис. 1.2. Рассмотрим основные признаки классификации погрешностей.

**По способу представления погрешности выделяют:**

*Абсолютная погрешность* соответствует определению (1.1) и выражается в единицах измеряемой физической величины.

*Относительная погрешность* определяется как отношение абсолютной погрешности к истинному  $x$  или действительному значению  $x_d$  измеряемой физической величины  $x$

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\text{и}}} 100 \approx \frac{\Delta x}{x_d} 100 \quad (\%) \quad (1.2)$$

Относительная погрешность является безразмерной величиной, которая, выражается в процентах. Она наглядно отражает точность измерения заданной величины и используется при сравнении результатов измерений.

Для характеристики средств измерения относительная погрешность не удобна, так как она может меняться от достаточно больших значений, если измерения осуществляются в начале шкалы прибора – в области нуля, до меньших – в конце шкалы. Поэтому используется погрешность, приведенная к диапазону измерений измерительного средства – *приведенная погрешность*

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} 100 \quad (\%), \quad (1.3)$$

где  $x_N$  – нормирующее значение, определение которого будет рассмотрено в теме 6.

Приведенная погрешность – безразмерная величина, выраженная в процентах. Она является метрологической характеристикой измерительного средства и может служить основой для определения его класса точности. Класс точности используется для определения погрешности результата измерения полученного с помощью данного измерительного средства.



Рисунок 1.2

### По причине возникновения погрешности различают:

*Методическая погрешность* – погрешность, которая возникает в результате некоторых допущений, упрощений, аппроксимации функциональных зависимостей и др. при выборе принципа (метода) измерения. Методическая погрешность обусловлена:

- отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойства (*погрешность неадекватности*), которое может быть установлено с помощью измерительного эксперимента;
- выбором метода аналого-цифрового преобразования для цифровых измерительных средств.
- влиянием алгоритмов, по которым производятся вычисления результатов измерений (например, алгоритмы нормализации, масштабирования, функционального преобразования для получения результата в цифровых измерительных приборах).

*Инструментальная погрешность* – погрешность, которая определяется несовершенством аппаратной реализации измерительного средства. Эта погрешность зависит от структуры устройства, характеристик электронных элементов схемы, таких как дрейф нуля усилителя, шумов в линиях передачи и контактных соединениях, других особенностей реализации.

Выделение методической и инструментальной составляющих является важным при планировании структуры измерительного эксперимента, при проектировании измерительных устройств, измерительных каналов и систем.

**По влиянию внешних факторов** на результаты измерений различают:

*Дополнительная погрешность или погрешность от влияющих факторов* – это составляющая полной погрешности измерения связанная с воздействием внешних факторов на работу измерительных средств при эксплуатации в условиях отличных от нормальных. Дополнительная погрешность появляется в результате отклонения одной или нескольких влияющих физических величин от нормального значения и выхода ее из области нормальных значений (наиболее распространенные физические величины, оказывающие воздействие: температура, влажность, давление, магнитные и электромагнитные поля, вибрации и др.).

*Основная погрешность* – погрешность средства измерения при его эксплуатации в нормальных условиях и статическом режиме.

Дополнительная и основная погрешности могут носить как систематический, так и случайный характер.

**В зависимости от характера изменения** погрешности при повторных измерениях различают:

*Систематическая погрешность* – это составляющая погрешности измерения, величина которой остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

*Случайная погрешность* – это составляющая погрешности измерения, величина которой изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины  $\Delta_{СЛ}$ . Причины возникновения систематической и случайной составляющих погрешности измерения перечислены выше. При обработке результата измерения систематическая и случайная составляющая суммируются  $\Delta = \Delta_{СИСТ} + \Delta_{СЛ}$ .

Погрешности, обусловленные с резким отклонением результата измерения от действительного значения при воздействии внешних факторов, изменении условий измерительного эксперимента, нарушении плана эксперимента называются *промахами*.

**В зависимости от характера изменения измеряемой величины** различают:

*Статическая погрешность* – это погрешность измерения физической величины, для которой принята гипотеза о неизменности во времени, т.е. постоянной физической величины.

*Динамическая погрешность* – это погрешность, которая возникает дополнительно при измерении физической величины изменяющейся во времени. Динамическая погрешность обусловлена несоответствием показаний измерительного прибора значениям изменяющейся во времени физической величины за счет его инерционности или времени получения результата измерения.

В результат измерения входит сумма статической и динамической составляющих  $\Delta = \Delta_{ст} + \Delta_d$ .

**В зависимости от характера изменения абсолютной погрешности по диапазону измерения** различают: аддитивную и мультипликативную погрешности.

*Аддитивной* называют погрешность, абсолютное значение которой неизменно во всем диапазоне измеряемой величины.

Примером систематической аддитивной погрешности может служить погрешность от неточной установки прибора на 0. Аддитивную погрешность еще называют погрешностью нуля.

*Мультипликативной* называют погрешность, абсолютное значение которой изменяется пропорционально измеряемой величине.

Погрешность конкретного средства измерения включает обе составляющих и в этом случае называется аддитивно-мультипликативной и выражается в виде

$$\Delta x = \pm (\Delta x_a + \Delta x_m) = \pm (a + bx),$$

где  $a$  – аддитивная составляющая погрешности;  $bx$  – мультипликативная составляющая погрешности.

## 2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1 Оценка погрешности измерения

Результатом измерения является некоторое числовое значение измеряемой физической величины, выраженное в единицах этой величины, полученное с погрешностью, которая определяется наряду с методической погрешностью метрологическими характеристиками средства измерения. Основной метрологической характеристикой средства измерения является класс точности.

*Класс точности средства измерений* – обобщенная метрологическая характеристика, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также другими свойствами средства измерений, влияющими на

точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Класс точности используется для оценки пределов основной погрешности, которые могут быть выражены в форме приведенной, относительной или абсолютной погрешностей. Это зависит от характера изменения погрешностей средства измерений в пределах диапазона измерений, а также от условий его применения и назначения.

Примеры обозначения классов точности и формулы для оценки пределов основной погрешности приведены в табл. 2.1.

Зная класс точности измерительного средства можно определить предельное значение допускаемой основной погрешности  $\Delta x$ . В этом случае можно утверждать, что истинное значение измеряемой физической величины находится в интервале

$$x_i = x \pm \Delta x, \quad (2.1),$$

где  $x$  – показание измерительного средства.

Таблица 2.1

Формулы для определения пределов допускаемой основной погрешности СИ: $\gamma$ - приведенной (%); $\delta$ - относительной (%).	Формулы для оценки пределов абсолютной погрешности результата измерения	Примеры обозначения класса точности на средствах измерений и в нормативной документации (указывают числа для $p, q, c, d$ )
$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100 = \pm p$	$\Delta x = \pm \frac{px_N}{100}$	0,5
$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 = \pm q \%$	$\Delta x = \pm \frac{qx}{100}$	(1,0)
$\delta = \pm [c + d(\left  \frac{x_K}{x} \right  - 1)] \%$	$\Delta x = \pm \frac{\delta x}{100}$	0,05/0,02

## 2.1. Правила округления погрешностей

Приведенное выше выражение (2.1) является оценкой интервала, в котором находится истинное значение измеряемой величины. Это выражение получено на основе оценки пределов абсолютной погрешности результата измерения, которую можно вычислить по приведенным в табл. 2.1 формулам. При вычислении получаемые значения могут содержать большое число цифр, что создает впечатление о высокой точности измерений. Возникает задача округления значений абсолютной погрешности до определенного числа значащих цифр, которые являются достоверными.

Рассмотрим, какие правила надо соблюдать для корректного представления результатов измерения. Определим понятие значащих цифр, которыми при записи приближенного числа после округления считаются:

- все ненулевые цифры;
- нули, содержащиеся между ненулевыми цифрами;
- нули, являющиеся представителями сохраненных десятичных разрядов при округлении.

При записи результата измерения в виде соотношения (2.1) используются следующие правила округления:

1. Погрешность оценки измеряемой величины следует выражать не более чем двумя значащими цифрами.
2. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них 1 или 2 и одной, если первая цифра равна или более 3.
3. Число цифр в промежуточных вычислениях при обработке результатов измерений должно быть на две больше, чем в окончательном результате.
4. Погрешность при промежуточных вычислениях должна быть выражена не более чем тремя значащими цифрами.
5. Сохраняемую значащую цифру в погрешности оценки измеряемой величины при округлении увеличивают на единицу, если отбрасываемая цифра не указываемого младшего разряда больше либо равна пяти, и не изменяют, если она меньше пяти.
6. Результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

### **3. ПОГРЕШНОСТЬ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ**

Метрология как любая наука развивается и отражает потребности современного этапа развития науки и общественного производства. На современном этапе это нашло отражение в новом подходе к оценке основного понятия метрологии – точности результатов измерения. Появилось понятие неопределенности измерения, которое наряду с классическим понятием погрешности будет рассмотрено ниже. Оба термина – *погрешность* и *неопределенность* измерения выражают в разных терминах одно и то же понятие – *точность измерения*.

В России исторически при оценке достоверности произведенного измерения используется погрешность. Как уже упоминалось выше, термин погрешность привязан к истинному значению измеряемой величины, которое неизвестно. На практике погрешность определяется как разность между результатом измерения и действительным значением измеряемой величины, применяемым вместо истинного. Таким образом, погрешность имеет единственное значение. В принципе, значение известной погрешности можно учесть, как поправку к результату измерения.

В международной практике часто используют понятие неопределенности (англ. *uncertainty*) для характеристики точности результата измерения. Межгосударственный стандарт ГОСТ 34100.3-2017 [2] дает следующее определение:

**неопределенность** – это параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий разброс значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

Поясним понятие неопределенность. Если измерять одну и ту же величину несколько раз в одинаковых условиях, то, как правило, результаты будут разными вследствие неадекватности принятой модели объекта измерения, случайной погрешности средств измерения, помех др. Неопределенность измерений понимают как неполное знание значений измеряемой величины и для количественного выражения этой неполноты вводят распределение вероятностей возможных (обоснованно приписанных значений) измеряемой величины. Таким образом, параметр этого распределения – неопределенность, количественно характеризует точность результата измерения.

Принципиальное отличие неопределенности от погрешности следующие:

- неопределенность привязана к измеренному значению величины, а не к ее абстрактному истинному значению;
- неопределенность принимает форму интервала значений;
- значение неопределенности не может быть использовано для исправления результатов измерения.

Неопределенность измерения включает множество составляющих [2]. Некоторые из этих составляющих могут быть оценены на основе статистического распределения результатов ряда наблюдений (неопределенность типа А) и охарактеризованы своими стандартными отклонениями (среднее квадратичное отклонение СКО). Другие составляющие оценивают на основании предполагаемых рас-

пределений вероятностей, основанных на опыте или иной информации (неопределенность типа Б) и также могут быть выражены в виде стандартного отклонения.

Результат измерения, как и для погрешности, записывается в виде интервала

$$x = A \pm U,$$

где  $P$  – заданная вероятность  $P$ ,  $A$  – измеренное значение,  $U$  – неопределенности измерения.

Графически интервал, в котором с вероятностью  $P$  находятся значения, которые могли бы быть обоснованно приписаны к измеряемой величине  $x$  (ее возможные значения) представлен на рис.3.1:

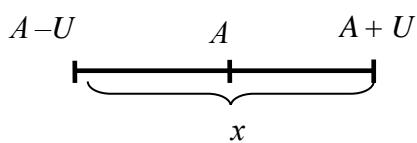


Рисунок. 3.1

Сравните рис. 1.1 (где фигурирует истинное значение  $x_i$ ) и рис. 1.3 (где не используется истинное значение).

Оценив неопределенность, можно прогнозировать результаты последующих измерений: с некоторой вероятностью мы можем ожидать, что они окажутся в пределах области значений (см. рис.3.1), размеры которой характеризуются рассчитанной нами неопределенностью. Оценка неопределенности измерения будет рассмотрена далее в ходе изложения курса.

В табл. 3.1 приведены термины, являющиеся примерными аналогами концепции неопределенности измерения и классической теории точности.

Таблица 3.1

Классическая теория	Концепция неопределенности
Погрешность результата измерения	Неопределенность результата измерения
Случайная погрешность	Неопределенность, оцениваемая по типу А
Неисключенная систематическая погрешность	Неопределенность, оцениваемая по типу Б
СКО (стандартное отклонение) погрешности результата измерения	Стандартная неопределенность результата измерения
Доверительные границы результата измерения	Расширенная неопределенность результата измерения
Доверительная вероятность	Вероятность охвата (покрытия)
Квантиль (коэффициент) распределения погрешности	Коэффициент охвата (покрытия)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.
2. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008/Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

## 1. ИЗМЕРЕНИЕ КАК ПРОЦЕСС ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Измерение в общем случае можно рассматривать как процесс получения количественной информации о значении физической величины. Такой подход позволяет рассматривать конкретные процедуры и средства измерений (СИ) на основе информационного подхода.

Процедура измерений осуществляется с помощью специальных технических средств, которые называются средствами измерений (СИ). По функциональному назначению СИ предназначены для выработки сигналов (показаний), несущих информацию о значениях физических величин (сигналов измерительной информации).

В СИ передача, хранение и отображение информации о значениях измеряемых величин осуществляются с помощью сигналов, которые называют *сигналами измерительной информации*. Сигнал как материальный носитель информации представляет собой некоторый физический процесс, один из параметров которого функционально связан с измеряемой величиной.

Параметр сигнала, функционально связанный с измеряемой величиной, называют *информационным параметром*, а остальные параметры сигнала называют *неинформационными*.

В электрических средствах измерений наиболее часто применяют электрические сигналы, информативными параметрами которых могут быть мгновенные значения постоянных токов и напряжений, амплитудные, средневыпрямленные или действующие значения синусоидальных токов и напряжений, а также их частота или фаза и др.

### 1.1. Виды сигналов измерительной информации

Существует множество различных видов сигналов. Важным классификационным признаком сигналов является характер их изменения во времени и по уровню (по информативному параметру). По этому признаку различают непрерывные, или аналоговые, и дискретные сигналы.

*Аналоговый по информативному параметру сигнал* принимает любое значение в заданном диапазоне.

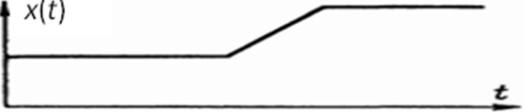
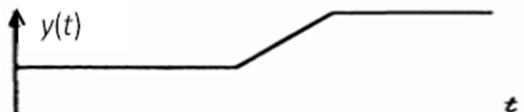
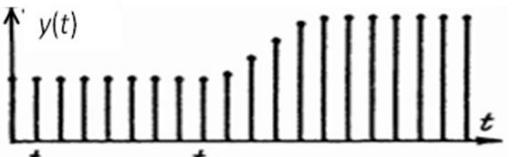
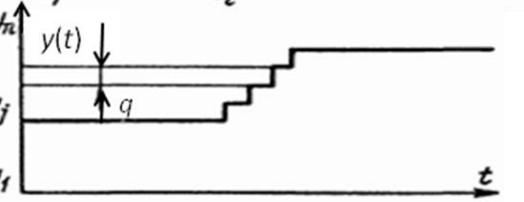
*Дискретный по времени сигнал* имеет значения только в определенные моменты времени и представлен своими отсчетами  $x(t_i)$  моменты времени  $t_i$ .

*Дискретные по уровню* сигналы называют также *квантованными сигналами*, которые представлены рядом фиксированных значений в заданном диапазоне.

Сигналы дискретные по времени и по уровню представлены кодом и их называют *цифровыми сигналами*.

Виды сигналов измерительной информации приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Виды сигналов измерительной информации	Вид сигнала	Представление сигнала
	Исходный сигнал $x(t)$	$x(t)$
	Аналоговый по информативному параметру и непрерывный по времени $y(t)$	$y(t) = kx(t)$
	Аналоговый по информативному параметру и дискретный по времени $y(t)$	$y(t_i) = \{kx(t_i)\}$
	Аналоговый по информативному параметру и дискретный по времени	$y(t_j) = kx_j(t)$
	Дискретный по времени и квантованный по уровню	$y_j(t_i) = \{kx_j(t_i)\}$

В технике широко в качестве сигналов измерительной информации применяются *гармонические сигналы*

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$

в которых информативными параметрами могут быть амплитуда  $A$ , частота  $f$  или фаза  $\phi$ . Изменение информативного параметра гармонического сигнала в соответствии с изменением измеряемой величины  $x$  называют модуляцией этого сигнала (см. табл. 1.2).

Если с изменением  $x$  в гармоническом сигнале меняется один из параметров  $A$ ,  $\omega$  или  $\phi$ , то говорят, что осуществляется соответственно амплитудная, частотная или фазовая модуляция. При фазовой модуляции фаза сигнала определяется относительно второго (опорного) гармонического сигнала  $y_0$ .

Таблица 1.2

Виды модуляции	Информативный параметр	Неинформационные параметры
	Исходный сигнал $x(t)$	
	Амплитудная $A = F(x)$	$f; \varphi$
	Частотная $f = F(x)$	$A; \varphi$
	Фазовая $\varphi = F(x)$	$A; f;$

## 1.2. Виды измерительных преобразований

При прохождении сигналов измерительной информации в СИ сигналы преобразуются из одного вида в другой, более удобный для последующей передачи, хранения, обработки или восприятия оператором.

В общем случае СИ можно представить в виде структурной схемы, элементами которой являются звенья, которые осуществляют определенное измерительное преобразование и связи между ними.

Для иллюстрации таких преобразований на рис. 1.1 приведен пример структурной схемы прибора, предназначенного для измерения температуры.

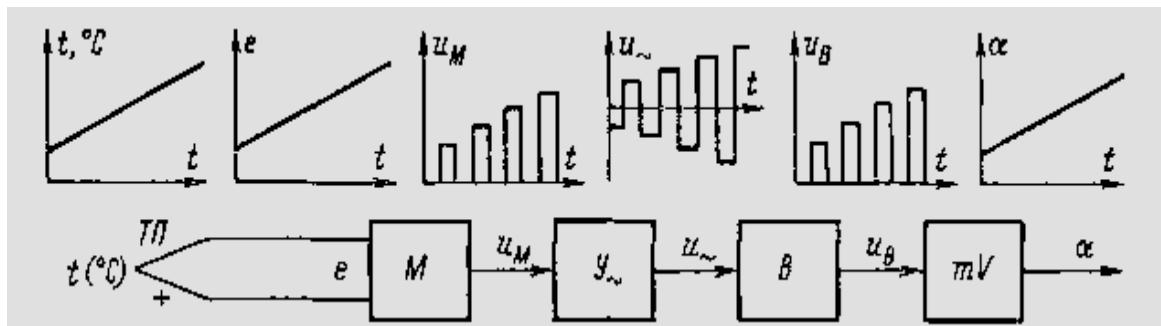


Рисунок 1.1

На выходе термопары  $T\pi$  возникает сигнал измерительной информации – термоЭДС  $e$ , которая зависит от измеряемой температуры  $T(^{\circ}\text{C})$ . Этот сигнал преобразуется модулятором  $M$  в прямоугольные импульсы напряжения  $u_M$ , амплитуда которых пропорциональна термоЭДС. Переменная составляющая сигнала  $u_M$

усиливается усилителем  $Y_{\sim}$  переменного тока и преобразуется в однополярные импульсы  $u_v$  выпрямителем  $B$ . Выходной сигнал выпрямителя подается на милливольтметр  $mV$ , вызывая отклонение его указателя на некоторый угол.

В данной схеме сигналы  $e$ ,  $u_m$ ,  $u_{\sim}$ ,  $u_v$  – есть сигналы измерительной информации. Измеряемую величину – температуру в рассматриваемом примере называют входным сигналом для первичного измерительного преобразователя.

В общем случае структурную схему СИ можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рис. 1.2.

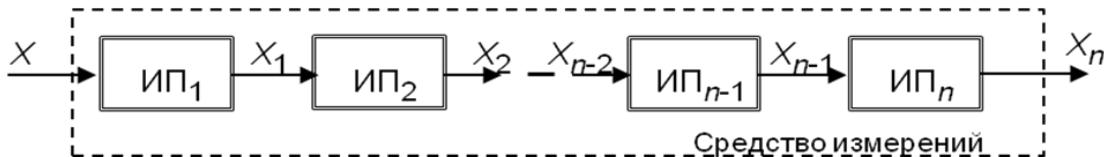


Рисунок 1.2.

Структурная схема включает ряд звеньев – измерительных преобразователей (ИП), каждый из которых осуществляет определенное измерительное преобразование.

Основной характеристикой ИП является *статическая функция преобразования*, которая выражает зависимость между информативными параметрами входного и выходного сигналов.

В зависимости от вида входной и выходной величины отдельного ИП их можно разделить на следующие виды, приведенные в табл.1.3.

Таблица 1.3

Измерительный преобразователь (ИП)	Входной сигнал	Выходной сигнал	Функция преобразования
 Аналоговый ИП	Аналоговый	Аналоговый	$X_{\text{вых}} = F(X_{\text{вх}})$
 Аналого-цифровой ИП	Аналоговый	Цифровой (код)	$N = F(X)$
 Цифро-аналоговый ИП	Цифровой (код)	Аналоговый	$X = F(N)$
 Цифровой ИП	Цифровой (код)	Цифровой (код)	$N_{\text{вых}} = F(N_{\text{вх}})$

Особое значение в СИ имеет аналого-цифровое преобразование, которое позволяет обрабатывать, передавать, хранить отображать результаты измерений с помощью информационных технологий.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

*Средство измерений (СИ) – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. Ключевой признак в определении СИ – наличие нормированных метрологических характеристик.*

Средство измерений (СИ) реализует в той или иной форме процедуру сравнения измеряемой или воспроизводимой величины с мерой.

По функциональному назначению СИ предназначены для выработки сигналов (показаний), несущих информацию о значениях физических величин (сигналов измерительной информации), или воспроизведения физических величин заданного размера

Существует огромное количество различных средств измерений. По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, выделяют:

- образцовые СИ (эталоны);
- рабочие СИ.

Образцовые СИ предназначены для метрологических целей: воспроизведения физических величин заданного размера, хранения и передачи их рабочим средствам. Образцовые средства относительно малочисленны и ими, в основном, занимаются в соответствующих научно-исследовательских институтах.

*Рабочее средство измерений* – средство измерений, предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений. Рабочие СИ широко используются в научных экспериментах и технических испытаниях, не связанных с метрологическими задачами. Рабочие СИ составляют основной парк средств измерений.

В зависимости от функционального назначения рабочих СИ различают (см. рис. 2.1):

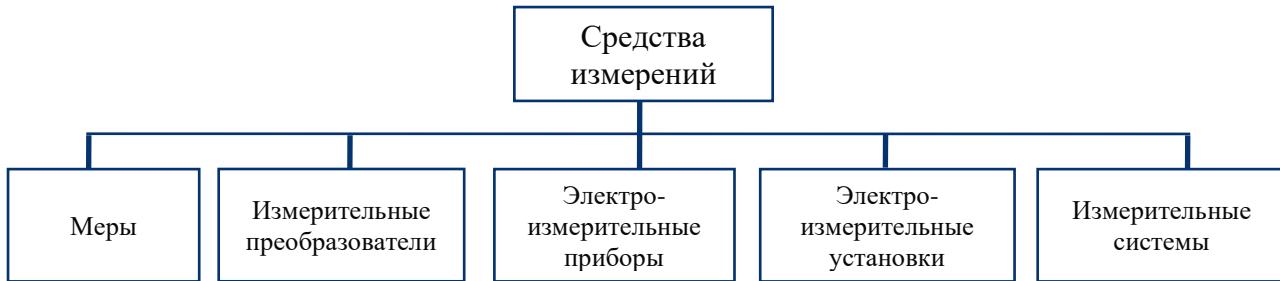


Рисунок 2.1

*Меры* – СИ, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Мерами называют средства измерений, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

По назначению меры делят на образцовые и рабочие. Меры, утвержденные в качестве образцовых, (их часто называют рабочие эталоны) предназначаются для поверки и градуировки рабочих средств измерений. Рабочие меры служат для измерений.

По точности воспроизведения физической величины образцовые меры бывают 1, 2 и 3-го разрядов, причем наименьшая погрешность воспроизведения у меры 1-го разряда. По допускаемой погрешности воспроизведения значения физической величины рабочие меры относят к разным классам точности.

Различают следующие разновидности мер: однозначные меры, многозначные меры, магазины мер и наборы мер.

*Однозначные меры.* Однозначные меры воспроизводят физическую величину одного размера. К ним относятся однозначные меры сопротивления, индуктивности, взаимной индуктивности, емкости, ЭДС (напряжения).

*Многозначные меры.* Многозначные меры воспроизводят физическую величину разных размеров. К ним относят измерительные генераторы, калибраторы напряжения, тока и фазового сдвига, измерительные конденсаторы переменной емкости и вариометры – меры переменной индуктивности.

*Измерительные генераторы.* Измерительные генераторы – это источники переменного тока и напряжения, форма которых заранее известна, а частота, амплитуда и некоторые другие параметры могут регулироваться в определенных пределах и отсчитываться с гарантированной точностью. По форме выходного сигнала они делятся на генераторы синусоидальных сигналов (от сотых долей герца до  $10^{10}$  Гц), шумовых сигналов, импульсных сигналов и сигналов специальной формы.

*Калибраторы.* Калибраторы напряжения и тока – это стабилизованные источники напряжения или тока, дающие возможность получать на их выходе ряд калиброванных, т. е. точно известных значений сигналов. Промышленность выпускает калибраторы постоянного и переменного тока и напряжения. Некоторые

калибраторы снабжаются управляющим устройством, позволяющим использовать их в составе автоматизированных поверочных устройств.

*Магазины мер.* Магазины мер – это наборы мер, конструктивно объединенных в единое устройство, имеющее приспособления для их соединения в различных комбинациях. Существуют магазины сопротивлений, емкости и индуктивности.

*Измерительный преобразователь* (ИП) – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащие для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации и передачи, не подлежащий непосредственному восприятию наблюдателя.

По характеру преобразования различают аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые ИП.

По месту в измерительной цепи различают первичные и промежуточные ИП. На первичный ИП непосредственно действует измеряемая величина. Такие преобразователи называют датчиками, сенсорами.

Среди промежуточных ИП выделяют *нормализующие* ИП, которые преобразуют выходной сигнал датчиков в унифицированный сигнал, удобный для дальнейшего преобразования – постоянное напряжение или ток, частоту.

Выделяют также масштабные измерительные преобразователи. Примеры – измерительные усилители, дискретные делители напряжения, измерительные трансформаторы тока и т. д. Это достаточно распространенный вид средств измерений.

Все измерительные преобразователи подразделяют также на два больших подвида – измерительные преобразователи электрических величин в электрические и измерительные преобразователи неэлектрических величин в электрические, которые подробно будут рассмотрены в дальнейшем.

*Измерительный прибор* – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Измерительные приборы – довольно распространенный вид средств измерений. В этой связи измерительные приборы имеют свою довольно разветвленную классификационную структуру.

Так, по виду измеряемой величины измерительные приборы бывают амперметрами, вольтметрами, частотомерами и т. п.; по виду выходного сигнала – аналоговыми и цифровыми; по форме представления выходного сигнала – показывающие и регистрирующие; по конструктивным признакам – стационарные и переносные.

Более подробно электроизмерительные приборы будут рассмотрены в дальнейшем.

*Электроизмерительная установка* – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерения одной или нескольких физических величин и расположенная на одном месте. Типовым примером таких средств может служить поверочные установки. На таких установках проводится технологический цикл поверки какого-либо типа (или типов) приборов при их массовом производстве. Поскольку процедура поверки и необходимые средства для ее проведения заранее предписаны, применение установки существенно повышает эффективность проведения указанного технологического цикла.

*Измерительная система* (ИС) – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в различных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, ответственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

ИС могут применяться как автономно, так и в составе различных комплексов, включающих в себя, кроме средств измерений и вычислительных устройств устройства автоматического управления, а в ряде случаев и устройства принятия решения о состоянии объекта исследования.

Особое место среди ИИС занимают автоматизированные системы научных исследований (АСНИ), предназначенные для экспериментальных исследований в науке и технике и для проведения комплексных испытаний различных объектов.

Для ИС вводится понятие *измерительного канала* – конструктивно или функционально выделяемая часть ИС, выполняющая законченную функцию от 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.

ИС, предназначенные для измерения нескольких величин называют *многоканальными*.

Создание и применение ИИС на данном этапе развития науки и техники связано с широким применением современных информационных технологий.

*Информационная технология* – совокупность средств и методов сбора, обработки, передачи, отображения данных (первой информации) для получения

информации нового качества о состоянии объекта, процесса или явления (информационного продукта).

С учетом определения информационной технологии ИС можно представить как единую технологическую цепочку от измерения ряда физических величин (получения измерительной информации) до отображения полученных после обработки и хранения результатов (см. рис. 2.2).

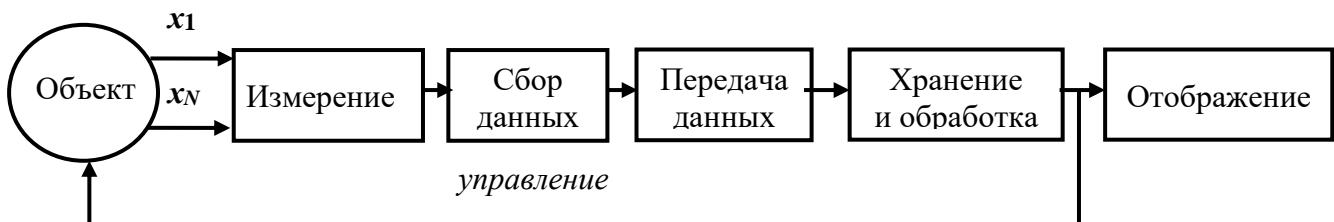


Рисунок 2.2

На вход ИС от объекта поступает множество величин  $x_1 \dots x_N$ , изменяющихся во времени и (или) распределенных в пространстве. На выходе ИС получают результаты измерений в виде именованных чисел или отношений измеряемых величин. Такие системы могут выполнять прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения. Наиболее распространены измерительные системы для прямых измерений.

По результатам измерений на основе их анализа может решаться задача контроля и управления объектов. Эта задача решается в измерительных контролирующих и измерительных управляющих системах.

Для построения ИС используется современное аппаратно-программное обеспечение и цифровое представление данных: микроэлектронная элементная база в виде АЦП и цифровых запоминающих устройств на основе БИС; устройств цифровой обработки данных на основе микроконтроллеров; устройств отображения на основе ЖК мониторов и т. д.

В зависимости от назначения ИС разделяют на измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие. Также различают ИИС ближнего действия и ИС дальнего действия – телеметрические системы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.
2. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. <http://www.fundmetrology.ru>.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ НОРМИРОВАНИЕ

### 1. ВИДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для выбора средств измерений (СИ) при решении конкретных задач измерений, а также оценки погрешностей их результатов необходимо располагать соответствующими характеристиками, которые можно разделить на два вида: метрологические и неметрологические (см. рис. 1.1). Важнейшими характеристиками СИ являются метрологические характеристики (MX) СИ.



Рисунок 1.1

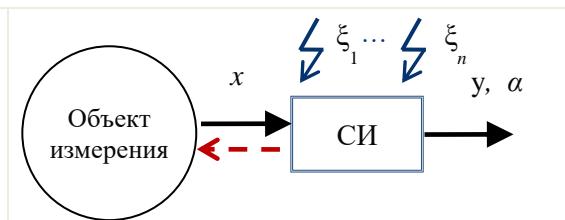


Рисунок 1.2

*Метрологическая характеристика средства измерений* – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность. Совокупность MX оказывает существенное влияние на результат и погрешность измерений и во многом определяет возможности использования СИ при решении тех или иных измерительных задач.

Для СИ важными являются также *неметрологические* (технические, эксплуатационные) характеристики, которые не влияют на результаты измерений: габариты, вес, надежность, потребляемая мощность и др.

В общем случае применение СИ в реальных условиях можно представить в следующем виде (см. рис. 1.2). Измерение происходит при определенных внешних условиях, которые оказывают влияние на результат измерения, что проявляется в изменении выходной величины СИ  $y$  или показаний прибора  $\alpha$ . Внешние условия можно характеризовать совокупностью влияющих факторов:  $\xi_1 \dots \xi_n$ , к которым относятся, например, температура, внешнее электромагнитное поле и т.д.

Различают несколько групп MX, объединенных своим назначением:

1. MX, предназначенные для определения результатов измерений;
2. MX основной погрешности средства измерений;
3. MX чувствительности средства измерений к влияющим величинам;
4. MX влияния средства измерения на измеряемую величину;
5. Динамические характеристики средства измерения;
6. Неинформационные параметры сигналов измерительной информации.

Виды МХ будут рассмотрены ниже.

## 2. НОРМИРОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Метрологические свойства конкретных СИ (типов приборов, отдельных экземпляров и т. п) должны быть представлены необходимой совокупностью МХ с определенными числовыми значениями их параметров. Такое представление реализуется путем нормирования МХ СИ.

*Нормирование* – установление номинальных значений МХ для данного типа СИ и допускаемых границ их отклонений для конкретного экземпляра СИ.

При нормировании МХ для типа (множества) СИ устанавливается некоторая единая, усредненная по множеству приборов, номинальная характеристика. Установление номинальных МХ связано с идеализацией, присущей любой модели реальной характеристики, а для типа приборов и с усреднением характеристик по множеству СИ данного типа.

Номинальные характеристики и пределы допускаемых отклонений представляют в виде чисел, формул, таблиц, графиков.

Если МХ СИ представлена в виде некоторой функции от измеряемой величины, например, функция преобразования, то задают допустимые отклонения реальной характеристики от номинальной.

Так, представление номинальной статической характеристики преобразования  $y = F(x)$  в виде линейной функции с конкретными параметрами является идеализацией реальной. При этом реальная характеристика может иметь другие параметры или быть даже нелинейной. Важным здесь является установление допускаемых границ отклонений реальных МХ от номинальных.

Если МХ представляет некоторый параметр, например входное сопротивление прибора, то для него указывает граничные значения для этого параметра.

В общем случае процедура нормирования МХ включает:

- выбор комплекса МХ для типа СИ (или для отдельных средств);
- определение способов оценки МХ;
- выбор способа представления МХ.

Такая процедура предназначена для разработчиков и изготовителей средств измерений, а также для служб метрологической поверки характеристик этих средств.

Выбор комплекса МХ подчинен задаче определения такой совокупности характеристик, которая позволяет определять результаты и погрешности измерений средствами данного типа. Способы оценки МХ оговариваются в соответствую-

щих государственных стандартах на СИ, утвержденных государственными метрологическими службами. Сведения по МХ на СИ приводят в соответствующей *нормативно-технической документации* (описаниях, паспортах и других документах), а часть из них указывают на самих средствах.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В общем случае применение СИ можно представить в следующем виде (см. рис. 3.1). На рис. 3.1 приняты следующие обозначения: СИ – средство измерений,



Рисунок 3.1

$x$  – обобщенное обозначение входного воздействия (инвариантное к конкретной измеряемой величине –  $I$ ,  $U$ ,  $P$  и т. п.),  $y$  – выходной сигнал, или сигнал измерительной информации; в том случае, если необходимо подчеркнуть, что выходной сигнал является визуально наблюдаемым обычно используют в качестве обозначения выходного сигнала греческую букву « $\alpha$ ».

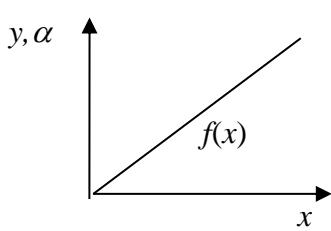
*Функция преобразования измерительного преобразователя или прибора  $f(x)$*  устанавливает связь между информативными параметрами выходной  $y$  и входной величин  $x$ :

$$y = f(x).$$

Форма представления функции преобразования может быть различной: в виде аналитической зависимости, в виде таблиц или в виде графиков.

На рис. 3.2 в качестве примеров показаны: а) линейная функция преобразования; б) нелинейная функция преобразования.

а)



б)

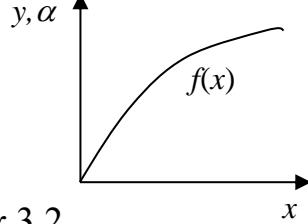


Рисунок 3.2

Примерами аналитической формы представления функции преобразования могут служить зависимости угла отклонения подвижной части электромеханических приборов от измеряемой величины. В тех случаях, когда аналитические зависимости довольно сложные, или зависимости были установлены экспериментально, применяют табличную форму представления функции преобразования. Фрагмент такого

Таблица 3.1

°C	R, Ом
0	100,00
10	103,90
20	107,79
30	111,67

представления для платиновых термометров сопротивления типа Pt-100 иллюстрирует табл. 3.1, в которой для некоторых дискретных точках представлена зависимость сопротивления термометра от температуры.

Следует различать *номинальную* функцию преобразования  $y = f_n(x)$ , которую записывают в нормативно-техническую документацию данного типа СИ и которая обобщенно характеризует весь ряд этого типа СИ, и *реальную* функцию преобразования –  $y = f_p(x)$ , присущую конкретному экземпляру данного типа средств измерений.

Отличие реальной функции преобразования от номинальной определяется допустимым разбросом характеристик и может быть обусловлено, в частности, технологией изготовления этих средств. Реальная функция преобразования конкретного СИ может быть определена только экспериментальным путем. Границы допускаемых отклонений номинальной характеристики в нормальных условиях должны включать все составляющие погрешности, возникающие при нормировании.

Например, номинальный коэффициент преобразования (усиления)  $k_n = 500$  измерительного усилителя и допустимая относительная погрешность  $\delta(k_n) = 2\%$  этого коэффициента означают, что реальный коэффициент усиления, не зависимо от причин отклонения от номинального, должен находиться в пределах  $k = k_n \pm \delta(k_n)k_n/100 = 500 \pm 10$  для любого конкретного экземпляра усилителя данного типа в нормальных условиях эксплуатации.

Вид функции преобразования может быть различным в зависимости от принципа действия и способов реализации СИ. Однако крайне важно, чтобы функция была линейной. Кроме очевидного удобства в использовании, линейная функция позволяет существенно уменьшить инструментальную составляющую погрешности измерений и при конструировании СИ часто применяют различные способы линеаризации функции преобразования.

Функция преобразования достаточно полно характеризует СИ с точки зрения получения результатов измерений. В то же время во многих случаях для определения результатов измерений можно пользоваться относительно простыми характеристиками, которые по существу являются некоторыми численными параметрами функции преобразования.

*Коэффициент преобразования –  $k = y/x$* ; по тем же причинам бывают номинальный  $k_n$  и реальный  $k_p$  коэффициенты преобразования. В общем случае этот коэффициент имеет размерность [ед. изм.  $y$ /ед. изм.  $x$ ]. Коэффициенты преобра-

зования могут иметь свои названия, например, для измерительного усилителя часто используют понятие коэффициент усиления. Для линейной функции преобразования  $k_h = \text{const}$ , для нелинейной – зависит от входного сигнала  $k_p(x)$ .

*Чувствительность* – свойство СИ, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины –  $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ .

Для измерительных приборов часто используют также понятие – *постоянная прибора*  $C = 1/S$ . Для линейной функции преобразования  $S = 1/C = k$ , что весьма удобно при эксплуатации измерительного прибора. Для нелинейной функции преобразования чувствительность  $S(x)$  зависит от входного сигнала.

Для измерительных приборов важной МХ является *цена деления шкалы*  $C_d$ , равная разности двух значений величины, соответствующих двум соседним отметкам на шкале прибора. В случае равномерной шкалы  $C_d$  одинакова на всём ее протяжении.

*Порог чувствительности*  $\Delta x_{\text{порог}}$  – характеристика СИ в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

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

*Диапазон показаний* – область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы.

Разницу между диапазоном измерений и диапазоном показаний легко проиллюстрировать на примере электромагнитного амперметра. Такой прибор в силу принципа действия имеет нелинейную шкалу. Линейный участок шкалы в пределах ( $\approx 15\dots 100$ )% всей шкалы. Данный диапазон является диапазоном измерений. В начальной части шкалы (до  $\approx 15\%$ ) прибор в силу принципа действия реагирует на входной ток, но в этой части шкалы не обеспечена погрешность измерений, то есть амперметр «показывает, но не измеряет». В этом смысле весь диапазон шкалы (0…100)% является диапазоном показаний.

*Пределы измерений* – наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений. Применяют понятия нижний предел и верхний пределы измерений.

## 4. НОРМИРОВАНИЕ ОСНОВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

### 4.1. Нормирование основной погрешности мер

Для однозначных мер МХ являются их номинальные значения, а для много-значных мер – воспроизводимые значения. Для магазина мер задается диапазон воспроизводимой величины.

Для однозначных мер предел допускаемой основной погрешности представляют в форме относительной погрешности. Класс точности однозначной меры устанавливает *предел допускаемой основной относительной погрешности*  $\delta$  (%) в виде числа  $k$ , удовлетворяющему выражению

$$\delta = 100\Delta x / x_0 = \pm k,$$

где  $x_0$  – номинальное значение меры,  $\Delta x$  – предел допускаемой абсолютной погрешности меры.

Для однозначной меры оценить пределы допускаемой основной абсолютной погрешности можно по формуле

$$\Delta x = \pm kx_0 / 100,$$

где  $x_0$  – номинальное значение меры.

Для многозначной меры (конденсатор переменной емкости, вариометр и т.п.) класс точности устанавливает *предел допускаемой приведенной погрешности*. Оценить пределы допускаемой относительной погрешности многозначной меры, выраженный в процентах от воспроизводимого значения величины  $x$  можно по формуле

$$\delta = \pm k x_{max} / x, \quad \% \quad (4.1)$$

где  $k$  – класс точности;  $x_{max}$  – наибольшее значение меры;  $x$  – воспроизводимое мерой значение.

Для магазинов мер и многозначных мер класс точности указывается в виде двух чисел  $c/d$ . Тогда пределы допускаемой относительной основной погрешности (%) воспроизводимой величины определяется по формуле

$$\delta = \pm \left[ c + d \left( \frac{x_{max}}{x} - 1 \right) \right], \quad \% \quad (4.2)$$

где  $c/d$  – класс точности;  $x_{max}$  – верхний предел магазина;  $x$  – воспроизводимое значение.

Оценить пределы допускаемой абсолютной погрешности многозначной меры или магазина мер для воспроизводимого значения  $x$  можно для относительной погрешности  $\delta$ , определенной по (4.1) или (4.2) по формуле:

$$\Delta x = \pm \delta x / 100,$$

Отметим, что приведенные формулы относятся к нормальным условиям применения мер.

При отличии внешних условий от нормальных присутствует также дополнительная погрешность.

#### 4.2. Нормирование основной погрешности измерительных преобразователей

Для измерительных преобразователей для получения результата измерения используется номинальная функция преобразования, отличная от реальной функции. На рис. 4.1 показаны линейная номинальная  $y_n = F_n(x)$  и нелинейная реальная функции преобразования  $y_p = F_p(x)$ . Номинальный коэффициент преобразования  $k_n = \text{const}$  зафиксирован в техническом описании преобразователя, а реальный  $k_p(x)$  зависит от входного сигнала и, как правило, неизвестен.

На рисунке 4.1 показано, что реальная характеристика преобразования  $F_p(x)$  отличается от номинальной  $F_n(x)$ . В результате этого на выходе измерительного преобразователя получается не номинальный сигнал  $y_n$ , а реальный сигнал  $y$ .

Для измерительных преобразователей различают погрешности по выходу и по входу. Пусть на вход измерительного преобразователя подается сигнал, равный  $x$ . Ожидаемый сигнал на выходе преобразователя в соответствии с его номинальной характеристикой должен быть равным  $y_n$ . Однако в соответствии с реальной характеристикой  $F_p(x)$  реальный выходной сигнал будет равен  $y$ .

*Абсолютная погрешность  $\Delta y$  измерительного преобразователя по выходу равна*

$$\Delta y = y - y_n = F_p(x) - F_n(x). \quad (4.3)$$

*Погрешность измерительного преобразователя по входу – это отклонение приведенного ко входу сигнала измерительной информации от истинного (действительного) значения измеряемой величины, вызванное свойствами самого измерительного преобразователя. Результат измерения  $x$  определяется через обратную номинальную функцию преобразования и тогда абсолютная погрешность измерительного преобразователя по входу равна*

$$\Delta x = F_n^{-1}(x) - x. \quad (4.4)$$

Погрешности по выходу (4.3) и входу (4.4) связаны соотношением

$$\Delta x = \Delta y / k_n. \quad (4.5)$$

Рассмотренные погрешности носят систематический характер, поскольку в отсутствие других факторов (помех, изменяющихся условий работы) они являются постоянными и повторяющимися для конкретных входных сигналов.

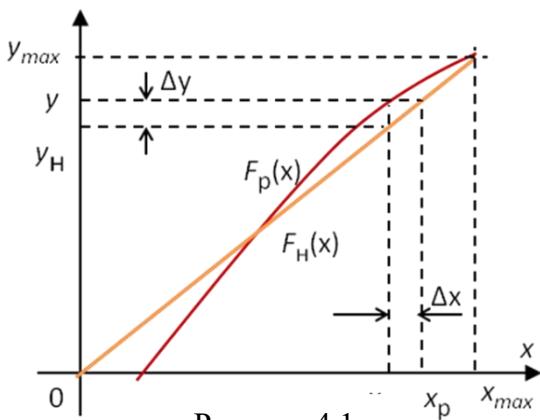


Рисунок 4.1

Другой причиной возникновения погрешностей является наличие внешних и внутренних помех, которые приводят к искажению выходных сигналов. Как правило, возникающие при этом погрешности, носят случайный характер.

Кроме того, существенное влияние на характеристики СИ могут оказывать внешние факторы, такие как температура, влажность, напряжение питания и многие другие. Эти факторы могут привести к дополнительным погрешностям.

При нормировании, как правило, указывают предел допускаемой абсолютной погрешности, которые определяются отклонением реальной функции преобразования от номинальной.

### 4.3. Нормирование основной погрешности приборов

При проведении измерения с помощью конкретного прибора получают определенный результат измерения, например, в виде его показаний  $a$ . При определении основной погрешности исходят из двух условий:

1. Статический режим измерения, при котором измеряемая величина не меняется во времени;
2. Нормальные условия эксплуатации, при которых значения влияющих факторов равны номинальным значениям.

В этом случае основная погрешность прибора не зависит от характера изменения измеряемой величины и от изменения внешних влияющих факторов и является характеристикой прибора.

Для представления результата измерения необходимо оценить основную абсолютную погрешность измерения

$$\Delta x = x - x_0, \quad (4.6)$$

где  $x$  – результат измерения,  $x_0$  – действительное значение измеряемой физической величины.

Для оценки погрешности результатов измерения используются определенная метрологическая характеристика СИ – его класс точности [1].

*Класс точности СИ* – обобщенная характеристика данного типа СИ отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Пределы допускаемой погрешности понимаются как границы интервала, в котором находятся значения погрешности.

*Предел допускаемой погрешности СИ* – наибольшее значение погрешности СИ, устанавливаемое нормативным документом для данного типа СИ, при котором оно еще признается годным к применению. Предел допускаемой основной погрешности представляют в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей.

Рассмотрим способы нормирования основной погрешности путем задания класса точности для важнейшего класса средств измерений – электроизмерительных приборов. Возможны три способа задания класса точности в зависимости от характера изменения основной погрешности по диапазону измерения.

Для приборов аддитивным характером изменения абсолютной погрешности класс точности устанавливает *пределы допускаемой приведенной основной погрешности*  $\gamma$  (%) в виде числа  $p$ , удовлетворяющего выражению

$$\gamma = 100 \Delta x / x_N = \pm p, \quad (4.7)$$

где  $\pm \Delta x$  – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности;  $x_N$  – нормирующее значение.

Класс точности прибора обозначают числом  $p$ , выбираемым из ряда

$$(1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0)10^n, \quad (4.8)$$

где  $n = 1; 0; -1; -2 \dots$

Нормирующее значение  $x_N$  в (4.7) в зависимости от предела измерения прибора равно:

- 1) большему из пределов измерений, если нулевая отметка расположена на краю или вне диапазона измерения;
- 2) сумме модулей пределов измерения, если нулевая отметка расположена внутри диапазона измерения;
- 3) длине шкалы или её части, соответствующей диапазону измерения, если шкала существенно неравномерна, например, у омметра;
- 4) номинальному значению измеряемой величины, если таковое установлено (например, у частотометра с номинальным значением 50 Гц);
- 5) модулю разности пределов измерений, если принята шкала с условным нулём (например, для температуры), и т.д.

Для приборов с мультиплексивным характером изменения основной абсолютной погрешности

$$\Delta x = bx, \quad$$

класс точности устанавливает *пределы допускаемой основной относительной погрешности*  $\delta$  (%) в виде числа  $q$ , удовлетворяющему выражению

$$\delta = 100\Delta x / x = \pm q, \quad (4.9)$$

где  $x$  – значение измеряемой величины в диапазоне измерений.

Класс точности в этом случае обозначается как число  $q$ , выбираемое из ряда (4.8) и помещенного в кружок.

Для приборов с аддитивно-мультипликативным характером изменения основной абсолютной погрешности ее пределы задается в виде суммы аддитивной  $\Delta x_a$  и мультипликативной  $\Delta x_m$  составляющих

$$\Delta x = \pm (\Delta x_a + \Delta x_m) = \pm (a + bx), \quad (4.10)$$

где  $a, b$  – некоторые положительные числа;  $x$  – значение измеряемой величины.

Класс точности обозначается в виде двух чисел  $c/d$ , входящих в соотношение (4.11), которое является оценкой пределов допускаемой основной относительной погрешности  $\delta$  (%)

$$\delta = \pm [c + d(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1)], \quad (4.11)$$

где  $x_k$  – больший (по модулю) из пределов измерений прибора;  $c = (b + d)$  – приведенная погрешность (%);  $d = \frac{a}{|x_k|} 100$  – приведенная аддитивная погрешность (%); значения  $c/d$  в обозначении класса точности также выбираются из ряда (4.8), причем  $c > d$ .

Значение  $c$  в (4.11) равно пределу допускаемой основной приведенной погрешности в конце шкалы, а значение  $d$  – пределу допускаемой основной аддитивной приведенной погрешности в начале диапазона при  $x=0$ .

Обозначение классов точности указываются в нормативно-технической документации, а также на передних панелях (шкалах) средств измерений. Принятые условные обозначения для классов точности приведены в табл. 2.

Зная класс точности прибора можно из формул, приведенных в табл. 4.1, оценить границы основной абсолютной погрешности  $\pm \Delta x$  для конкретного результата измерения. Из (4.2) следует, что действительное значение измеряемой физической величины  $x_0$  находится в интервале

$$x_0 = x \pm \Delta x, \quad (4.12)$$

где  $x$  – показание прибора;  $\pm \Delta x$  – границы допускаемой основной абсолютной погрешности результата измерения, оцениваемые по классу точности.

Таблица 4.1

Формулы для оценки предела допускаемой основной погрешности СИ: $\gamma$ - приведенной (%); $\delta$ - относительной (%).	Формулы для оценки предела абсолютной погрешности результата измерения	Примеры обозначения класса точности на средствах измерений и в нормативной документации (указывают числа для $p, q, c, d$ )
$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N} 100 = \pm p$	$\Delta x = \pm \frac{px_N}{100}$	0,5
$\delta = \frac{\Delta x}{x} 100 = \pm q \%$	$\Delta x = \pm \frac{qx}{100}$	(1,0)
$\delta = \pm [c + d( \frac{x_N}{x}  - 1)]\%$	$\Delta x = \pm \frac{\delta x}{100}$	0,05/0,02

## 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

### СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ К ВЛИЯЮЩИМ ВЕЛИЧИНАМ

В общем случае на СИ кроме входного воздействия  $x$  могут оказывать влияние множество других факторов  $\xi_i$ , таких как температура, влажность, магнитные поля и т. п. (см. рис. 5.1). При нормировании чувствительности СИ к влияющим величинам задают:

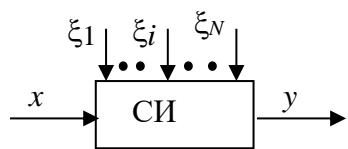


Рисунок 5.1

1. Рабочие условия эксплуатации  $\xi_{1p}.. \xi_{ip} .. \xi_{np}$ ;
  2. Нормальные условия эксплуатации  $\xi_{1n}.. \xi_{in} .. \xi_{nn}$ .
- При рабочих условиях эксплуатации МХ СИ нормированы и его можно применять. При нормальных условиях применения присутствует только основная погрешность.

При отличии значения  $i$ - ого влияющего фактора от нормального значения  $\xi_{in}$  выходной сигнал СИ у изменяется, что трактуется как возникновение дополнительной погрешности  $\Delta y_{idop}$ . Для ее оценки представим выходной сигнал СИ в виде функции нескольких переменных

$$y = F(x, \xi_1.. \xi_i .. \xi_N).$$

Для независимых факторов, взяв полный дифференциал от этой функции и перейдя к конечным приращениям, можно получить следующее выражение

$$\Delta y = \frac{dF(\cdot)}{dx} \Delta x + \frac{dF(\cdot)}{d\xi_1} \Delta \xi_1 + \dots + \frac{dF(\cdot)}{d\xi_i} \Delta \xi_i + \dots + \frac{dF(\cdot)}{d\xi_N} \Delta \xi_N \quad (5.1)$$

где для упрощения записи функция  $F(x, \xi_1.. \xi_i .. \xi_N)$  представлена как  $F(\cdot)$ ;  $\Delta \xi_i = (\xi_i - \xi_{in})$  – отличие  $i$ - ого фактора от номинального значения;  $\frac{dF(\cdot)}{d\xi_i} \Delta \xi_i$  – функция влияния  $i$ - ого фактора.

В (5.1) первое слагаемое определяет составляющую изменения выходного сигнала от изменения измеряемой величины, т. е. отражает основной принцип работы СИ. Каждое последующее слагаемое определяет свой «вклад» в изменение выходного сигнала от конкретных влияющих факторов  $\xi_i$  и их называют *функциями влияния*. Обычно принимают, что частные производные в (5.1) являются постоянными величинами и их называют *коэффициентами влияния*  $k_{\text{вл}}$  и тогда можно оценить границы абсолютной дополнительной погрешности от изменения  $i$ -ого фактора в виде:

$$\Delta y_{\text{доп}}(\xi_i) = \pm \frac{\partial F(\cdot)}{\partial \xi_i} \Delta \xi_i = \pm k_{\text{вл}i} (\xi_i - \xi_{i\text{н}}) \quad (5.2)$$

Оценка суммарной дополнительной погрешности. Для *оценки предельной суммарной абсолютной погрешности* от влияния всех факторов можно использовать соотношение:

$$\Delta y_{\text{доп}} = \pm \sum_i k_{\text{вл}i} (\xi_i - \xi_{i\text{н}}) \quad (5.3)$$

Более удобно при оценке суммарной погрешности по формуле (5.3) использовать *приведенную дополнительную погрешность* от влияния  $i$ -ого фактора ( $y_N$  – нормирующее значение шкалы СИ)

$$\gamma_{i\text{доп}} = \frac{\Delta y_{i\text{доп}}(\xi_i)}{y_N} \cdot 100\%. \quad (5.4)$$

Введем в рассмотрение функцию влияния в новой трактовке

$$\psi(\xi_i) = \frac{\gamma_{i\text{доп}}(\xi_i)}{\Delta \xi_i}. \quad (5.5)$$

В этом случае предельную дополнительную погрешность от влияния  $i$ -ого фактора при известном отклонении значения влияющего фактора от нормального значения  $\Delta \xi_i = (\xi_i - \xi_{i\text{н}})$  можно оценить по формуле

$$\gamma_{i\text{доп}} = \pm \psi(\xi_i) \Delta \xi_i \quad (5.6)$$

Например, при оценке влияния температуры  $T$  на некоторое средство, функцию влияния задана в виде  $\Psi(T) = 1\% / 10^\circ\text{C}$ . Тогда при изменении температуры на  $15^\circ\text{C}$  границы дополнительной приведенной погрешности составят  $\pm 1,5\%$ .

Для оценки предельной приведенной суммарной дополнительной погрешности достаточно оценить дополнительные погрешности по формуле (5.6) от каждого влияющего фактора, а затем найти предельную суммарную дополнительную погрешность:

$$\Delta \gamma_{\text{доп}} = \pm \sum_i \gamma_{i\text{доп}}.$$

## 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НА ИЗМЕРЯЕМУЮ ВЕЛИЧИНУ

В процессе измерений в той или иной форме происходит взаимодействие СИ с измеряемой величиной, что может привести к увеличению погрешности измерений (см. рис. 6.1).

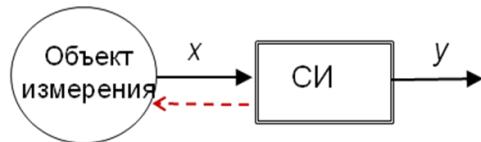


Рисунок 6.1

Характеристик, определяющих влияние СИ на измеряемую величину, в общем случае может быть много. Для электрических измерений наиболее типичными являются следующие характеристики: *входное сопротивление*  $R_{\text{вх}}$  и *входная емкость*  $C_{\text{вх}}$ ; выделяемые (или потребляемые) на объекте измерений мощность, ток, или напряжение.

Для примера рассмотрим влияние входного сопротивления вольтметра и амперметра на измеряемую величину (см.рис.6.2, а).

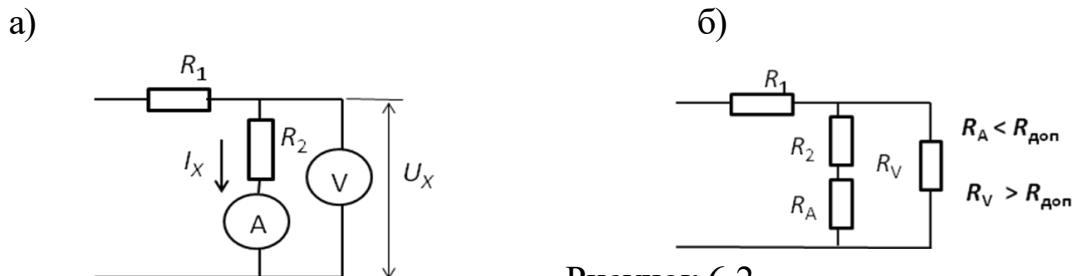


Рисунок 6.2

Так, включение вольтметра параллельно некоторому участку цепи, на котором измеряется напряжение, изменяет сопротивление этого участка из-за конечного входного сопротивления вольтметра и тем самым искажает результат измерений. Включение амперметра всегда приводит к увеличению сопротивления цепи, в которой измеряется ток. Эквивалентная схема участка цепи с учетом внутренних сопротивлений амперметра  $R_A$  и вольтметра  $R_V$  показана на рис. 6.2, б.

Для исключения влияния внутренних сопротивлений приборов необходимы не выполнимые условия, а именно: сопротивления амперметра равно 0, а сопротивление вольтметра – бесконечности.

На практике внутренние сопротивления нормируют следующим образом: задают максимальное допустимое значение сопротивления для данного типа амперметров и  $R_A < R_{\text{доп}}$  минимальное допустимое значение сопротивления для данного типа вольтметров  $R_V > R_{\text{доп}}$ . Значения этих допустимых сопротивлений указываются в нормативно-технической документации на приборы .

На переменном токе наиболее часто используемая эквивалентная схема входной цепи средств электрических измерений представлена на рис. 6.3, где  $R_{\text{ВХ}}$  – эквивалентное сопротивление входной цепи СИ относительно входных зажимов,

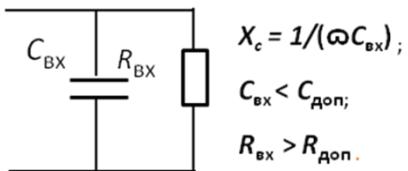


Рисунок 6.3

$X_c = 1/(\omega C_{\text{вх}})$ ;  
 $C_{\text{вх}} < C_{\text{доп}}$ ;  
 $R_{\text{вх}} > R_{\text{доп}}$ .

а  $C_{\text{вх}}$  – эквивалентная емкость входной цепи, определяемая распределенными емкостями монтажа входных цепей, конструкцией входных зажимов (кабелей).

Входная емкость оказывает шунтирующее влияние при повышенных частотах, что приводит к увеличению погрешности. Для переменного тока при нормировании задают *минимально допустимое* значение  $R_{\text{ВХ}}$  и *максимально допустимое* значение  $C_{\text{вх}}$ . В табл. 6.1 для примера приведены характеристики электронного вольтметра типа В3-38.

Таблица 6.1

Диапазон измерения напряжений	1-3-10-30-100-300 мВ, 1-3-10-30-100-300 В
Диапазон частот	20 Гц ... 5 МГц
Класс точности	2,5 ... 6
Входная емкость	30 пФ (1-300 мВ) и 15 ПФ (1-300 В)
Входное сопротивление	5 МОм (1-300 мВ) и 4 МОм (1-300 В)

## 7. НОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

### 7.1. Динамический режим работы средств измерений

Изменение входного сигнала СИ во времени может оказывать значительное влияние на результаты измерений. Измерение изменяющихся во времени величин называется динамическим режимом (см. рис. 7.1). Динамический режим является основным при применении СИ в различных системах контроля и управления различными физическими объектами и технологическими процессами. При динамическом режиме существенными являются характер изменения сигнала  $x(t)$ , т.е. его динамические характеристики, и «скорость реакции» СИ на входное воздействие, определяемая динамическими свойствами этого СИ.

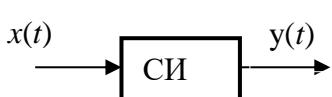


Рисунок 7.1

Рассмотрим динамический режим для аналоговых СИ и сформулируем общий подход к оценке динамической погрешности. Для того чтобы выходной сигнал  $y_i(t)$  некоторого идеального в динамическом смысле СИ точно отображал во времени измеряемую величину  $x(t)$  независимо от характера ее изменения, необходимо соблюдение соотношения

$$y_i(t) = k_h x(t), \quad (7.1)$$

где  $k_h$  – номинальный коэффициент преобразования.

«Идеальность» этого соотношения в том, что измеряемая величина легко находится по выходному сигналу (основная процедура при измерениях)

$$x(t) = y_i(t)/k_h; \quad (7.2)$$

при этом отсутствует какая-либо погрешность определения  $x(t)$ , обусловленная изменением входной величины во времени. Уравнение (7.1) соответствует идеальному безынерционному линейному преобразованию. Реальные СИ в той или иной степени обладают инерционными свойствами из-за наличия элементов, запасающих энергию. Например, подвижных элементов, обладающих определенной массой, и упругих элементов в электромеханических приборах, емкостей и индуктивностей в электрических цепях и т. п. Это приводит к более сложной зависимости между  $x(t)$  и выходным сигналом  $y(t)$  реального СИ.

Для выделения свойств динамического режима примем, что средство измерений не имеет статической погрешности, т. е. реальный коэффициент преобразования  $k_p = k_h$  во всем диапазоне изменения  $x(t)$ .

Динамический режим широкого класса средств измерений может быть описан линейным неоднородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$A_n y^{(n)}(t) + A_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + A_j y^{(j)}(t) + \dots + A_1 y'(t) + y(t) = k_h x(t). \quad (7.3)$$

Это уравнение отличается от уравнения (7.1) наличием членов, содержащих производные от выходного сигнала  $y(t)$  и некоторые постоянные коэффициенты  $A_j$ , которые определяют динамические свойства средств измерений. При равенстве нулю этих членов уравнение (7.3) вырождается в уравнение (7.1). Решение  $y(t)$  дифференциального уравнения (7.3) описывает выходной сигнал средства измерения при входном воздействии  $x(t)$ . Общее решение  $y(t)$  неоднородного линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами определяется суммой:

$$y(t) = y_C(t) + y_B(t),$$

где  $y_C(t)$  – общее решение соответствующего однородного дифференциального уравнения, описывающее свободные колебания СИ;  $y_B(t)$  – частное решение уравнения (7.3), описывающее вынужденные колебания. Для устойчивых средств измерений свободные колебания являются затухающими, т. е.  $\lim_{t \rightarrow \infty} y_C(t) = 0$ .

В этом плане различают *переходный динамический режим*, определяемый  $y_C(t)$  и  $y_B(t)$  и *установившейся динамический режим* СИ, определяемый  $y_B(t)$ .

На рис. 7.2, а показаны выходные сигналы  $y(t)$  некоторого реального и

$y_i(t)$  идеального (безынерционного) средства измерений при входном сигнале  $x(t) = \sin \omega t, t > 0$ . На рис. 7.2, б представлена схема формирования погрешности в динамическом режиме.

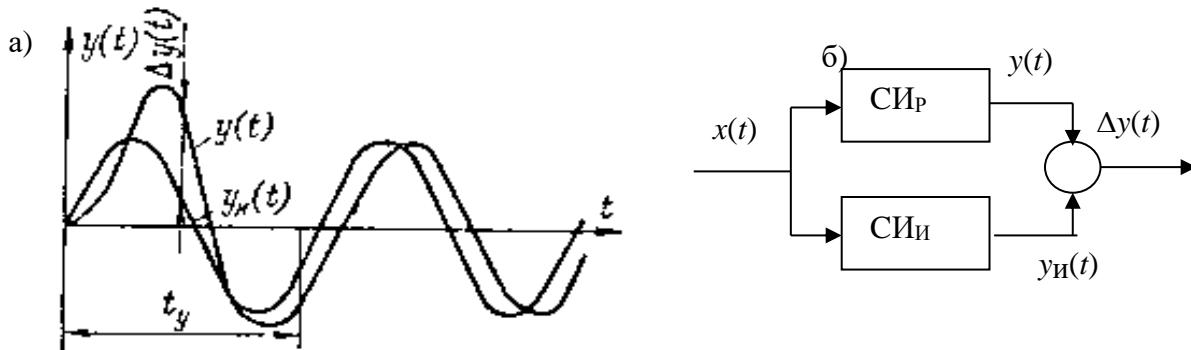


Рисунок. 7.2

Погрешность  $\Delta y(t)$  в динамическом режиме по выходу СИ есть разность между выходным сигналом  $y(t)$  реального средства и сигналом  $y_i(t)$  идеального в динамическом смысле СИ (при этом предполагается, что СИ однородны: реальный осциллограф и идеальный осциллограф, реальный вольтметр и идеальный вольтметр и т. п.)

$$\Delta y(t) = y(t) - y_i(t). \quad (7.4)$$

В общем случае погрешность в динамическом режиме представляет собой сумму динамической и статической погрешностей. Поскольку статическая погрешность при данном рассмотрении принята равной нулю, то выражение (7.3) определяет только динамическую погрешность.

Вычитая из (7.3) уравнение (7.1) и учитывая (7.4), получим выражение для динамической погрешности по выходу для реального СИ:

$$\Delta y(t) = -A_n y^{(n)}(t) - A_{n-1} y^{(n-1)}(t) - \dots - A_j y^{(j)}(t) - \dots - A_1 y'(t). \quad (7.5)$$

Из (7.5) следует, что динамическая погрешность зависит от динамических свойств средств измерений, определяемых коэффициентами  $A_j$ , и от входных сигналов  $x(t)$ , поскольку от этих сигналов зависит решение  $y(t)$  дифференциального уравнения (7.3), т.е. выходной сигнал и, естественно, его соответствующие производные.

Выражение (7.5) для динамической погрешности носит в большей степени по-знавательный характер, выявляющий основные факторы, влияющие на погрешность, чем конструктивный, т. е. позволяющий количественно определить саму динамическую погрешность. Дело в том, что определение производных выходного сигнала, если оно вообще возможно, как например, в регистрирующих приборах, осуществляется, как правило, с низкой точностью и, следовательно, достоверность

оценки динамической погрешности по (7.5) оказывается довольно низкой.

Динамические погрешности являются функцией времени. Точное определение динамической погрешности является весьма сложной задачей и далеко не всегда имеющей аналитическое решение. Поэтому на практике пользуются некоторыми оценками динамической погрешности или выбирают такие СИ и с такими динамическими характеристиками, при которых динамические погрешности становятся допустимо малыми при известных ограничениях на динамику изменения входных сигналов.

Для оценки динамического режима средств измерений во всех случаях необходимо знать динамические характеристики средств измерений.

## 7.2. Динамические характеристики средств измерений и оценка динамической погрешности

Для анализа динамического режима средств измерений (СИ) применяют:

- полные динамические характеристики, полностью описывающие принятую математическую модель динамических свойств СИ;
- частные динамические характеристики – это некоторые показатели динамических свойств СИ, являющиеся по существу параметрами полных динамических характеристик.

Порядок уравнения (7.3) определяется динамическими свойствами СИ и в общем случае может быть высоким. Дифференциальные уравнения высокого порядка могут быть представлены системой дифференциальных уравнений более низкого порядка. По существу, это означает представление сложного в динамическом смысле СИ более простыми динамическими звенями. Для исследования динамических свойств СИ широкое распространение получили динамические звенья первого и второго порядков. Рассмотрим динамические характеристики звена 2-го порядка, как наиболее распространенного для средств измерений.

**Полные динамические характеристики.** Такими характеристиками являются: дифференциальные уравнения, переходные и импульсные переходные характеристики, частотные характеристики, передаточные функции.

**Дифференциальные уравнения.** Применение дифференциальных уравнений для описания динамического режима СИ представлено выше. Здесь отметим следующее.

Динамический режим звена 2-го порядка математически описывается следующим дифференциальным уравнением

$$A_2 y''(t) + A_1 y'(t) + y(t) = k_H x(t). \quad (7.6)$$

Для более удобной интерпретации постоянные коэффициенты в (6) могут быть представлены в другом виде

$$\frac{1}{\omega_0^2} y''(t) + \frac{2\beta}{\omega_0} y'(t) + y(t) = k_H x(t), \quad (7.7)$$

где  $\omega_0$  – частота собственных колебаний;  $\beta$  – коэффициент демпфирования (или степень успокоения), от которых в достаточно явной форме зависит характер переходного и установившегося динамического режима.

Для идеального звена дифференциальное уравнение (7) вырождается в алгебраическое уравнение (7.1).

*Переходные и импульсные переходные характеристики.* Переходная характеристика  $h(t)$  есть реакция СИ на входное воздействие  $x(t)$ , представляющее собой единичный скачок  $1(t)$ . Импульсная переходная характеристика  $g(t)$  есть реакция СИ на входное воздействие в виде дельта-функции  $\delta(t)$ . Поскольку  $\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}$ , то  $g(t) = \frac{dh(t)}{dt}$ .

Для звена 2-го порядка вид переходной характеристики существенно зависит от коэффициента демпфирования  $\beta$ . Существуют три режима переходной характеристики:

колебательный режим ( $\beta < 1$ )

$$h(t) = k_H \left[ 1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin(\sqrt{1-\beta^2} \omega_0 t + \arccos\beta) \right],$$

критический режим ( $\beta = 1$ )

$$h(t) = k_H \left[ 1 - (1 + \omega_0 t) e^{-\omega_0 t} \right],$$

апериодический (переуспокоенный) режим ( $\beta > 1$ )

$$h(t) = k_H \left[ 1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sin(\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \operatorname{arsh}\beta) \right].$$

На рис. 7.3 показаны переходные характеристики звена 2-го порядка в координатах приведенной ко входу переходной характеристики  $h(t)/k_H$  и безразмерного времени  $\omega_0 t = 2\pi t/T_0$ , где  $T_0$  – период свободных колебаний динамического звена.

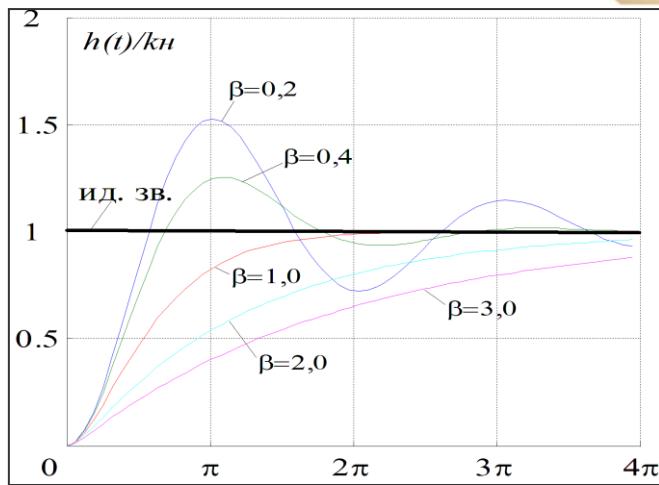


Рисунок 7.3

Критический режим ( $\beta = 1$ ) является граничным между колебательным ( $\beta < 1$ ) и апериодическим ( $\beta > 1$ ); он характерен тем, что переходный процесс в таком режиме наиболее быстро и апериодически стремится к установившемуся значению. В этом смысле критический режим является оптимальным для многих приложений.

Переходная характеристика идеального звена показана на рисунке жирной линией; из (7.1) очевидно, что  $h_{\text{ид}}(t) / k_H = 1(t)$ . Для идеального (безинерционного) звена отсутствует какое-либо запаздывание реакции измерительного средства на входное воздействие.

**Частные динамические характеристики.** Эти характеристики применяют для анализа установившегося динамического режима. Такие характеристики позволяют в компактной и упрощенной форме оценивать динамические характеристики

средств измерений. Прозрачный физический смысл и удобство использования обусловили широкое применение на практике частных динамических характеристик. Существует большое количество частных динамических характеристик, применяемых к различным типам средств измерений. Рассмотрим некоторые из них, часто используемые для указания динамических свойств СИ.

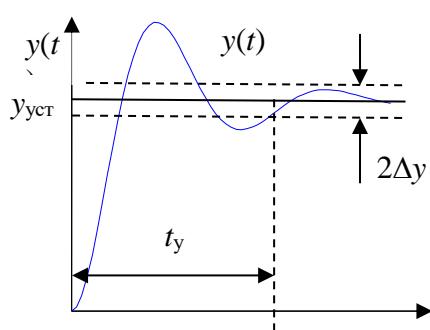


Рисунок 7.4

**Время установления**  $t_y$  (или *время реакции*) – промежуток времени от момента подачи на средство измерений входного сигнала в виде единичного скачка до момента времени, когда выходной сигнал не будет отклоняться от установившегося значения на заранее заданную величину  $\Delta$  (см. рис. 7.4). Например, для электромеханических приборов типичное значение  $t_y = 3$  сек.

*Рабочая полоса частот СИ* – диапазон частот входных сигналов, при котором амплитудно-частотная характеристика СИ не отклоняется от номинального значения  $k_H$  (определенного на некоторой частоте) на заранее установленную величину  $\Delta k_H$ . Рабочую полосу частот задают значениями (в Гц.) верхней  $f_B$  и нижней  $f_N$  частот указанного диапазона. В частности, при  $f_H = 0$  средство измерений пропускает постоянную составляющую входного сигнала.

*Максимальная скорость нарастания фронта импульсов и первый максимальный выброс* – параметры переходной характеристики, определяющие возможные искажения сигнала при его скачкообразном изменении (см. рис. 7.5).

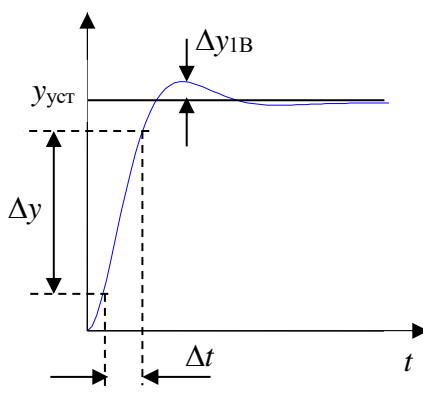


Рисунок 7.5

Скорость нарастания фронта  $V_F$  определяется отношением изменения  $\Delta y$  выходного сигнала к времени  $\Delta t$  этого изменения,  $V_F = \Delta y / \Delta t$  (в частности, размерность такой скорости [В/сек]). Первый максимальный выброс обычно представляют отношением первого выброса  $\Delta y_{1B}$  переходной характеристики к установившемуся значению  $y_{уст}$  выходного сигнала,  $\beta_{1\text{выбр}} = (\Delta y_{1B} / y_{уст}) \%$ .

Принципиально выброса может и не быть (см. рис. 7.3) при  $\beta \geq 0,707$ . Однако при этом уменьшается скорость нарастания фронта. Проектировщик СИ выбирает разумный компромисс между этими параметрами.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.
2. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. <http://www.fundmetrology.ru>.

## Тема 7. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### Объекты измерений и их модели

*Общие сведения об объектах измерений.* Объекты измерений – это реальные физические объекты (материальные объекты, процессы или явления) природного или технического происхождения, свойства (физические величины) которых подлежат измерению.

Реальные физические объекты имеют множество свойств (характеристик, параметров), часто взаимосвязанных, зависящих от условий реализации, в совокупности определяющих, как правило, чрезвычайно сложную структуру такого объекта. Экспериментатор не в состоянии воспринимать объект целиком во всем его многообразии. Поэтому вынужден приходить к некоторому абстрактному представлению реального объекта. Абстрагирование при представлении реального объекта состоит в выделении его наиболее существенных свойств и признаков, представлении этих свойств и признаков в форме, которая необходима для последующего теоретического и экспериментального исследования. «Не существует эмпирического метода без чисто умозрительных понятий и систем, и не существует систем чистого мышления, при более близком изучении которых не обнаруживался бы эмпирический материал, на котором они строятся», А. Эйнштейн.

Такое упрощенное представление реального физического объекта является моделью этого объекта.

*Модель объекта* – это математическое, физическое или иное описание (или представление) объекта, при котором выделяются существенные для конкретных целей измерений свойства объекта.

Один и тот же физический объект может иметь различные модели в зависимости от цели измерений. Здесь следует напомнить, что измерение никогда не является самоцелью. Цель измерений определяется совокупностью требований при проведении исследовательских, технологических или конструкторских работ. Так, моделью резистора на постоянном токе или на низких частотах может быть некоторое постоянное сопротивление, этот же резистор на повышенных частотах имеет другую модель, включающую, кроме постоянного сопротивления, реактивные составляющие – емкости и индуктивности.

Выбор модели объекта является весьма ответственной процедурой при проведении измерительного эксперимента. Модель должна быть адекватной и достаточной (полней) для решения поставленной измерительной задачи. При этом погрешность неадекватности не должна превышать допустимых значений.

В общем случае выбор модели объекта можно представить в следующей последовательности. В каждом конкретном случае сначала выбирается измеряемая величина и принимается адекватная модель этой величины, затем при необходимости определяются другие свойства объекта исследования, влияющие на результаты измерений, принимаются модели физических величин, отражающие эти свойства. В совокупности эти модели определяют модель объекта измерений для конкретной цели - измерения выбранной физической величины. Для другой цели (измерение другой физической величины) модель объекта будет другой.

Кроме того, для реальных условий эксперимента следует учесть возможное влияние внешних факторов на объект измерений. Это влияние может отразиться на изменении параметров принятой модели объекта, в том числе и на измеряемых параметрах.

Значение измеряемой величины без указания ее модели и измеряемого параметра не имеет смысла. Например, утверждение, что измеренное выходное напряжение некоторого генератора равно допустим 10 В без указания формы выходного напряжения, явно недостаточно, поскольку это напряжение может быть напряжением постоянного тока, действующим значением синусоидального напряжения, амплитудным значением прямоугольных импульсов и т. п.

Измеряемую величину часто называют входным сигналом или входным измерительным сигналом. Такое определение, в общем, не является достаточно точным, однако оно широко используется в литературе и весьма удобно, поскольку многие вопросы, описания моделей входных сигналов средств измерений подробно рассмотрены в достаточно хорошо разработанной теории сигналов.

## Классификация измерений

Существующее многообразие измерительных экспериментов для нахождения значения физических величин определяется как большим количеством этих величин, характером их изменения во времени, так и различными требованиями к качеству получаемых результатов. Классификация измерений позволяет структурировать множество измерительных процедур с целью их эффективной организации и использования.

Измерения могут быть классифицированы по следующим признакам:

- способу получения результата измерений – прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения;
- отношению к изменению измеряемой величины – статические и динамические измерения;

- характеристике точности – равноточные и неравноточные измерения;
  - числу измерений в ряду измерений – однократные и многократные измерения;
  - выражению результата измерений – абсолютные и относительные измерения;
  - метрологическому назначению – технические и метрологические измерения.

*Прямое измерение* – измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно в результате выполнения измерительного эксперимента. Например, измерение длины микрометром, силы тока – амперметром, электрического сопротивления – омметром и т.д.

*Косвенное измерение* – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. При косвенном измерении значение искомой величины у связано с измеряемыми некоторой функциональной зависимостью  $y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – значения величин, полученных с помощью прямых измерений. Например, значение сопротивления резистора  $R$  определяют из уравнения  $R = U/I$ , в которое подставляют значения напряжения  $U$  на резисторе и тока  $I$  через него.

*Совместные измерения* – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неодноименных величин для определения зависимости между ними. Понятие, совместные измерения – это одновременно проводимые косвенные измерения. При этом решают следующую систему уравнений:

где  $y_i$  – искомые величины,  $x_{ij}$  – значения измеренных величин. Например, для нахождения зависимости сопротивления резистора от температуры, определяемой выражением  $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ , измеряют сопротивление резистора при трех различных температурах, составляют систему из трех уравнений и находят значения параметров  $R_0$ ,  $A$  и  $B$ .

*Совокупные измерения* – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путь

тем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. Например, выполняют прямые измерения сопротивлений резисторов, соединенных треугольником, а затем по результатам этих измерений рассчитывают значения сопротивлений самих резисторов.

*Статическое измерение* – измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения. Например, измерение сопротивления резистора при нормальной температуре.

*Динамическое измерение* – измерение изменяющейся по размеру физической величины. При этом может идти речь и об измерении значения физической величины, и об измерении изменения во времени этой величины. Вследствие возможного быстрого изменения размера физической величины ее измерение проводят с точной фиксацией момента времени. В этом случае говорят об измерении «мгновенного значения измеряемой величины». Пример, измерение значения амплитуды переменного напряжения электрического тока.

*Равноточные измерения* – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одинаковых условиях с одинаковой тщательностью.

*Неравноточные измерения* – ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

*Однократное измерение* – измерение, выполненное один раз. На практике, как правило, выполняются именно однократные измерения. В ряде случаев принципиально невозможно увеличивать число измерений одной и той же величины, например, измерение параметров, характеризующих запуск ракетоносителей космических кораблей.

*Многократное измерение* – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений. Результат многократных измерений получается из следующих друг за другом значений ряда однократных измерений. Однако перед началом обработки необходимо убедиться, что все измерения этого ряда являются равноточными.

*Абсолютное измерение* – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физиче-

ских констант. Например, измерение силы  $F$  основано на измерении основной величины – массы ( $m$ ) и использовании физической постоянной  $g$  (в точке измерения массы), в соответствии с уравнением  $F = mg$ .

*Относительное измерение* – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

*Технические измерения* – измерения с помощью рабочих средств измерения. Технические измерения выполняются с целью контроля и управления научными экспериментами, технологическими процессами, движением транспорта и т.д. Например, измерение ряда физических величин, характеризующих некоторый технологический процесс.

*Метрологические измерения* – измерения, выполняемые при помощи эталонов и образцовых средств измерений с целью воспроизведения единиц физических величин для передачи их размера рабочим средствам измерений. Пример, выполнение процедуры поверки рабочих средств измерений.

Если в качестве критерия классификации измерительных процедур используется измеряемая физическая величина, то принято использовать понятие вида измерения. Под видом измерений понимается часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин. Например, в области электрических и магнитных измерений могут быть выделены такие виды измерений как измерения электрического сопротивления, электрического напряжения, магнитной индукции и т.д.

Взаимодействие средств измерений с объектом измерения основано на физических явлениях или эффектах.

*Принцип измерений* – физическое явление или эффект, положенное в основу измерения.

*Методом измерений* – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

В основе классификации методов измерения лежит способ применения меры при получении значения измеряемой величины. Выделяют несколько основных методов: непосредственной оценки и сравнения с мерой, последний, в свою очередь, подразделяется на нулевой, дифференциальный или разностный, замещением, дополнением.

*Метод непосредственной оценки* – метод измерения, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

Результат измерения в этом случае определяется непосредственно по отсчетному устройству средства измерения. Использование меры в получении результата происходит опосредовано через процедуру градуировки шкалы средства измерения на этапе его производства.

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

*Нулевой метод измерений* – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Устройство, с помощью которого определяется равенство нулю указанной разности, называется нуль-индикатором.

На рис. 1 приведена схема, поясняющая использование нулевого метода, где  $U_x$  – измеряемая величина;  $U_0$  – мера; НИ – нуль-индикатор. Изменяя значение меры, добиваются выполнения равенства  $U_x=U_0$ . Признаком равенства этих значений является отсутствие тока через НИ  $I_{\text{НИ}}=0$ .

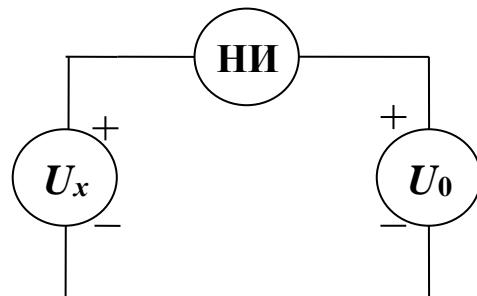


Рисунок 1

Данный метод позволяет получить высокую точность измерений, при применении высокоточных мер и нуль-индикаторов, обладающих высокой чувствительностью. На использовании нулевого метода измерений основано, например, измерение сопротивления с помощью четырехплечего моста.

*Дифференциальный или разностный метод измерений* – метод измерения, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Результат определяется, как сумма показаний средства измерений и значения физической величины воспроизводимой мерой. Наибольшую точность данный метод позволяет получить при незначительном отличии между измеряемой величиной и известным значением, воспроизводимом мерой.

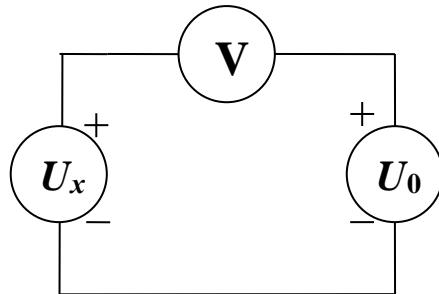


Рисунок 2

На рис. 2 представлена обобщенная схема, построенная на основе дифференциального метода.  $V$  – вольтметр, измеряющий разность  $\Delta U$  между значением измеряемого напряжения  $U_x$  и значением воспроизведимым образцовым источником напряжения. Тогда измеряемая величина определяется выражением  $U_x = U_0 + \Delta U$ .

Особенностью данного метода является возможность получить результат измерения с высокой точностью, используя средство измерения разности сравнительно невысокой точности. Так, если относительная погрешность измерения разности  $\Delta U$  составляет 1% и отношение  $\Delta U / U_x$  также равно 1%, то измеряемая величина  $U_x$  определяется с погрешностью 0,01%.

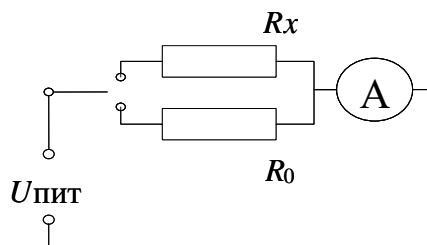


Рисунок 3

*Метод измерений замещением* – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. С помощью средства измерения производится поочередное измерение искомой величины и величины, воспроизводимой мерой, результат определяется по этим двум значениям. На рис. 3 приведена обобщенная схема измерения значения сопротивления резистора  $R_x$  на основе метода замещения.

На первом шаге измеряется ток  $I_x$  через резистор  $R_x$ . На втором – ток  $I_x$  через образцовое сопротивление  $R_0$ . Искомая величина определяется из соотношения  $R_x = I_0 R_0 / I_x$ . Метод тем точнее, чем  $R_0$  ближе к  $R_x$ .

*Метод измерений дополнением* – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению.

### Мосты постоянного и переменного тока

Для измерения параметров электрических цепей широко используются мостовые схемы. Различают мосты постоянного и переменного тока. В зависимости от количества плеч существуют одинарные (четырехплечие) и двойные (шестиплечие) мосты. Выпускаются мосты с ручным и автоматическим уравновешиванием.

Обобщенная схема моста переменного тока представлена на рис. 4. Элементы  $a - b$ ,  $b - g$ ,  $g - z$  и  $a - z$  являются плечами моста и содержат комплексные сопротивления  $Z_1 \div Z_4$ .

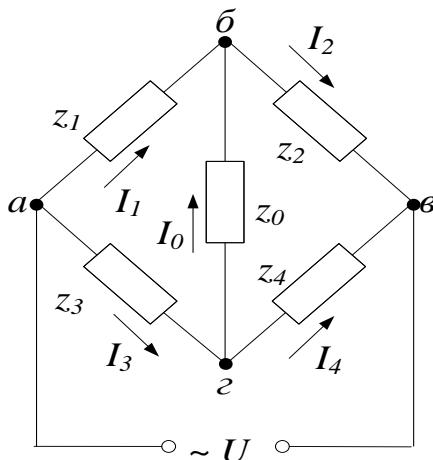


Рисунок 4

Элемент  $b - g$  называется измерительной (выходной) диагональю. В нее включается нагрузка: нуль-индикатор, усилитель выходного сигнала и другие устройства для оценки величины неуравновешенности моста. Диагональ  $a - g$  является диагональю питания.

Под равновесием измерительного моста понимается режим работы схемы, при котором ток в измерительной диагонали отсутствует  $I_0 = 0$ . Данное условие выполняется при равенстве произведений сопротивлений противоположных плеч моста:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3.$$

При использовании показательной формы записи полного сопротивления:

$Z_i = z_i e^{j\varphi_i}$ . Выражение для условия равновесия моста принимает вид:

$z_1 z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2 z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}$ , из которого следует, что для достижения равновесия необходимо выполнение двух равенств:

$$z_1 z_4 = z_2 z_3 \text{ и } \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$$

где  $z_i$  – модули полных сопротивлений плеч;  $\varphi_i$  – углы фазового сдвига тока относительно напряжения. Наличие двух равенств указывает на то, что для достижения положения равновесия в мостах переменного тока требуется регулировка не менее двух параметров моста.

Для мостов переменного тока важное значение имеет сходимость моста – возможность достижения состояния равновесия определенным числом поочередных переходов от регулировки одного параметра к другому.

Используя условие равенства сумм фаз противоположных плеч моста можно определить характер сопротивлений плеч. Если плечи моста, например первое и второе, имеют чисто активное сопротивление, т.е.  $Z_1 = R_1$  и  $Z_2 = R_2$  тогда  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ . Следовательно, сопротивления третьего и четвертого плеч должны иметь одинаковый характер (емкостный или индуктивный).

Важной характеристикой измерительного моста является его чувствительность. Под чувствительностью моста понимают отношение конечных приращений выходной величины и измеряемой величины вблизи положения равновесия:

$$\dot{S} \approx \Delta \dot{y} / \Delta \dot{x}.$$

Для достижения максимальной чувствительности в мостах переменного тока мост должен быть симметричным ( $Z_1 = Z_2$  и  $Z_3 = Z_4$ ) и угол фазового сдвига плеч, расположенных по обе стороны измерительной диагонали, равен  $\pm \pi$ . Практически из-за наличия потерь точно выполнить последнее условие невозможно.

Для измерения электрического сопротивления на постоянном токе используются одинарные или двойные мосты в зависимости от величины этого сопротивления. Одинарные мосты работают, как правило, на диапазонах от 10 до  $10^6$  Ом. Границы этого диапазона обусловлены со стороны малых значений величиной сопротивлений соединительных проводов и контактов, а со стороны больших – сопротивлением изоляции. Например, при присоединении измеряемого объекта  $R_X$  к мосту с учетом сопротивления проводников и контактов вносится сопротивление порядка  $10^{-4}$  Ом и более. В случае измеряемого сопротивления 1 Ом вносится

ошибка порядка всего лишь 0,01%, но для сопротивления  $10^{-3}$  Ом ошибка будет составлять 10%.

Схема одинарного моста приведена на рис. 5. В качестве примера будем рассматривать подключение измеряемого сопротивления  $R_X$  в первое плечо моста, т.е.  $Z_1 = R_X$ . Тогда плечо  $Z_3$  является плечом сравнения, а  $Z_2$  и  $Z_4$  – плечами отношений. Поскольку речь идет об измерении активного сопротивления, то в дальнейшем воспользуемся равенствами  $Z_1 = R_1$ ,  $Z_2 = R_2$ ,  $Z_3 = R_3$ ,  $Z_4 = R_4$ . Величина измеряемого сопротивления определяется из выражения  $R_X = R_2 R_4 / R_3$ .

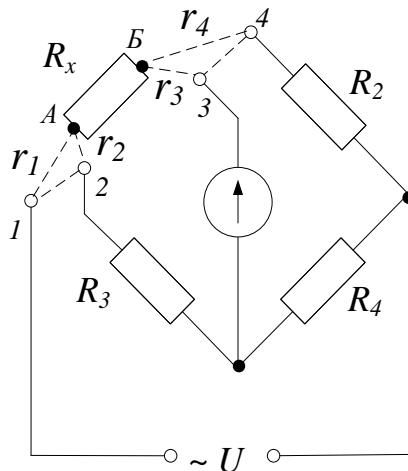


Рисунок 5

При измерении сопротивлений, больших 10 Ом, измеряемое сопротивление подключается по двухзажимной схеме. В этом случае (рис. 5) точка  $A$  подключается к зажиму моста  $1$ , который в свою очередь соединен перемычкой с зажимом  $2$ , а точка  $B$  – к зажиму  $3$ , соединенному перемычкой с зажимом  $4$ . Некоторое расширение диапазона измеряемых сопротивлений в область малых значений достигается в схеме одинарного моста при использовании четырехзажимной схемы подключения. Для этого точка  $a$  отдельными проводами подключается к зажимам  $1$  и  $2$ , перемычка между этими зажимами удаляется. Точка  $B$  отдельными проводами соединяется с зажимами  $3$  и  $4$ , между которыми также удалена перемычка. Такая схема подключения позволяет снизить влияние сопротивлений проводов и контактов, которые в схеме условно обозначены как сопротивления  $r_1 \div r_4$ . Действительно, поскольку сопротивления плеч моста  $R_2$  и  $R_3$  выбираются из условий  $R_2 \gg r_4$  и  $R_3 \gg r_2$ , то влиянием сопротивлений проводников и контактов  $r_2$  и  $r_4$  можно пренебречь. Сопротивления  $r_1$  и  $r_3$  включены в различные диагонали моста и также не влияют на выполнение условия равновесия.

Чувствительность мостовой схемы определяется значением измеряемого сопротивления и величиной напряжения питания. Измерение малых сопротивлений приводит к снижению чувствительности, которое может быть скомпенсировано увеличением напряжения питания. Однако, в результате ограничений на величину допустимой рассеиваемой мощности в плечах моста, постоянное увеличение напряжение питания мостовой схемы невозможно. Отмеченные недостатки отсутствуют в двойных измерительных мостах. Использование двойных мостов позволяет расширить нижний предел измеряемого сопротивления до  $10^{-8}$  Ом.

Для мостов постоянного тока нормирование основной погрешности осуществляется по относительной погрешности. Класс точности обозначается либо в виде одного числа  $c$ , и тогда предел допускаемой основной относительной погрешности определяется по одночленной формуле  $\delta = c$ , либо в виде дроби  $c/d$ , и тогда  $-\delta = \pm [c + d(R_K / R_X) - 1]$ , где  $R_K$  – конечное значение сопротивления данного диапазона;  $R_X$  – измеряемое сопротивление.

*Мосты для измерения емкости и тангенса угла потерь.* При измерении емкости необходимо учитывать то обстоятельство, что реальный конденсатор за счет поглощения активной мощности обладает потерями. Для описания конденсатора с малыми потерями используется последовательная схема, а для конденсатора с большими потерями – параллельная. На схемах элемент  $C$  – эквивалентная идеальная емкость, равная по значению измеряемой, а  $R$  – эквивалентное сопротивление, характеризующее величину мощности, поглощаемой в конденсаторе.

На рис. 6 представлена схема моста для измерения емкости конденсатора с малыми потерями.

Полные сопротивления плеч моста в этом случае

$$Z_1 = R_X + \frac{1}{j\omega C_X}; \quad Z_2 = R_1; \quad Z_3 = R_N + \frac{1}{j\omega C_N}; \quad Z_4 = R_2.$$

Подставив эти выражения в формулу равновесия моста, получаем

$$[R_X + 1/(j\omega C_X)]R_2 = [R_N + 1/(j\omega C_N)]R_1.$$

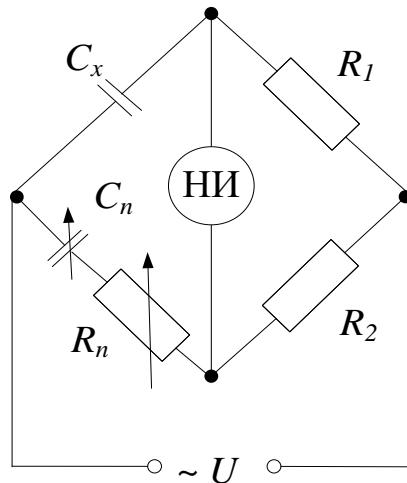


Рисунок 6

Значения  $C_x$  и  $R_x$  определяются из выражений  $C_x = C_N R_2 / R_1$  и  $R_x = R_N R_1 / R_2$ . Угол потерь  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига тока относительно напряжения, определяется из выражения  $\operatorname{tg}\delta = \omega C_x R_x = \omega C_N R_N$ .

Алгоритм уравновешивания моста следующий. Устанавливают  $R_N = 0$ , изменяют отношение плеч  $R_2/R_1$  до тех пор, пока нуль-индикатор не покажет минимальный ток. Регулируют  $R_N$ , добиваясь дальнейшего уменьшения показаний нуль-индикатора. Затем снова изменяют отношение  $R_2/R_1$  и т.д. до достижения положения равновесия.

При измерении емкости конденсатора с большими потерями применяют параллельную схему подключения  $R_N$  и  $C_N$ . Использование в этом случае последовательной схемы нецелесообразно, т.к. введение в уравновешивающее плечо большого последовательного сопротивления приведет к снижению чувствительности моста.

Полные сопротивления плеч моста определяются выражениями

$$Z_1 = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}; \quad Z_2 = R_1; \quad Z_3 = \frac{R_N}{1 + j\omega C_N R_N}; \quad Z_4 = R_2.$$

При достижении условия равновесия выполняется следующее равенство:

$$\frac{R_x R_2}{1 + j\omega C_x R_x} = \frac{R_N R_1}{1 + j\omega C_N R_N}.$$

Следовательно,  $C_X = C_N R_2 / R_1$  и  $R_X = R_N R_1 / R_2$ . Тангенс угла потерь для данной параллельной схемы включения вычисляется из соотношения  $\operatorname{tg}\delta = 1/(\omega C_X R_X) = 1/(\omega C_N R_N)$ .

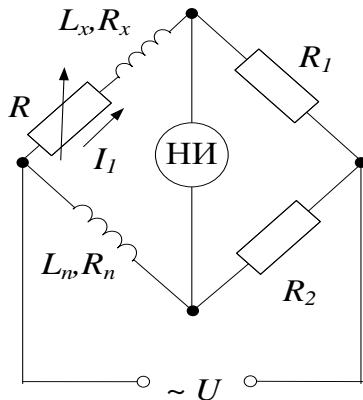


Рисунок 7

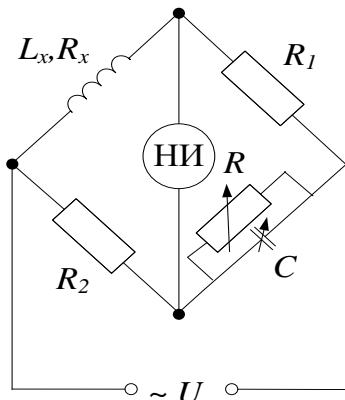


Рисунок 8

*Мосты для измерения индуктивности и добротности.* Мосты для измерения указанных физических величин могут быть построены с применением либо образцовой индуктивности – рис. 7, либо образцовой емкости – рис. 8.

При использовании образцовой индуктивности в измеряемое плечо моста включается испытуемая катушка с индуктивностью  $L_x$ , обладающая активным сопротивлением  $R_x$ , а в соседнее плечо – образцовая катушка с индуктивностью  $L_N$  и сопротивлением  $R_N$ . В зависимости от соотношения между сопротивлениями  $R_x$  и  $R_N$  дополнительное переменное сопротивление  $R$  подключается или последовательно с измеряемой катушкой, что для примера показано на рис. 7, или последовательно с образцовой катушкой индуктивности.

Если  $R_x < R_N$  ( $R$  последовательно с  $L_x$ ), то условие равновесия достигается при  $L_x = L_N R_1 / R_2$ ,  $R_x = R_N R_1 / R_2 - R$ . Если  $R_x > R_N$ , то  $R$  включается последовательно с  $L_N$ , а измеряемые  $L_x$  и  $R_x$  определяются как  $L_x = L_N R_1 / R_2$ ,  $R_x = (R_N + R) R_1 / R_2$ .

В случае использования образцовой емкости (см. рис. 8) условия равновесия имеют вид:

$$L_x = CR_1 R_2; R_x = R_1 R_2 / R.$$

Добротность катушки определяется либо по значениям измеренной индуктивности  $L_x$  и соответствующего сопротивления  $R_x$ , либо по значениям  $R$  и  $C$  из выражений.  $Q = \omega L_x / R_x = \omega C R$

Следует отметить, что в схеме на рис. 8 возможно использование не переменной, а постоянной образцовой емкости и переменного резистора. Данный способ характеризуется удобством снятия прямых отсчетов значений измеряемых индуктивностей и коэффициентов добротности. Однако при малых значениях добротности измеряемого контура  $Q \leq 1$  такие мосты обладают очень плохой сходимостью.

Современные мосты создаются на основе цифровых процессоров. Микропроцессорное ядро позволяет автоматизировать процедуру измерения, обеспечить многофункциональность устройства (многие мосты интегрированы с другими измерительными приборами, например, мультиметрами), устраниить помехи, организовать обработку накопленных результатов измерений (хранение, обмен с компьютером, печать протоколов) и др.

### Компенсаторы постоянного тока

Обобщенная схема компенсатора представлена на рис. 9, где  $E_H$  – нормальный элемент, ЭДС которого известна точно;  $E_X$  – источник измеряемой ЭДС; НИ – нуль-индикатор, в качестве которого обычно используется гальванометр;  $R_H$  – образцовое сопротивление, выбираемое в зависимости от значения рабочего тока компенсатора и значения  $E_X$ ; ВБ – вспомогательная батарея.

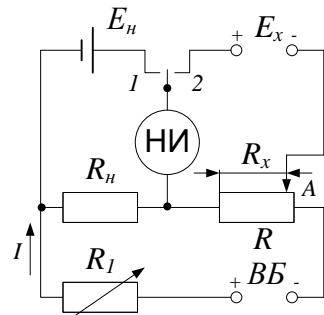


Рисунок 9

Алгоритм измерения  $E_X$  заключается в следующем. Устанавливают значение рабочего тока, для чего, переключатель  $B$  переводят в положение 1, а сопротивление  $R_1$  изменяют до тех пор пока НИ не покажет отсутствие тока. Тогда  $IR_H = E_H$ . Затем переключатель  $B$  устанавливают в положение 2, и, перемещая подвижный контакт  $A$  добиваются отсутствия тока в измерительной диагонали. В этом случае  $IR_X = E_X$ , где  $I$  – значение рабочего тока, установленное ранее.

Высокая точность, достигаемая при измерении с помощью компенсатора, обусловлена высокой чувствительностью применяемого гальванометра, высокой точностью нормального элемента и резисторов, а также высокой стабильностью вспомогательного источника питания.

Достоинством компенсатора является также то, что в момент компенсации не потребляется мощность от источника измеряемой величины. Именно поэтому с помощью компенсатора возможно измерение ЭДС.

Предел допускаемой основной погрешности компенсатора нормируется по приведенной погрешности и тогда класс точности указывается одним числом  $\gamma = \pm P$ , либо по относительной погрешности  $\delta = \pm c/d$ .

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

### 1. Показатели точности результатов измерений

Целью обработки результатов измерений (наблюдений) является установление значения измеряемой величины и оценка погрешности их результатов.

Методы обработки результатов наблюдений могут быть разными в зависимости от предварительной информации, которой располагает экспериментатор об источниках и характере проявления погрешностей, условиях эксперимента, свойствах используемых средств измерений, от вида измерений, числа выполненных измерений (однократные или многократные) и других причин.

В качестве оценок погрешностей используются точечные или интервальные значения:

- *предельные значения* погрешности абсолютной, относительной – *точечные оценки*;
- *доверительный интервал и доверительная вероятность* погрешности (*интервальные оценки*), задающие вероятность нахождения погрешности  $P_{\text{д}}$  в заданном интервале  $\pm \Delta x_{\text{д}}$

$$P\{-\Delta x_{\text{д}} \leq \Delta x \leq + \Delta x_{\text{д}}\} = P_{\text{д}}.$$

Эта оценка используется для случайной погрешности.

При  $P_{\text{д}} = 1$  получаем оценку предельной погрешности в виде  $\pm \Delta x_{\text{д}}$ .

Можно связать доверительный интервал  $\Delta x_{\text{д}}$  и СКО  $\sigma$  для нормального закона распределения погрешности следующим образом

При  $P_{\text{д}} = 0.95$ ,  $\Delta x_{\text{д}} = \pm 2\sigma$ ; при  $P_{\text{д}} = 0.997$ ,  $\Delta x_{\text{д}} = \pm 3\sigma$ .

*Оценка систематической погрешности* (точечная оценка) по ряду наблюдений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  при многократных измерениях находится по формуле:

$$\Delta x_{\text{систематическая}} = x_{\text{ср}} - x_{\text{д}},$$

где  $x_{\text{ср}} = (\sum x_i) / n$  – оценка математического ожидания (среднее арифметическое ряда наблюдений);  $x_{\text{д}}$  – действительное значение измеряемой величины.

## 2. Оценка погрешности при однократных прямых измерениях по классу точности прибора

На практике для оценки точности результата измерения используется класс точности средства измерения, определяющий пределы допускаемой основной погрешности.

В таблице приведены формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности при заданном значении класса точности.

В формулах, приведенных в таблице:  $x$  – показания прибора;  $x_N$  – нормирующее значение, определяемое видом шкалы прибора;  $x_k$  – больший по модулю из пределов измерения прибора.

Таблица 1 – оценки пределов допускаемой основной погрешности

Формулы для определения пределов допускаемой основной погрешности СИ: $\gamma$ - приведенной (%); $\delta$ - относительной (%).	<b>Формулы для оценки пределов абсолютной погрешности результата измерения</b>	Числа $p, q, c, d$ задаются в обозначении класса точности на шкале прибора или в документации
$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100 = \pm p$	$\Delta x = \pm \frac{px_N}{100}$	0,5
$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 = \pm q \%$	$\Delta x = \pm \frac{qx}{100}$	(1,0)
$\delta = \pm [c + d( \frac{x_k}{x}  - 1)] \%$	$\Delta x = \pm \frac{\delta x}{100}$	0,05/0,02

Зная класс точности прибора можно из формул, приведенных в таблице, оценить пределы основной абсолютной погрешности  $\pm \Delta x$  для конкретного результата измерения  $x$ . Записывают результат измерения для действительного значения измеряемой физической величины  $x_0$

$$x_0 = x \pm \Delta x,$$

где  $x$  – показание прибора;  $\pm \Delta x$  – пределы допускаемой основной абсолютной погрешности результата измерения, оцениваемые по классу точности (см. таблицу).

## 3. Обработка результатов косвенных однократных измерений

При обработке результатов косвенных измерений  $y = F(x_1, x_2 \dots x_n)$ , где  $x_1, x_2 \dots x_n$  – результаты прямых измерений, оценить предельные погрешности результата косвенных измерений можно при известных оценках предельных погрешностей результатов прямых измерений.

Рассматривая  $y = F(x_1, x_2 \dots x_n)$ , как функцию нескольких переменных, найдем ее полный дифференциал через частные производные отдельных аргументов и их дифференциалы

$$dy = \partial \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \quad (3.1)$$

Заменив дифференциалы в (3.1) на приращения отдельных переменных и рассматривая их как абсолютные погрешности результатов прямых измерений, получим общую формулу для оценки пределов абсолютной погрешности результата косвенных измерений

$$\Delta y = \pm \sum_n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \Delta x_i, \quad (3.2)$$

Т.о. оценить предельную абсолютную погрешность косвенных измерений  $\Delta y$  по выражению (3.2) можно для конкретного вида функции  $y = F(x_1, x_2 \dots x_n)$  после оценки предельных абсолютных погрешностей результатов прямых измерений  $\Delta x_i$ .

В таблице приведены примеры оценок погрешности косвенных измерений  $y = F(x_1, x_2)$  по формуле (3.1) для некоторых случаев функций двух переменных ( $\Delta x_1, \Delta x_2, \delta_1 = (\Delta x_1 / x_1) / 100 \%$ ,  $\delta_2 = (\Delta x_2 / x_2) / 100 \%$  – пределы абсолютных и относительных погрешностей результатов прямых измерений соответственно).

Таблица 2 – оценка пределов погрешности косвенных измерений

Функция	Абс. погрешность. $\Delta y$	Относит. погрешность $\delta_y = (\Delta y / y) \%$
$y = x_1 + x_2$	$\Delta y = \pm (\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\delta_y = \pm ((\Delta x_1 + \Delta x_2) / (x_1 + x_2)) 100\%$
$y = x_1 - x_2$	$\Delta y = \pm (\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\delta_y = \pm ((\Delta x_1 + \Delta x_2) / (x_1 - x_2)) 100\%$
$y = x_1 x_2$	$\Delta y = \pm (x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2)$	$\delta_y = \pm (\delta_1 + \delta_2) = \pm (\Delta x_1 / x_1 + \Delta x_2 / x_2) 100\%$
$y = x_1 / x_2$	$\Delta y = \pm (x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2) / x_2^2$	$\delta_y = \pm (\delta_1 + \delta_2) = \pm (\Delta x_1 / x_1 + \Delta x_2 / x_2) 100\%$
$y = x^n$	$\Delta y = \pm n x^{n-1} \Delta x$	$\delta_y = \pm n \delta = \pm n \Delta x / x 100\%$

Формулы, приведенные в таблице, могут быть распространены на косвенные измерения для суммы и произведения и для другого количества результатов прямых измерений.

Общий порядок обработки результатов однократных косвенных измерений следующий:

1. Вычисляют результат косвенных измерений  $y = F(x_1, x_2 \dots x_n)$ , где  $x_1, x_2 \dots x_n$  – результаты прямых измерений.

2. Если результатами прямых измерений являются показания приборов, то пределы их абсолютных погрешностей  $\Delta x_i$  оценивают по формулам, приведенным в таблице.

3. Затем вычисляют по формуле (3.2) пределы абсолютной погрешности  $\pm \Delta y$  результата косвенных измерений.

4. Записывают результат косвенных измерений по правилам округления

$$y_0 = y \pm \Delta y \quad (3.3)$$

где  $y_0$  – действительное значение результата косвенных измерений;  $y$  – результат косвенных измерений.

Для некоторых косвенных измерений, приведенных выше в таблице справедливы правила:

1. Если результат измерений произведение или частное, то его предельная относительная погрешность  $\delta_y$  равна арифметической сумме предельных относительных погрешностей  $\delta_i$  результатов прямых измерений, а пределы его абсолютной погрешности равны

$$\Delta y = \pm y \delta_y / 100$$

2. Если результат измерений сумма или разность, то его предельная абсолютная погрешность  $\Delta y$  равна арифметической сумме предельных абсолютных погрешностей  $\Delta x_i$  результатов прямых измерений.

#### **4. Обработка результатов прямых многократных измерений**

Целью обработки результатов многократных измерений является установление значения измеряемой величины и оценка погрешности полученного результата измерения. При обработке результатов прямых многократных измерений получают более точный результат по сравнению с результатами отдельных наблюдений.

При проведении многократных измерений надо обеспечить следующие условия: *статический режим* проведения измерений и *неизменные условия* проведения измерений.

Порядок действий при обработке результатов наблюдений следующий:

1. Проводят  $n$  отдельных наблюдений. Исключив систематическую погрешность из каждого результата наблюдения, получаем *исправленный ряд* наблюдений  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , математическим ожиданием которого является действительное значение измеряемой величины.

2. Вычисляют среднее арифметическое по  $n$  наблюдениям

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad (4.1)$$

которое принимают за *действительное значение* измеряемой величины. Отметим, что среднее арифметическое является случайной величиной.

3. Вычисляют отклонения между отдельными результатами наблюдений и средним арифметическим, т.е. разности  $\rho_1 = x_1 - \bar{x}$ ;  $\rho_2 = x_2 - \bar{x}$ ; ...;  $\rho_n = x_n - \bar{x}$ . Их называются рассеянием результатов в ряду измерений (или остаточными погрешностями).

Они могут быть как положительными, так и отрицательными. На основании свойства среднего арифметического алгебраическая сумма остаточных погрешностей равна нулю, т.е.  $\sum_n \rho_i = 0$  и этим правилом следует пользоваться для контроля правильности подсчета  $\bar{x}$ .

4. Вычисляют оценку дисперсии ряда наблюдений

$$S^2[x] = \frac{1}{n-1} \sum_n \rho_i^2, \quad (4.2)$$

5. Вычисляют дисперсию среднего арифметического ряда наблюдений

$$S^2[\bar{x}] = \frac{1}{n} S^2[x] \quad (4.3)$$

6. Определяют по соответствующей таблице коэффициент Стьюдента  $t_p(f)$

для заданного значения доверительной вероятности  $P_d$  и числа степеней свободы  $f = n - 1$  ( $n$  – число проведенных наблюдений).

Коэффициент Стьюдента определяет доверительный интервал для величины

$$t = (\bar{x} - x_u) / S[\bar{x}]. \quad (4.4)$$

В теории вероятностей доказано, что при нормальном законе распределения  $x_i$  случайная величина  $t$ , определяемая выражением (1.8), имеет закон распределения Стьюдента.

С увеличением числа наблюдений (*практически при  $n > 30$* ) закон распределения Стьюдента приближается к нормальному закону.

7. После определения значения  $t_p(f)$ , на основании выражений (4.1), (4.2), (4.3) и (4.4) для заданной доверительной вероятности  $P_d$  оценивают доверительный интервал погрешности и записывают результат измерения в виде

$$x_i = \bar{x} \pm t_p(f) S[\bar{x}] = \bar{x} \pm t_p(f) \frac{S[x]}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

где  $x_i$  – истинное значение измеряемой величины.

Выражение (4.5) задает интервал, в границах которого с доверительной вероятностью  $P_d$  находится истинное значение измеряемой величины.

## 5 Оценка погрешности многократных измерений при известных характеристиках случайной погрешности

Выше в п. 4 рассматривалась задача оценки точности измерений при статистической обработке ряда наблюдений, т.е. по итогам проведенного измерительного эксперимента. Однако возможен вариант, когда дисперсия  $\sigma^2[x]$  или СКО  $\sigma[x]$  случайной погрешности средства измерения известно, например, из предыдущих экспериментов или из технической документации на применяемые средства измерений. Обычно на практике принимают нормальный закон распределения случайной погрешности и тогда результаты отдельных наблюдений при исключении из них систематической погрешности также будут иметь нормальный закон распределения с математическим ожиданием равным истинному значению измеряемой величины.

Как и в предыдущем случае определяют среднее арифметическое ряда наблюдений  $\bar{x}$ , а дисперсию среднего арифметического ряда наблюдений можно определить по формуле  $\sigma^2[\bar{x}] = \frac{\sigma^2[x]}{n}$ .

Для нахождения доверительного интервала погрешности измерения необходимо найти закон распределения для величины

$$z = (\bar{x} - x_i) / \sigma[\bar{x}] \quad (5.1)$$

Так как в выражение (5.1) входит только одна случайная величина  $\bar{x}$ , то вид закона распределения величины, определяемой этим выражением, определяется видом закона распределения величины  $\bar{x}$ . При нормальном законе распределения отдельных результатов  $x_i$  закон распределения  $\bar{x}$  тоже нормальный. Это объясняется известным из теории вероятностей свойством устойчивости нормального закона, заключающимся в том, что сумма случайных величин, распределенных по нормальному закону, дает случайную величину, распределенную по нормальному закону.

Таким образом, при нормальном законе распределения  $x_i$  случайная величина  $z$ , определяемая выражением (5.1), распределена поциальному закону

распределения с математическим ожиданием, равным нулю и дисперсией, равной единице.

Следовательно, результат измерения можно записать в виде

$$x_{\text{и}} = \bar{x} \pm z_p \sigma[\bar{x}] = \bar{x} \pm z_p \frac{\sigma[x]}{\sqrt{n}} (\bar{x} - x_{\text{и}}) / \sigma[\bar{x}], \quad (5.2)$$

где  $z_p$  – коэффициент для нормального распределения.

Значение  $z_p$  определяется по табличным значениям для функции Лапласа  $\Phi(x)$  для заданного значения доверительной вероятности из условия  $P_{\text{д}} = 2\Phi(z_p)$ .

Для нормального закона распределения погрешности в (5.2) можно использовать следующие значения  $z_p$ : при  $P_{\text{д}} = 0.95$ ,  $z_p = 2$ ;  $P_{\text{д}} = 0.997$ ,  $z_p = 3$ .

На практике часто встречается однократное измерение, когда измеряемая величина оценивается по результату одного наблюдения. Этот случай можно рассматривать как частный случай многократных измерений (при  $n = 1$ ). Тогда выражение (5.2) примет вид

$$x_{\text{и}} = x \pm z_p \sigma[x],$$

где  $x$  – результат однократного измерения, из которого исключена систематическая погрешность;  $\sigma[x]$  – известное СКО случайной погрешности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для студ. учреждений высш.образования / [В.В.Алексеев, Б.Я.Авдеев, Е.М.Антонюк и др.]; под ред. В.В.Алексеева. – М.: Издательский центр «Академия», 2014.

## Тема 9. АНАЛОГОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

### Электромеханические измерительные приборы

#### Общие сведения

Электромеханические приборы – это приборы, в измерительном механизме которых электрическая энергия преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части. К ним относятся приборы непосредственной оценки, которые можно рассматривать состоящими из трёх основных частей: измерительной цепи, измерительного механизма и отсчетного устройства. Измерительная цепь служит для преобразования измеряемой электрической величины в другую электрическую величину, непосредственно воздействующую на измерительный механизм. Это может быть, как количественное, так и качественное преобразование. В измерительном механизме электрическая энергия преобразуется в механическую энергию, что приводит к перемещению (повороту) подвижной части. Отсчетное устройство служит для визуального отсчитывания значений измеряемой величины в зависимости от угла поворота подвижной части.

Так как в измерительных механизмах обычно имеет место угловое перемещение подвижной части, то при анализе их работы рассматривают моменты, действующие на подвижную часть. Моменты делят на статические и динамические. Статическими являются моменты, действующие в механизме всегда при наличии измеряемой величины. Динамические моменты действуют на подвижную часть только во время ее движения.

К статическим относят врачающий и противодействующий моменты.

Момент, возникающий в механизме под действием измеряемой величины и поворачивающий подвижную часть в сторону возрастающих показаний, называют врачающим. Этот момент должен однозначно определяться измеряемой величиной  $x$  и может также зависеть от угла поворота подвижной части  $\alpha$ , т. е. врачающий момент  $M = F(x, \alpha)$ .

При повороте подвижной части на угол  $d\alpha$  изменение механической энергии  $dA$  равно изменению электрокинетической энергии  $dW_E$  в измерительном механизме, т. е.  $dA=dW_E$ . При угловом перемещении подвижной части изменение механической энергии  $dA = M d\alpha$ . Отсюда

$$M = \frac{d W_E}{d\alpha} , \quad (9.1)$$

где  $W_E$  – электрокинетическая энергия измерительного механизма. Таким образом, врачающий момент возникает, если электрокинетическая энергия в механизме изменяется. В зависимости от типа механизма это может быть изменение

энергии электромагнитного поля (в большинстве приборов) или электростатического поля (в электростатических приборах).

Чтобы подвижная часть не доходила всегда до упора при любом значении измеряемой величины  $x$ , а поворачивалась бы на угол, однозначно зависящий от измеряемой величины, на подвижную часть должен действовать момент, направленный навстречу вращающему и зависящий от угла поворота подвижной части. Этот момент, называемый противодействующим,

$$M_\alpha = F(\alpha) \quad (9.2)$$

При некотором угле поворота наступает равенство  $M$  и  $M_\alpha$ , т. е.  $M = -M_\alpha$ , или

$$M + M_\alpha = 0. \quad (9.3)$$

Находят применение шесть типов измерительных механизмов, отличающихся способом создания вращающего момента, а именно: магнитоэлектрический, электромагнитный, электродинамический, ферродинамический, электростатический и индукционный (табл. 9.1).

*Таблица 9.1*

Наименование прибора	Условное обозначение	Наименование прибора	Условное обозначение
Прибор магнитоэлектрический с подвижной катушкой		Прибор электродинамический	
Логометр магнитоэлектрический		Логометр электродинамический	
Прибор магнитоэлектрический с подвижным магнитом		Прибор ферродинамический	
Логометр магнитоэлектрический с подвижным магнитом		Логометр ферродинамический	
Прибор электромагнитный		Прибор индукционный	
Логометр электромагнитный		Прибор электростатический	

По способу создания противодействующего момента измерительные механизмы бывают с механическим противодействующим моментом и с электрическим противодействующим моментом – логометрические измерительные механизмы.

В измерительных механизмах первой группы противодействующий момент создается упругими элементами (спиральными пружинами, растяжками или подвесом), которые при повороте подвижной части закручиваются.

При этом

$$M_\alpha = -W\alpha, \quad (9.4)$$

где  $W$  – удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента. Упругие элементы используют в ряде приборов также в качестве токоподводов к подвижной части.

В логарифмических механизмах противодействующий момент создается также, как и вращающий, но один из моментов должен зависеть от угла поворота подвижной части. Если момент, создаваемый величиной  $x_1$  – вращающий, а момент, создаваемый величиной  $x_2$  – противодействующий, то  $M = F_1(x_1)$ ,  $M_\alpha = F_2(x_2, \alpha)$ , а  $\alpha = \Phi(x_1/x_2)$ , т. е. в этом случае угол поворота подвижной части определяется отношением электрических величин  $x_1$  и  $x_2$ .

При перемещении подвижной части на нее, кроме указанных моментов, действуют также динамические моменты: момент сил инерции и момент успокоения.

Момент сил инерции  $M_J$  равен произведению момента инерции  $J$  на угловое ускорение, т.е.

$$M_J = -J \frac{d^2\alpha}{dt^2}. \quad (9.5)$$

Момент успокоения  $M_P$  определяется как произведение коэффициента успокоения  $P$  на угловую скорость, т.е.

$$M_P = -P \frac{d\alpha}{dt}. \quad (9.6)$$

Знак «минус» в выражениях для моментов сил инерции и успокоения означает, что эти моменты направлены навстречу вращающему.

Несмотря на разные принципы действия измерительных механизмов, имеется ряд деталей и узлов, общих для всех электромеханических приборов.

Корпус прибора защищает прибор от внешних воздействий, например, от попадания в него пыли.

Отсчетное устройство электромеханического прибора состоит из шкалы и указателя. Шкала прибора обычно представляет собой пластину, на которой нанесены отметки, соответствующие определенным значениям измеряемой величины. Указатель представляет собой перемещающуюся вдоль шкалы стрелку, жестко

скрепленную с подвижной частью измерительного механизма прибора. В качестве указателя применяют также световой луч, отраженный от зеркальца, укрепленного на оси подвижной части. Луч света попадает на шкалу и образует на ней световое пятно, например, с темной нитью посередине. При повороте подвижной части световой указатель перемещается по шкале.

**Магнитоэлектрические приборы Общие сведения.** Магнитоэлектрические приборы состоят из магнитоэлектрического измерительного механизма с отсчетным устройством и измерительной цепи. Эти приборы применяют для измерения постоянных токов и напряжений (амперметры и вольтметры), сопротивлений (омметры), количества электричества (баллистические гальванометры и кулонометры), магнитного потока (веберметры). Магнитоэлектрические приборы применяют также для измерения или индикации малых токов и напряжений (гальванометры). Кроме того, магнитоэлектрические приборы используют для регистрации электрических величин (самопищащие приборы и осциллографические гальванометры).

**Измерительный механизм.** Вращающий момент в измерительном механизме магнитоэлектрического прибора возникает в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля катушки с током. Применяют магнитоэлектрические механизмы с подвижной катушкой и с подвижным магнитом. Наиболее распространен механизм с подвижной катушкой.

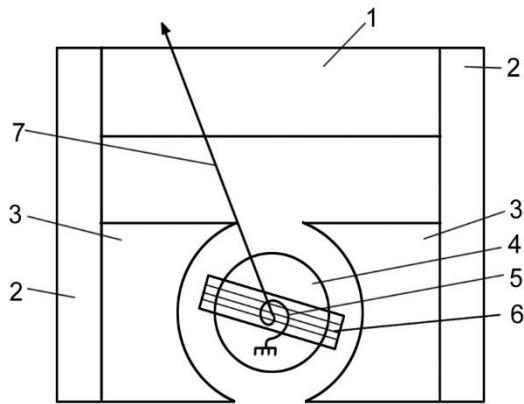


Рисунок 9.1

На рис. 9.1 показано устройство магнитоэлектрического измерительного механизма с подвижной катушкой, где 1 – постоянный магнит, 2 – магнитопровод, 3 – полюсные наконечники, 4 – неподвижный сердечник, 5 – спиральная пружина, 6 – подвижная катушка, 7 – указатель. Ток к подвижной катушке подводится через две спиральные пружины, основным назначением которых является создание противодействующего момента. На рис. вторая пружина находится за

площадью чертежа и потому невидна. Внутренний конец пружин крепится на оси, т.е. на кернах, а наружный – на неподвижной части механизма.

Постоянный магнит, являющийся источником магнитного поля, магнитопровод, полюсные наконечники и сердечник, проводящие магнитный поток, образуют так называемую магнитную систему прибора. Цилиндрическая форма сердечника и расточки полюсных наконечников, а также их концентрическое расположение, обеспечивают равномерное радиальное поле в зазоре, т.е. в любой точке рабочего зазора индукция  $B$  – величина постоянная.

Воздушный зазор имеет радиальную длину 1–2 мм.

В воздушном зазоре располагается катушка прямоугольной формы. Она свободно охватывает сердечник и крепится на кернах (в данном примере). Обмотку катушки выполняют из медного или алюминиевого провода.

Энергия в механизме в этом случае состоит из трех составляющих, а именно, из энергии магнита, энергии катушки и энергии взаимодействия полей магнита и катушки. В создании вращающего момента участвует только третья составляющая, так как первые две не зависят от угла  $\alpha$ , а третья составляющая зависит от него. Например, при горизонтальном расположении катушки поле магнита не проникает в катушку, а при вертикальном расположении поле магнита полностью пронизывает катушку.

При наличии тока  $i$  в подвижной катушке энергия электромагнитного поля, сцепляющегося с катушкой, т.е., энергия взаимодействия, определяется выражением

$$W_s = \Psi i,$$

где  $\Psi = Bsw\alpha$  – потокосцепление подвижной катушки;  $B$  – индукция в воздушном зазоре между сердечником и полюсными наконечниками;  $s$  – площадь катушки;  $w$  – число витков обмотки катушки;  $\alpha$  – угол поворота.

### Мгновенный вращающий момент

$$M_t = \frac{dW_s}{d\alpha} = Bswi.$$

Если ток синусоидальный ( $i = I_m \sin \omega t$ ), то вращающий момент  $M_t = BswI_m \sin \omega t$ . При этом работа механизма зависит от соотношения частоты тока  $\omega$  и частоты собственных колебаний подвижной части механизма  $\omega_0$ . У измерительных механизмов магнитоэлектрических амперметров, вольтмет-

ров, омметров период собственных (свободных) колебаний подвижной части примерно одна секунда ( $\omega_0 = 6,28 \text{ с}^{-1}$ ). Следовательно, отклонение подвижной части измерительного механизма при частоте тока более 10 Гц практически равно нулю. В диапазоне частот до 10 Гц подвижная часть колеблется с частотой входного тока, причем амплитуда колебаний зависит от частоты. Поэтому приборы с такими измерительными механизмами применяют в цепях постоянного тока. При протекании через катушку постоянного тока  $I$  вращающий момент

$$M = BswI \quad (9.5)$$

Если противодействующий момент создается упругими элементами, то получим

$$\alpha = BswI / W = S_I I, \quad (9.6)$$

где  $S_I = Bsw / W$  – чувствительность измерительного механизма к току.

Из выражения (9.6) следует, что при постоянной индукции  $B$  в зазоре угол отклонения подвижной катушки пропорционален току в катушке, а знак угла отклонения меняется при изменении направления тока.

В измерительном механизме некоторых магнитоэлектрических приборах устанавливается магнитный шунт в виде пластины из ферромагнитного материала, с помощью которого может изменяться индукция в воздушном зазоре, что позволяет регулировать чувствительность механизма (в омметрах) или изменять внешнее критическое сопротивление (в гальванометрах).

В магнитоэлектрических логометрических измерительных механизмах подвижная часть выполняется в виде двух жестко скрепленных между собой катушек 1 и 2, по обмоткам которых протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ . Ток к катушкам подводится с помощью металлических лент, практически не имеющих противодействующего момента. Моменты  $M_1$  и  $M_2$ , создаваемые взаимодействием магнитного поля постоянного магнита и токов катушек, направлены навстречу друг другу. Так как хотя бы один из моментов должен зависеть от угла поворота подвижной части, то для этого, например, зазор выполняют неравномерным. В этом случае при равенстве моментов  $B_1(\alpha)s_1w_1I_1 = B_2(\alpha)s_2w_2I_2$ , откуда получаем:

$$\alpha = F(I_1 / I_2). \quad (9.7)$$

В магнитоэлектрических механизмах осуществляется магнито-индукционное успокоение за счет взаимодействия токов, наводимых в дюралюминиевом каркасе подвижной катушки при ее перемещении, и поля постоянного магнита и за счет взаимодействия токов, наводимых в цепи катушки, и поля магнита.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы имеют некоторые особенности, которые придает магнитоэлектрическим приборам ряд положительных свойств. Они имеют высокую чувствительность и малое собственное потребление энергии, имеют линейную и стабильную номинальную статическую характеристику преобразования  $\alpha = f(I)$ , что объясняется стабильностью свойств применяемых материалов. У этих механизмов отсутствует влияние электрических полей и мало влияние внешних магнитных полей из-за достаточно сильного поля в воздушном зазоре ( $0,2 - 1,2$  Тл). Однако эти механизмы имеют малую перегруженную способность по току (обычно перегорают токоподводы), относительно сложны и дороги. Недостаток их также в том, что обычные механизмы реагируют только на постоянный ток.

**Амперметры и вольтметры.** В магнитоэлектрических амперметрах измерительный механизм включается в цепь измеряемого тока либо непосредственно, либо при помощи шунта. Непосредственное включение применяется при измерении малых токов (до 30 мА), допустимых для токоподводов (пружин, растяжек) и обмотки подвижной катушки механизма. При больших токах применяют шунты.

Для уменьшения силы тока в определенное число раз применяют шунты, например, в том случае, когда диапазон показаний амперметра меньше диапазона изменения измеряемого тока.

Шунт представляет собой резистор, включаемый параллельно средству измерений. Если сопротивление шунта  $R_{\text{ш}} = R / (n - 1)$ , где  $R$  – сопротивление средства измерений;  $n = I_1 / I_2$  – коэффициент шунтирования, то ток  $I_2$  в  $n$  раз меньше тока  $I_1$ . Шунты изготавливают из манганина. В амперметрах для измерения небольших токов (до 30 А) шунты обычно помещают в корпусе прибора, для измерения больших токов (до 7500 А) применяют наружные шунты. Шунты могут быть многопредельными, т. е. состоящими из нескольких резисторов, или имеющими несколько отводов, что позволяет изменять коэффициент шунтирования. Классы точности шунтов от 0,02 до 0,5.

Шунты применяют с различными средствами измерений, однако в основном их используют в цепях постоянного тока в магнитоэлектрических приборах. Шунты с измерительными механизмами других типов не применяют из-за малой чувствительности этих механизмов, что приводит к существенному увеличению размеров шунтов и потребляемой ими мощности. Кроме того, при использовании

шунтов на переменном токе возникает дополнительная погрешность от изменения частоты, так как с изменением частоты сопротивления шунта и измерительного механизма изменяются неодинаково.

Изменение окружающей температуры влияет на магнитоэлектрический прибор следующим образом: при повышении температуры удельный противодействующий момент пружин (или растяжек) уменьшается на  $0,2 - 0,4\%$  на каждые  $10\text{ K}$ ; магнитный поток постоянного магнита, а следовательно и индукция в зазоре, уменьшаются приблизительно на  $0,2\%$  на каждые  $10\text{ K}$ , т.е. эти явления оказывают противоположное влияние на показания прибора и потому в приборах малой и средней точности могут не учитываться; изменяется электрическое сопротивление обмотки катушки и токоподводов. Последний фактор является основным источником температурной погрешности магнитоэлектрических амперметров.

Амперметры без шунта не имеют температурной погрешности, так как их показания всегда определяются током, который протекает через амперметры. В амперметрах с шунтом температурная погрешность может оказаться значительной вследствие перераспределения токов между шунтом и подвижной катушкой. Для ее уменьшения применяют специальные цепи температурной компенсации, например, температурная погрешность снижается за счет включения последовательно с подвижной катушкой резистора  $R_D$  из манганина, имеющего температурный коэффициент, близкий к нулю.

В многопредельных амперметрах для изменения пределов измерения применяют многопредельные шунты. Такие амперметры снабжают переключателями диапазонов измерений или несколькими входными зажимами.

В магнитоэлектрических вольтметрах для получения нужного диапазона измерений последовательно с измерительным механизмом включают добавочный резистор из манганина. Влияние температуры на вольтметр зависит от соотношения сопротивления катушки и добавочного резистора, а также от температурных коэффициентов электрического сопротивления катушки и резистора.

В многопредельных вольтметрах используют несколько добавочных резисторов. Поэтому они снабжаются переключателем диапазонов или несколькими входными зажимами. Пропорциональная зависимость угла отклонения подвижной части от тока в катушке приводит к равномерной шкале у магнитоэлектрических амперметров и вольтметров. Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры выпускают переносными и щитовыми. Переносные приборы в большинстве случаев делают высокоточными (классов  $0,1 - 0,5$ ), многопредельными (до

нескольких десятков пределов) и часто комбинированными (вольтамперметрами). Щитовые приборы выпускают однопредельными классов точности 0,5—5. Амперметры выпускают с верхним пределом измерений от  $10^{-7}$  до  $7,5 \cdot 10^3$  А; вольтметры с верхним пределом измерений от  $0,5 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^3$  В.

**Омметры.** На основе магнитоэлектрического измерительного механизма выпускают магнитоэлектрические омметры: с последовательным включением механизма и измеряемого сопротивления, с параллельным включением и с логометрическим измерительным механизмом.

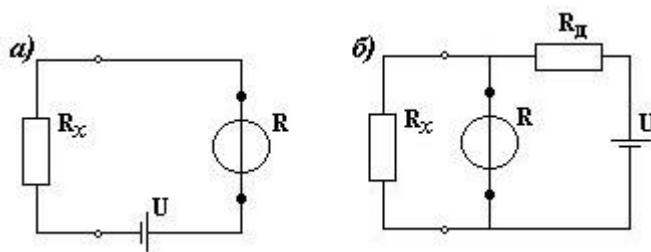


Рисунок 9.2

При последовательном включении измерительного механизма с измеряемым сопротивлением  $R_x$  (рис. 9.2, а) угол отклонения подвижной части измерительного механизма  $\alpha = S_I U / (R + R_x)$ , а при параллельном включении (рис. 9.2, б)  $\alpha = S_I U R_x / [R R_x + R_D (R + R_x)]$ , где  $S_I = B_{SW} / W$  — чувствительность измерительного механизма к току;  $U$  — напряжение источника питания. При  $U = \text{const}$  в обоих случаях угол отклонения  $\alpha$  определяется значением  $R_x$ . Из выражений для  $\alpha$  следует, что шкалы омметров неравномерны. При последовательном включении максимальному углу отклонения подвижной части соответствует нулевое значение измеряемого сопротивления. Омметры с последовательным включением более пригодны для измерения больших сопротивлений, а с параллельным — малых. Обычно эти омметры выполняют в виде переносных приборов классов точности 1,5 и 2,5. При питании омметра сухими батареями, у которых напряжение изменяется со временем, путем изменения индукции в зазоре с помощью магнитного шунта поддерживают  $S_I U = \text{const}$ .

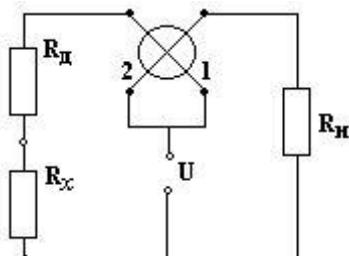


Рисунок 9.3

Находят применение омметры с логометрическим измерительным механизмом (рис. 9.3), где 1 и 2 – катушки логометра, обладающие сопротивлением  $R_1$  и  $R_2$ ;  $R_H$  и  $R_D$  – резисторы. Угол  $\alpha = F[(R_2 + R_D + R_x)/(R_1 + R_H)]$ , т. е. угол отклонения определяется значением  $R_x$  и не зависит от напряжения питания.

Для измерения больших сопротивлений и, прежде всего, для измерения сопротивления изоляции различных электротехнических установок, используют омметры, называемые мегомметрами. В этих приборах питание цепи осуществляется от встроенного генератора с ручным приводом.

### Электромагнитные приборы

**Общие сведения.** Электромагнитные приборы состоят из электромагнитного измерительного механизма с отсчетным устройством и измерительной цепи. Они применяются для измерения переменных и постоянных токов и напряжений, для измерения частоты и фазового сдвига между переменными током и напряжением. Из-за относительно низкой стоимости и удовлетворительных характеристик такие приборы составляют большую часть всего парка щитовых приборов.

**Измерительный механизм.** Вращающий момент в этих механизмах возникает в результате взаимодействия полей одного или нескольких ферромагнитных сердечников подвижной части и магнитного поля катушки, по обмотке которой протекает ток. В настоящее время наибольшее применение получили конструкции измерительных механизмов с плоской катушкой, с круглой катушкой и с закрытым магнитопроводом.

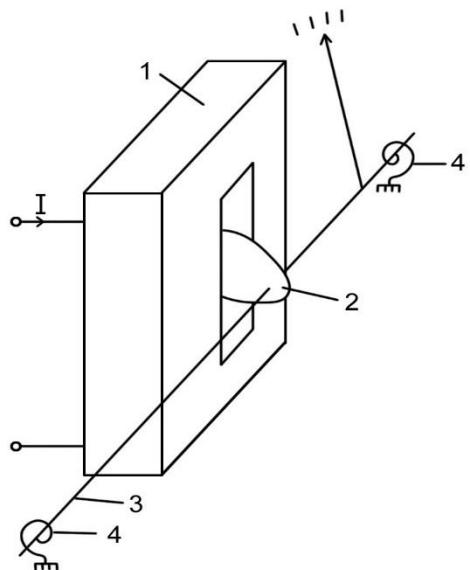


Рисунок 9.4

На рис. 9.4 упрощенно показан механизм с плоской катушкой, где 1 – катушка, по обмотке которой протекает ток; 2 – эксцентрически укрепленный на

оси ферромагнитный сердечник; 3 –ось; 4 –пружины для создания противодействующего момента. При протекании тока  $i$  через катушку сердечник намагничивается и втягивается в зазор катушки. При изменении направления тока сердечник перемагничивается и тоже втягивается в зазор.

### Мгновенный врачающий момент

$$M_t = \frac{dW_{\mathcal{E}}}{d\alpha} = \frac{d(Li^2/2)}{d\alpha} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} i^2$$

где  $W_{\mathcal{E}}$  – энергия электромагнитного поля катушки с сердечником;  $L$  – индуктивность катушки, зависящая от положения сердечника.

Если ток  $i$  – синусоидальный, то мгновенный врачающий момент

$$M_t = \frac{1}{4} \frac{dL}{d\alpha} I_m^2 (1 - \cos 2\omega t),$$

т.е.  $M_t$  имеет постоянную и гармоническую составляющие. Из-за инерционности отклонение подвижной части обычно применяемого электромагнитного механизма при работе его в цепи переменного тока промышленной и более высокой частоты определяется постоянной составляющей момента (см. рис. 4.3)

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M_t dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2,$$

где  $I$  – действующий ток.

Если противодействующий момент создается упругими элементами, то угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{1}{2w} \frac{dL}{d\alpha} I^2 \quad (9.8)$$

Из выражения (9.8) следует, что зависимость угла отклонения подвижной части от тока нелинейна и что поворот подвижной части одинаков как при постоянном токе, так и при переменном токе, имеющем действующее значение, равное значению постоянного тока. Линейную зависимость угла отклонения  $\alpha$  от тока получают для значительной части рабочего диапазона отклонения  $\alpha$ , изготавливая сердечник специальной формы, при которой  $\frac{dL}{d\alpha}$  является требуемой функцией  $\alpha$ .

Электромагнитные измерительные механизмы просты по конструкции и как следствие дешевы и надежны в работе. Они способны выдержать большие перегрузки, что объясняется отсутствием токоподводов к подвижной части. Электромагнитные измерительные механизмы могут работать как в цепях постоянного, так и переменного тока (примерно до 10 кГц).

Малая точность и низкая чувствительность этих механизмов отрицательно сказываются на точности и чувствительности электромагнитных приборов. На работу электромагнитных измерительных механизмов сильное влияние оказывают внешние магнитные поля. Для устранения их влияния применяют магнитное экранирование. Иногда применяют так называемые астатические измерительные механизмы, на которые внешние поля действуют значительно слабее, чем на обычные механизмы.

**Амперметры и вольтметры.** В электромагнитных амперметрах катушка измерительного механизма включается непосредственно в цепь измеряемого тока. Щитовые амперметры выпускают с одним диапазоном измерений, переносные могут иметь несколько диапазонов измерений. Изменение диапазона измерений производят путем переключения секций обмотки катушки, включая их последовательно или параллельно. Для расширения диапазона измерений в цепях переменного тока используют измерительные трансформаторы тока. Шкала электромагнитного амперметра обычно равномерна (в пределах 25—100 %), что достигается подбором формы сердечника.

При использовании амперметров в цепях постоянного тока появляется погрешность от гистерезиса, проявляющаяся в неодинаковых показаниях при увеличении и уменьшении одного и того же тока. При изменении частоты измеряемого тока в амперметрах возникает частотная погрешность вследствие действия вихревых токов в сердечнике и других металлических частях измерительного механизма, пронизываемых магнитным потоком катушки.

Электромагнитный вольтметр состоит из электромагнитного измерительного механизма и включенного последовательно добавочного резистора из манганина, предназначенного для обеспечения необходимого диапазона измерений. Изменение диапазона измерений осуществляется путем подключения различных добавочных резисторов, а также с помощью измерительных трансформаторов напряжения.

### Угол отклонения подвижной части электромагнитного вольтметра

$$\alpha = \frac{1}{2w} \frac{dL}{d\alpha} \frac{U^2}{Z^2},$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи вольтметра. Шкала электромагнитного вольтметра в пределах 25 – 100 % обычно равномерна, что достигается подбором формы сердечника.

В электромагнитных вольтметрах при изменении температуры возникает температурная погрешность, обусловленная изменением сопротивления цепи

вольтметра. В вольтметрах на малые диапазоны измерений эта погрешность может достигать больших значений. При использовании в цепях постоянного тока вольтметры имеют погрешность от гистерезиса. Частотная погрешность у электромагнитных вольтметров выше, чем у электромагнитных амперметров, что объясняется зависимостью сопротивления цепи вольтметра  $Z$  от частоты.

Основное назначение электромагнитных амперметров и вольтметров — измерения в цепях переменного тока промышленной частоты. Промышленность выпускает переносные амперметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 5 мА до 10 А на частоты до 1500 Гц; щитовые однопредельные амперметры классов точности 1,0; 1,5; 2,5 на токи до 300 А со встроенными трансформаторами тока и до 15 кА с наружными трансформаторами тока; переносные вольтметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 1,5 до 600 В на частоты 45 – 100 Гц и классов точности 1 и 2,5 на частоты до 10 кГц; щитовые вольтметры классов точности 1,0; 1,5; 2,5 с верхними пределами измерений от 0,5 до 600 В непосредственного включения и до 450 кВ с трансформаторами напряжения на частоты в диапазоне от 45 до 1000 Гц.

### Индукционные приборы

**Общие сведения.** Принцип действия индукционных измерительных механизмов основан на взаимодействии переменных магнитных потоков и вихревых токов, индуцированных магнитными потоками в подвижной части, выполненной в виде алюминиевого диска. В настоящее время из индукционных приборов находят применение счетчики электрической энергии в цепях переменного тока.

**Счетчики электрической энергии.** Устройство и схема включения индукционного счетчика показаны на рис. 9.5,

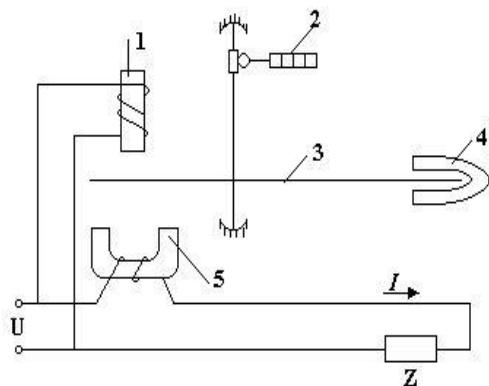


Рисунок 9.5

где 1 —магнитопровод с обмоткой напряжения; 2 — счетный механизм; 3— алюминиевый диск, укрепленный на оси; 4 — постоянный магнит для создания тормозного момента; 5 — П-образный магнитопровод с токовой обмоткой.

Анализ работы индукционного счетчика показывает, что среднее значение вращающего момента пропорционально мощности, т. е.

$$M = kUI \cos \varphi,$$

где  $k$  – постоянный коэффициент.

На подвижную часть счетчика (алюминиевый диск) действует тормозной момент, пропорциональный частоте вращения диска. Этот момент создается в результате действия тока, наводимого во вращающемся между полюсами постоянного магнита диске, и определяется выражением

$$M_T = k_1 \frac{d\alpha}{dt},$$

где  $k_1$  – постоянный коэффициент;  $\frac{d\alpha}{dt}$  – скорость вращения диска.

Приравнивая вращающий и тормозной моменты, получим

$$kUI \cos \varphi = k_1 \frac{d\alpha}{dt}.$$

Число оборотов диска  $N$  за время  $\Delta t$  измерения энергии определяется интегралом по времени от скорости вращения диска  $\frac{d\alpha}{dt}$ , т.е.

$$N = k_2 \int_0^{\Delta t} \left( \frac{d\alpha}{dt} \right) dt = k_2 \frac{k}{k_1} \int_0^{\Delta t} UI \cos \varphi dt = \frac{W}{C},$$

где  $C = k_1/k_2$  – постоянная счетчика;  $W$  – энергия, прошедшая через счетчик за интервал времени  $\Delta t$ .

Отсчет энергии производится по показаниям счетчика оборотов, градуированного в единицах энергии. Единице электрической энергии (обычно 1 кВт·ч), регистрируемой счетным механизмом, соответствует определенное число оборотов подвижной части счетчика. Это соотношение, называемое передаточным числом  $A$ , указывается на счетчике.

Величину, обратную передаточному числу, т. е. отношение зарегистрированной энергии к числу оборотов диска, называют номинальной постоянной  $C_{\text{ном}}$ . Значения  $A$  и  $C_{\text{ном}}$  зависят только от конструкции счетного механизма и для данного счетчика остаются неизменными.

Под действительной постоянной счетчика  $C$  понимают количество энергии, действительно прошедшей через счетчик за один оборот подвижной части. Действительная постоянная в отличие от номинальной зависит от тока нагрузки, а

также от внешних условий (температуры, частоты и т. д.). Зная  $C$  и  $C_{\text{ном}}$ , можно определить относительную погрешность счетчика

$$\delta = (W' - W) / W = (C_{\text{ном}} - C) / C,$$

где  $W'$  — энергия, измеренная счетчиком;  $W$  — действительное значение энергии, прошедшей через счетчик.

Счетчики активной энергии выпускают классов точности 0,5; 1,0; 2; 2,5; счетчики реактивной энергии — 1,5; 2 и 3. Класс точности счетчиков нормирует относительную основную погрешность и другие метрологические характеристики.

Государственным стандартом устанавливается порог чувствительности (в процентах) счетчика, определяемый выражением  $\Delta S = 100 I_{\min} / I_{\text{ном}}$ , где  $I_{\min}$  — минимальное значение тока, при котором диск счетчика начинает безостановочно вращаться;  $I_{\text{ном}}$  — номинальное для счетчика значение тока в токовой обмотке. При этом напряжение и частота тока в цепи должны быть номинальными, а  $\cos \varphi = 1$ . Порог чувствительности не должен превышать 0,4 % — для счетчиков класса точности 0,5 и 0,5 % — для классов 1,0; 1,5 и 2. Для счетчиков реактивной энергии классов 2,5 и 3 значение  $\Delta S$  должно быть не более 1 %. Вращение диска при отсутствии тока в нагрузке и при наличии напряжения в параллельной цепи счетчика называют самоходом. Согласно государственному стандарту самохода не должно быть при любом напряжении от 80 до 110% номинального.

Под действием внешних факторов у счетчика появляются дополнительные погрешности, возникающие, например, вследствие искажения формы кривой тока и напряжения, колебаний напряжения и частоты, резкого перепада мощности, потребляемой нагрузкой, и некоторыми другими факторами.

Выпускаются также трехфазные счетчики активной и реактивной энергии, которые представляют собой как бы три (трехэлементные) или два (двухэлементные) счетчика, объединенные одной осью вращения. Двухэлементные счетчики применяют при измерении энергии в трехпроводных трехфазных цепях, а трехэлементные — в четырехпроводных цепях.

**Измерительные трансформаторы переменного тока.** Измерительные трансформаторы тока и напряжения используют как преобразователи больших переменных токов и напряжений в относительно малые токи и напряжения, допустимые для измерений приборами с небольшими стандартными пределами измерения (например, 5 А, 100 В). Применением измерительных трансформаторов в

цепях высокого напряжения достигается безопасность для персонала, обслуживающего приборы, так как приборы при этом включаются в заземляемую цепь низкого напряжения.

Измерительные трансформаторы состоят из двух изолированных друг от друга обмоток: первичной с числом витков  $w_1$  и вторичной —  $w_2$ , помещенных на ферромагнитный сердечник. Для правильного включения трансформаторов и приборов зажимы трансформатора обозначают, как показано на рисунке.

В трансформаторах тока, как правило, первичный ток  $I_1$  больше вторичного  $I_2$ , поэтому у них  $w_1 < w_2$ . В трансформаторах тока с первичным номинальным током  $I_{1H}$  выше 500 А первичная обмотка может состоять из одного витка в виде шины, проходящей через окно сердечника.

В трансформаторах напряжения первичное напряжение  $U_1$  больше вторичного  $U_2$ , поэтому у них  $w_1 > w_2$ . Вторичное номинальное напряжение  $U_{2H}$  у стандартных трансформаторов составляет 100 или  $100/\sqrt{3}$  В при разных значениях первичного номинального напряжения  $U_{1H}$ .

По схемам включения в измеряемую цепь и по условию работы трансформаторы тока и напряжения отличаются друг от друга. Первичную обмотку трансформатора тока включают в измеряемую цепь последовательно, а трансформаторов напряжения параллельно. Измерительные приборы включают во вторичную обмотку трансформаторов.

По показаниям приборов можно определить значения измеряемых величин. Для этого необходимо показания приборов умножить на действительные коэффициенты трансформации  $K_I$  и  $K_U$ . Для трансформатора тока  $K_I = I_1/I_2$ , а для трансформатора напряжения  $K_U = U_1/U_2$ .

Так как  $I_2$  и  $U_2$  изменяются не пропорционально  $I_1$  и  $U_1$ , то  $K_I$  и  $K_U$  непостоянны. Они зависят от значений токов и напряжений, характера и значения нагрузки вторичной цепи, частоты тока, а также от конструкции трансформатора и материала сердечника и обычно неизвестны. Поэтому показания приборов умножают не на действительные, а на постоянные номинальные коэффициенты трансформации:

$$K_{I_H} = I_{1H} / I_{2H}; \quad K_{U_H} = U_{1H} / U_{2H}.$$

Определение измеряемых величин по номинальным коэффициентам трансформации приводит к погрешностям. Относительная погрешность (в процентах) вследствие неравенства действительного и номинального коэффициентов трансформации для трансформатора тока

$$f_I = 100(I_1' - I_1) / I_1 = 100(K_{I_H} - K_I) / K_I,$$

а для трансформатора напряжения

$$f_U = 100(U_1' - U_1) / U_1 = 100(K_{U_H} - K_U) / K_U,$$

где  $I_1' = K_{I_H} I_2$ ;  $I_1 = K_I I_2$ ,  $U_1' = K_{U_H} U_2$ ;  $U_1 = K_U U_2$ .

Погрешность  $f_I$  называют токовой погрешностью, а  $f_U$  — погрешностью напряжения. У измерительных трансформаторов имеется также угловая погрешность из-за неточности передачи фазы первичной величины вторичной величине. Угловая погрешность измерительных трансформаторов оказывает влияние на показания приборов, отклонение подвижной части которых зависит от фазового сдвига между токами в цепях этих приборов (ваттметры, счетчики электрической энергии, фазометры).

Как известно из теории трансформаторов, в идеальном случае фазовый сдвиг между вектором вторичного тока  $\mathbf{I}_2$  трансформатора тока и вектором первичного тока  $\mathbf{I}_1$  составляет  $180^\circ$ . Такой же фазовый сдвиг должен быть между векторами вторичного  $\mathbf{U}_2$  и первичного  $\mathbf{U}_1$  напряжений в трансформаторе напряжения. В реальных трансформаторах угол между повернутым на  $180^\circ$  вектором вторичной величины ( $-\mathbf{I}_2$  или  $-\mathbf{U}_2$ ) и соответствующим вектором первичной величины ( $\mathbf{I}_1$  или  $\mathbf{U}_1$ ) не равен нулю, а составляет угол  $\delta$ , который называют угловой погрешностью трансформатора. Погрешность считается положительной, если повернутый на  $180^\circ$  вектор второй величины опережает вектор первой величины.

*Измерительные трансформаторы тока.* Трансформатор тока работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания, так как в его вторичную обмотку включаются приборы с малым сопротивлением.

Для переносных трансформаторов тока установлены классы точности от 0,01 до 0,2. Их изготавливают на номинальную частоту или область частот от 25 Гц до 10 кГц. Трансформаторы тока выпускают на номинальные значения первичного тока от 0,1 А до 30 кА и на номинальное значение вторичного тока 5 А. Стационарные трансформаторы тока для частоты 50 Гц делают на номинальные первичные токи от 1 А до 40 кА и номинальные вторичные токи 1; 2; 2,5; 5 А. Классы точности этих трансформаторов от 0,2 до 10. Трансформаторы тока изготавливают на определенную номинальную нагрузку, например, для стационарных трансформаторов от 2,5 до 100 В·А.

*Измерительные трансформаторы напряжения.* Измерительные трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к режиму холостого хода, так

как во вторичную обмотку включают приборы с относительно большим внутренним сопротивлением.

Стационарные трансформаторы напряжения изготавливают на номинальные первичные напряжения от 220 В до 35 кВ для номинальной нагрузки от 5 до 25 В·А с  $\cos\varphi = 0,8 \div 1,0$ . Лабораторные трансформаторы чаще всего бывают переносными на несколько пределов измерения. Для трехфазных цепей изготавливают трехфазные трансформаторы напряжения.

### Электронные аналоговые измерительные приборы

#### Общие сведения

Электронные аналоговые измерительные приборы и преобразователи представляют собой такие средства измерений, в которых преобразование сигналов измерительной информации осуществляется с помощью аналоговых электронных устройств. Выходной сигнал в электронных аналоговых средствах измерений является непрерывной функцией измеряемой величины. Применение электронных устройств в средствах измерений обусловлено, в первую очередь, возможностью повышения ряда важных метрологических и других функциональных характеристик таких средств измерений.

Наиболее важными метрологическими характеристиками электронных аналоговых измерительных приборов являются: *высокая чувствительность, широкий диапазон измерений, относительно малая потребляемая мощность от измерительной цепи (или большое входное сопротивление), широкий частотный диапазон измеряемых величин*.

Применение аналоговой электронной техники может привести к увеличению погрешностей преобразования сигналов. Поэтому во многих случаях аналоговые электронные приборы имеют сравнительно невысокие классы точности.

Широкие функциональные возможности открываются при использовании в средствах измерений электронно-лучевых трубок, позволяющих осуществить визуализацию сигналов. В первую очередь эти возможности реализуются в электронно-лучевых осциллографах.

Электронные средства измерений принципиально могут быть применены для измерений практически всех электрических и многих неэлектрических величин. Эти уникальные возможности электронных средств измерений нашли свое применение при создании измерительных преобразователей. Такие преобразователи, в частности, используются в информационно-измерительных системах.

Среди показывающих средств измерений – приборов в настоящее время широкое признание получили такие электронные измерительные приборы как электронно-лучевые осциллографы, электронные вольтметры, омметры, анализаторы спектра и др. Эти приборы имеют ряд достоинств, положительно отличающих их от других средств измерений. В то же время некоторые аналоговые приборы, например, частотомеры и фазометры, вытесняются соответствующими цифровыми приборами, что обусловлено относительной простотой преобразования этих параметров в кодовый сигнал.

### Измерительные усилители

Для усиления сигналов постоянного и переменного тока, т. е. для расширения пределов измерения в сторону малых сигналов, применяют измерительные усилители. По диапазону частот усиливаемых сигналов измерительные усилители бывают для постоянного тока и напряжения, низкочастотными (20 Гц ... 200 кГц), высокочастотными (до 250 МГц) и селективными, усиливающими сигналы в узкой полосе частот. Измерительные усилители выполняют с нормированной погрешностью коэффициента передачи. Электронные измерительные усилители позволяют измерять сигналы от 0,1 мВ и 0,3 мкА с погрешностью от 0,1 до 1 %. При меньших токах и напряжениях применяют фотогальванометрические усилители. Для усиления токов и напряжений от источников с большим внутренним сопротивлением используют электрометрические усилители, отличающиеся большим входным сопротивлением (до  $10^{12}$  Ом). Серийно выпускаемые измерительные усилители имеют унифицированный номинальный выходной сигнал 10 В или 5 мА.

### Электронные вольтметры

По своему назначению и принципу действия наиболее распространенные вольтметры подразделяются на вольтметры постоянного тока, переменного тока, универсальные, импульсные и селективные.

**Вольтметры постоянного тока.** Упрощенная структурная схема таких вольтметров показана на рис. 9.6,



Рисунок 9.6

где ВД – входной делитель напряжения, УПТ – усилитель постоянного тока, ИМ – магнитоэлектрический измерительный механизм. Угол отклонения указателя измерительного механизма

$$\alpha = k_{\text{ВД}} k_{\text{УПТ}} S_U U_X = k_V U_X,$$

где  $k_{\text{ВД}}$ ,  $k_{\text{УПТ}}$  – коэффициенты преобразования (деления и усиления) соответственно ВД и УПТ;  $S_U$  – чувствительность к напряжению измерительного механизма;  $k_V$  – коэффициент преобразования электронного вольтметра;  $U_X$  – измеряемое напряжение.

Последовательное соединение делителя напряжения и усилителя является характерной особенностью построения всех электронных вольтметров. Такая структура позволяет делать вольтметры многопредельными с широким диапазоном измерений за счет широкого изменения общего ( $k_{\text{ВД}} k_{\text{УПТ}}$ ) коэффициента преобразования. В дальнейшем для упрощения структурных схем входной делитель не будет изображаться на рисунках.

Недостатком УПТ, используемого в вольтметрах постоянного тока, являются нестабильность его работы, проявляющаяся в изменении коэффициента усиления  $k_{\text{УПТ}}$  и в т. н. «дрейфе нуля» (самопроизвольном изменении выходного сигнала). В связи с этим применяют УПТ с небольшим коэффициентом усиления, что определяет невысокую чувствительность вольтметров постоянного тока. Как правило, верхний предел измерений не бывает ниже десятков или единиц милливольт. При этом обеспечивается достаточно большое входное сопротивление вольтметра.

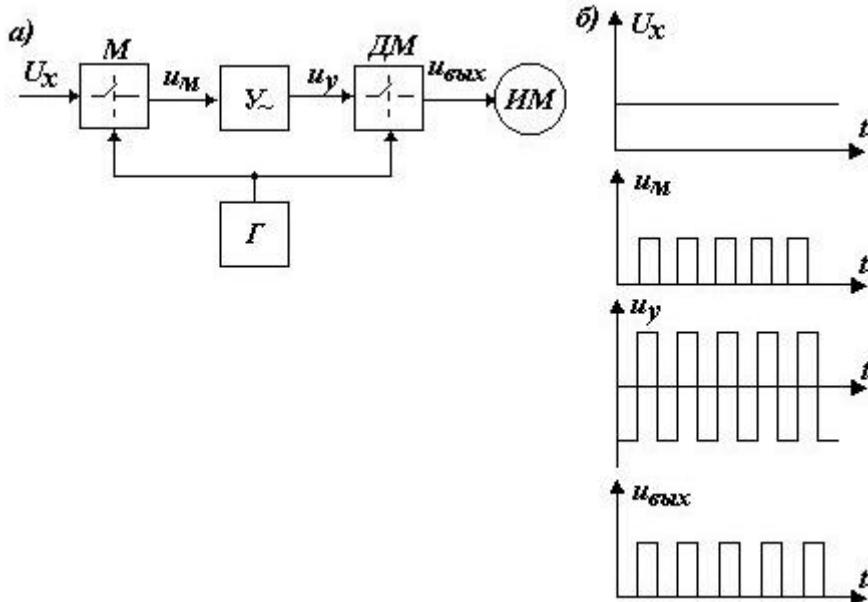


Рисунок 9.7

Для уменьшения влияния нестабильности УПТ в вольтметрах постоянного тока предусматривается возможность регулировки перед измерением «нуля» и коэффициента усиления.

Вольтметры постоянного тока редко используют как самостоятельные приборы, в то же время их широко применяют в составе универсальных вольтметров. Для создания высокочувствительных вольтметров постоянного тока (микровольтметров) применяют усилители постоянного тока, построенные по схеме М-ДМ (модулятор – демодулятор), показанной на рис. 9.7, *a*, где М – модулятор; ДМ – демодулятор; Г – генератор;  $U_{\sim}$  – усилитель переменного тока. Усилители переменного тока не пропускают постоянную составляющую сигнала, а, следовательно, у них отсутствует дрейф нуля, и имеют достаточно большой и стабильный коэффициент усиления. Это позволяет повысить чувствительность и точность вольтметров. Для того чтобы использовать такой усилитель в вольтметрах постоянного тока, необходимо преобразовать постоянное измеряемое напряжение в переменное, один из параметров которого (информационный параметр) был бы пропорционален измеряемому напряжению. Такая процедура может быть реализована с помощью амплитудно-импульсной модуляции. На рис.9.7, *б* показана упрощенная временная диаграмма напряжений на выходе отдельных блоков усилителя.

Генератор управляет работой модулятора и демодулятора, представляющих собой в простейшем случае аналоговые ключи, синхронно замыкая и размыкая их с некоторой частотой задающего генератора. На выходе модулятора возникает однополярный импульсный сигнал, амплитуда которого пропорциональна измеряемому напряжению. Переменная составляющая этого сигнала усиливается усилителем  $U_{\sim}$ , а затем выпрямляется демодулятором. Применение управляемого демодулятора (а не обычного выпрямителя) делает вольтметр чувствительным к полярности входного сигнала. Необходимость выпрямления обусловлена тем, что магнитоэлектрический измерительный механизм чувствителен только к постоянной составляющей (среднему значению) сигнала. При заданных и постоянных параметрах импульсов среднее значение напряжения выходного сигнала пропорционально входному напряжению  $U_{CP} = k_M k_U k_{DM} U_X$ , где  $k_M$  и  $k_{DM}$  коэффициенты преобразования модулятора и демодулятора,  $k_U$  – коэффициент усиления усилителя, и следовательно, угол отклонения указателя ИМ  $\alpha = S_U U_{CP} = k_M k_U k_{DM} U_X = k_V U_X$ .

**Вольтметры переменного тока.** Такие вольтметры состоят из преобразователя переменного напряжения в постоянное, усилителя и магнитоэлектрического

измерительного механизма.

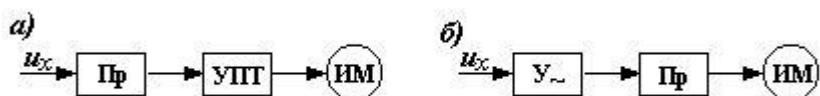


Рисунок 9.8

Возможны две обобщенные структурные схемы вольтметров переменного тока (рис. 9.8), различающиеся своими характеристиками. В вольтметрах по схеме рис. 9.8, *a* измеряемое напряжение  $u_x$  сначала преобразуется в постоянное напряжение, которое затем подается на УПТ и ИМ, являющиеся, по существу, вольтметром постоянного тока. Преобразователь *Пр* представляет собой малоинерционное нелинейное звено (см. далее), поэтому вольтметры с такой структурой могут работать в широком частотном диапазоне (от десятков герц до  $10^3$  МГц). Для уменьшения влияния распределенных емкостей и индуктивностей входного кабеля и входной цепи прибора преобразователи обычно выполняют в виде выносных узлов-пробников. В то же время указанные недостатки УПТ и особенности работы нелинейных элементов при малых напряжениях не позволяют делать такие вольтметры высокочувствительными. Обычно их верхний предел измерений при максимальной чувствительности составляет десятки – единицы милливольт.

В вольтметрах, выполненных по схеме 9.8, *b*, благодаря предварительному усилению удается повысить чувствительность. Однако создание усилителей переменного тока с большим коэффициентом усиления, работающих в широком диапазоне частот, – достаточно трудная техническая задача. Поэтому такие вольтметры имеют относительно низкий частотный диапазон (5...20 МГц); верхний предел измерений при максимальной чувствительности составляет десятки или сотни микровольт.

В зависимости от вида преобразователя переменного напряжения в постоянное отклонения указателя измерительного механизма вольтметров могут быть пропорциональны амплитудному (пиковому), среднему (средневыпрямленному) или действующему значениям измеряемого напряжения. В связи с этим вольтметры называют соответственно вольтметрами амплитудного, среднего или действующего значения. Однако независимо от вида преобразователя шкалу вольтметров переменного тока, как правило, градуируют в действующих значениях напряжения синусоидальной формы.

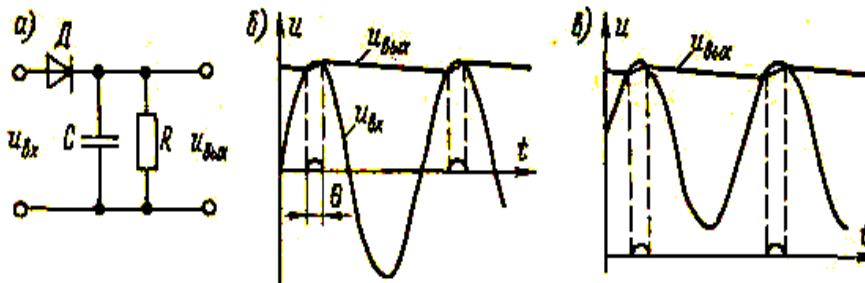


Рисунок 9.9

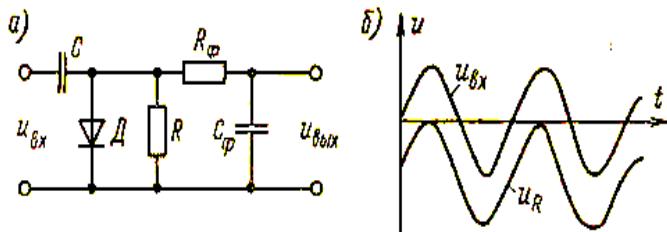


Рисунок 9.10

Вольтметры амплитудного значения имеют преобразователи амплитудных значений (пиковые детекторы) с открытым (рис. 9.9, а) или закрытым (рис. 9.10, а) входами, где  $u_{\text{вх}}$  и  $u_{\text{вых}}$  – входное и выходное напряжения преобразователя. Если вольтметр имеет структуру рис. 9.9, а, то для преобразователя  $u_{\text{вх}} = u_x$ . В амплитудных преобразователях с открытым входом конденсатор заряжается практически до максимального  $u_x^{\max}$  положительного (при данном включении диода) значения входного напряжения (см. рис. 9.9, б). Пульсации напряжения  $u_{\text{вых}}$  на конденсаторе объясняются его подзарядом при открытом диоде, когда  $u_{\text{вх}} > > u_{\text{вых}}$ , и его разрядом через резистор  $R$  при закрытом диоде, когда  $u_{\text{вх}} < u_{\text{вых}}$ . Как видно из рисунка, подзаряд конденсатора происходит лишь в короткие промежутки времени  $\theta$ , определяемые постоянными времени заряда  $\tau_3$  и разряда  $\tau_p$ . Для того чтобы пульсации напряжения на выходе преобразователя были незначительными, необходимо обеспечить  $\tau_3 < 1/f_B$ ,  $\tau_p > 1/f_H$ , где  $f_B$ ,  $f_H$  – верхняя и нижняя границы частотного диапазона вольтметра. При этом среднее значение выходного напряжения  $u_{\text{ср}} \approx u_x^{\max}$  и, следовательно, угол отклонения указателя измерительного механизма

$$\alpha = k_V u_x^{\max},$$

где  $k_V$  – коэффициент преобразования вольтметра.

Особенностью амплитудных преобразователей с открытым входом является то, что они пропускают постоянную составляющую входного сигнала (положительную для данного включения диода). Так, при  $u_{\text{вх}} = U_0 + U_m \sin \omega t$  с  $U_0 > U_m$

(см. рис. 9.9, в) среднее значение выходного напряжения  $u_{\text{ср}} \cong U_0 + U_m$ . Следовательно,  $\alpha = k_V(U_0 + U_m)$ . Очевидно, при  $u_{\text{вх}} < 0$  подвижная часть ИМ не будет отклоняться, поскольку в этом случае закрыт диод  $D$ .

В преобразователях с закрытым входом (рис. 9.10, а, б) в установленном режиме на резисторе  $R$  независимо от наличия постоянной составляющей входного сигнала имеется пульсирующее напряжение  $u_R$ , изменяющееся от 0 до  $-2 U_m$ , где  $U_m$  – амплитуда переменной составляющей входного напряжения. Среднее значение этого напряжения практически равно  $U_m$ . Для уменьшения пульсаций выходного напряжения в таких преобразователях устанавливается фильтр нижних частот  $R_\Phi C_\Phi$ . Таким образом, показания вольтметра в этом случае определяются только амплитудным значением переменной составляющей входного напряжения  $u_x$ , т. е.  $a = k_V U_m$ . Особенности амплитудных преобразователей с открытым и закрытым входами следует учитывать при измерении электронными вольтметрами.

Поскольку шкала вольтметров градуируется в действующих значениях синусоидального напряжения, то при измерении напряжений другой формы необходимо делать соответствующий пересчет, если известен коэффициент амплитуды измеряемого напряжения. Амплитудное значение измеряемого напряжения несинусоидальной формы  $U_m = k_{a,c} U_{\text{пр}} = 1,41 U_{\text{пр}}$  где  $k_{a,c} = 1,41$  – коэффициент амплитуды синусоиды;  $U_{\text{пр}}$  – значение напряжения, отсчитанное по шкале прибора. Действующее значение измеряемого напряжения  $U = U_m / k_a = 1,41 U_{\text{пр}} / k_a$ , где  $k_a$  – коэффициент амплитуды измеряемого напряжения.

*Вольтметры среднего значения* имеют преобразователи переменного напряжения в постоянное, аналогичные преобразователям, используемым в выпрямительных приборах. В этом случае на выпрямительный преобразователь подается предварительно усиленное напряжение  $u_x$ , что повышает чувствительность вольтметров и уменьшает влияние нелинейности диодов. Угол отклонения подвижной части измерительного механизма у таких вольтметров пропорционален среднеподъемленному значению измеряемого напряжения

$$\alpha = k_V \frac{1}{T} \int_0^T |u_x(t)| dt = k_V U_{x \text{ср}}.$$

Шкала таких вольтметров также градуируется в действующих значениях синусоидального напряжения. При измерении напряжения несинусоидальной формы среднее значение этого напряжения  $U_{\text{ср}} = U_{\text{пр}} / k_{\phi,c} = U_{\text{пр}} / 1,11$ , а действующее –  $U = k_\phi U_{\text{ср}} = k_\phi U_{\text{пр}} / 1,11$ , где  $U_{\text{пр}}$  – показание вольтметра;  $k_{\phi,c} = 1,11$  – коэффициент формы синусоиды;  $k_\phi$  – коэффициент формы измеряемого напряжения.

*Электронные вольтметры с преобразователями действующего значения.*

Такие вольтметры могут быть построены на основе различных структурных и схемотехнических решений. В то же время наиболее характерные преобразования, используемые в таких вольтметрах, в их упрощенном варианте могут быть представлены на рис. 9.11.

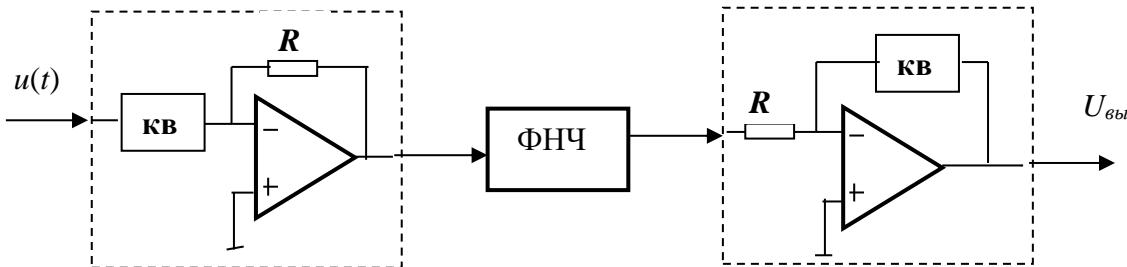


Рисунок 9.11

Преобразователь реализует процедуру оценки действующего значения некоторого входного напряжения  $u(t)$ , т. е. вычисляет функционал  $U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} u^2(t) dt}$ . В

этой связи преобразователь удобно представить в виде последовательного включения 3-х звеньев: квадратирующего усилителя (преобразователя), усреднителя в виде фильтра низких частот (ФНЧ), устройства извлечения квадратного корня. Схемы реализованы на операционных усилителях.

Важными элементами данных схем являются квадратирующие элементы «КВ», имеющие вольтамперные характеристики  $i(t) = Ku^2(t)$ . Последовательность преобразования сигналов следующая. На выходе 1-го звена имеем напряжение

$$u_I(t) = i(t)R = KRu^2(t) = C_1 u^2(t),$$

где для упрощения записи принято  $C_1 = KR$ .

На выходе усреднителя (если полоса частот входного сигнала много больше полосы частот ФНЧ) получим

$$U_{\phi_{\text{нч}}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_I(t) dt = (C_1) \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u^2(t) dt = (C_1) U^2.$$

Для получения действующего значения из предыдущего выражения необходимо извлечь квадратный корень. Эта задача решается третьим звеном. Входной ток 3-го звена равен  $U_{\phi_{\text{нч}}} / R$ , что соответствует выходному напряжению звена  $KU_{\text{вых}}^2 = U_{\phi_{\text{нч}}} / R$ . Отсюда получим  $U_{\text{вых}} = U$ , где  $U$  – действующее значение входного напряжения  $u(t)$ .

**Универсальные вольтметры.** Универсальные вольтметры предназначены

для измерения в широком диапазоне напряжений постоянного и переменного токов и сопротивлений постоянному току.

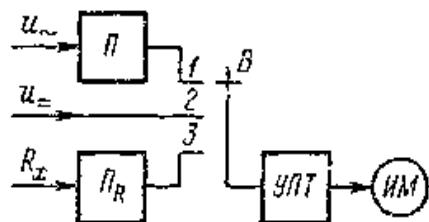


Рисунок 9.12

На рис.9.12 представлена обобщенная структурная схема универсального вольтметра, где  $B$  – переключатель рода работ;  $P$  – преобразователь переменного напряжения в постоянное;  $P_R$  – преобразователь сопротивления в напряжение постоянного тока. На вход преобразователя подключается неизвестное сопротивление  $R_x$ . Выходное напряжение преобразователя  $P_R$ , зависит от неизвестного сопротивления:  $U_{\text{вых}} = f(R_x)$ . На основании этой зависимости шкала прибора градуируется в единицах сопротивления.

В зависимости от положения переключателя  $B$  вольтметр работает в режиме вольтметра переменного тока  $P$  (положение 1), вольтметра постоянного тока (положение 2) или омметра (положение 3). Во всех режимах с переключателя на вход УПТ подается постоянное напряжение, в каждом конкретном случае пропорциональное измеряемой величине.

На отсчетном устройстве измерительного механизма  $IM$  имеются три группы шкал: шкалы действующих значений переменного напряжения, шкалы постоянного напряжения и шкалы сопротивлений. Такие функциональные возможности универсального вольтметра сделали его весьма удобным в применении.

**Импульсные вольтметры.** Для измерения амплитуды импульсных сигналов различной формы применяют импульсные вольтметры. Особенности работы импульсных вольтметров определяются малой длительностью  $t_i$  измеряемых импульсов (от 10–100 нс) и значительной скважностью  $q = t_i / T_i$  (до  $10^9$ ), где  $T_i$  – период следования импульсов. Импульсные вольтметры градуируют в амплитудных значениях измеряемых импульсов.

Импульсные вольтметры могут быть выполнены по структурной схеме рис.9.8, *a*, при этом используют преобразователи амплитудных значений с открытым входом, выходное напряжение которых должно быть равно амплитуде  $U_m$  измеряемых импульсов. Большая скважность импульсов и малая их длительность предъявляют жесткие требования к преобразователям амплитудных значений.

Поэтому в импульсных вольтметрах применяют специальные, в частности компенсационные, схемы амплитудных преобразователей (рис. 9.13).

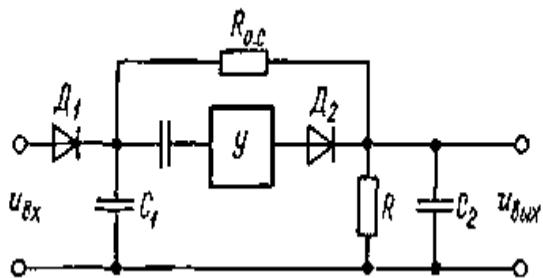


Рисунок 9.13

Входные импульсы  $u_{\text{вх}}$  заряжают конденсатор  $C_1$ . Переменная составляющая напряжения на этом конденсаторе, вызванная подзарядом его измеряемыми импульсами и разрядом между импульсами (аналогично рис. 9.9, в), усиливается усилителем  $Y$  переменного тока и выпрямляется с помощью диода  $D_2$ . Постоянная времени цепи  $RC_2$  выбирается достаточно большой, поэтому напряжение на конденсаторе  $C_2$  в промежутке между импульсами изменяется незначительно. С выхода преобразователя при помощи резистора обратной связи  $R_{\text{oc}}$  на конденсатор  $C_1$  подается компенсирующее напряжение. При большом коэффициенте усиления усилителя это приводит к значительному уменьшению переменной составляющей напряжения на конденсаторе  $C_1$ , вследствие чего в установившемся режиме напряжение на этом конденсаторе практически равно амплитуде  $U_m$  измеряемых импульсов, а выходное напряжение пропорционально этой амплитуде:  $u_{\text{вых}} = U_m R / (R + R_{\text{oc}})$ .

В нормативно-технической документации для импульсных вольтметров указывается диапазон допустимых значений длительности импульсов (или их частоты) и скважность, при которых погрешности вольтметров находятся в пределах нормированных значений.

**Селективные вольтметры.** Такие вольтметры предназначены для измерения действующего значения напряжения в некоторой полосе частот или действующего значения отдельных гармонических составляющих измеряемого сигнала.

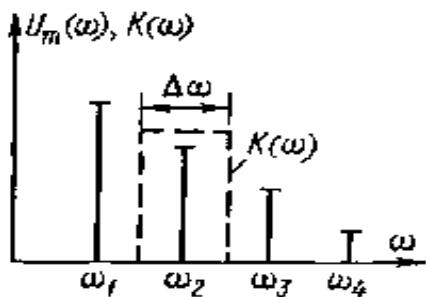


Рисунок 9.14

Принцип действия селективного вольтметра заключается в выделении отдельных гармонических составляющих сигнала или сигнала узкой полосы частот с помощью перестраиваемого полосового фильтра и измерении действующего значения выделенных сигналов. На рис. 9.14 сплошными вертикальными линиями показан спектр некоторого измеряемого сигнала, а штриховой линией – идеализированная амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра, имеющего коэффициент передачи  $K(\omega) = k = \text{const}$  – для  $\omega \in [\omega_{\text{п.ф.}} \pm \Delta\omega/2]$ ,  $K(\omega) = 0$  – для остальных частот, где  $\omega_{\text{п.ф.}}$  – средняя частота настройки полосового фильтра, а  $\Delta\omega$  – полоса пропускания фильтра. Частоту  $\omega_{\text{п.ф.}}$  можно изменять в пределах, определяемых устройством селективного вольтметра. Для измеряемого сигнала со спектром, изображенным на рис. 9.14, на выходе полосового фильтра появится синусоидальный сигнал с частотой  $\omega_2$  и амплитудой  $kU_m(\omega_2)$ . Следовательно, измеряя действующее значение выходного сигнала полосового фильтра, можно определить действующее значение гармонической составляющей измеряемого сигнала на частоте  $\omega_2$ . Изменяя частоту  $\omega_{\text{п.ф.}}$ , можно измерять действующие значения различных гармонических составляющих.

Физически реализуемый полосовой фильтр не обладает строго прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой. Это может привести к тому, что через такой фильтр пройдут соседние гармонические составляющие с некоторым коэффициентом  $k(\omega) \neq 0$ . Кроме того, спектр измеряемого сигнала может быть таким, что через полосовой фильтр в пределах полосы пропускания  $\Delta\omega$  пройдут сразу несколько гармонических составляющих этого сигнала. В этих случаях селективный вольтметр измеряет действующее значение суммы гармонических составляющих, прошедших через фильтр, с учетом реальных коэффициентов передачи для каждой составляющей.

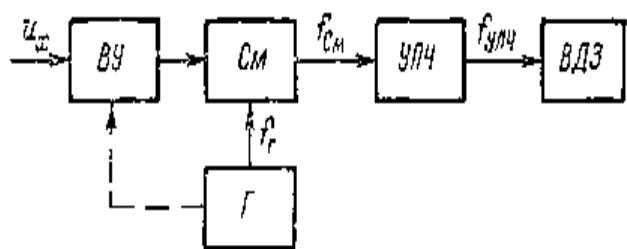


Рисунок 9.15

Упрощенная структурная схема селективного вольтметра показана на 9.15. Измеряемый сигнал  $u_x$  через избирательный входной усилитель  $ВУ$  подается на смеситель  $См$ , предназначенный для преобразования частотного спектра измеряемого сигнала. На выходе смесителя появляется сигнал, пропорциональный измеряемому сигналу, но с частотами спектра  $f_{CMi} = f_\Gamma - f_{xi}$ , где  $f_{xi}$  – частота гармонических составляющих входного сигнала;  $f_\Gamma$  – частота сигнала синусоидального генератора  $\Gamma$ ; называемого также гетеродином. Усилитель промежуточной частоты  $УПЧ$  настроен на некоторую фиксированную среднюю частоту  $f_{УПЧ}$ . Поэтому на выход  $УПЧ$  пройдет только та составляющая выходного сигнала смесителя, частота которой  $f_{CMi} = f_{УПЧ}$ . Этот сигнал соответствует гармонической составляющей измеряемого сигнала с частотой  $f_{xi} = f_\Gamma - f_{УПЧ}$ . Действующее значение этой гармонической составляющей измеряется вольтметром действующего значения  $ВДЗ$ . Изменяя частоту генератора  $f_\Gamma$  можно измерять действующее значение различных гармонических составляющих сигнала  $u_x$ .

Функцию полосового фильтра в этой схеме выполняет  $УПЧ$ . Благодаря фиксированному (неперестраиваемому) значению частоты настройки  $УПЧ$  этот усилитель имеет большой коэффициент усиления и узкую полосу пропускания, что обеспечивает высокую чувствительность и избирательность селективного вольтметра.

### Электронные омметры

Электронные омметры имеют широкий диапазон измеряемых сопротивлений ( $10^{-4} – 10^{17}$  Ом) и достаточно просты в эксплуатации. Точность таких омметров, как правило, невысока: приведенная погрешность составляет единицы процентов и увеличивается до 10 – 15 % при измерении больших сопротивлений ( $R > 10^{12}$  Ом). В зависимости от диапазона измерений их называют *омметрами, миллиомметрами, мегомметрами или тераомметрами*.

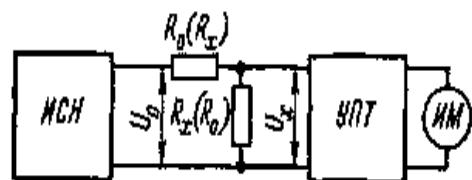


Рисунок 9.16

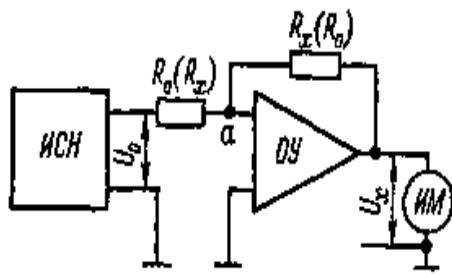


Рисунок 9.17

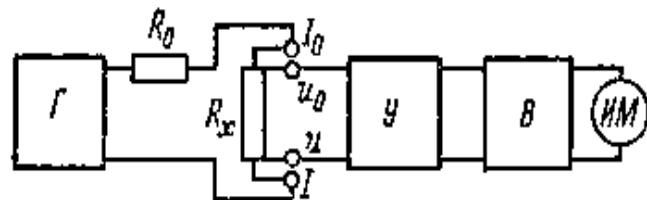


Рисунок 9.18

В основе работы электронных омметров лежит преобразование измеряемого сопротивления в функционально связанное с ним напряжение постоянного тока, которое подается на магнитоэлектрический измерительный механизм; при этом шкала измерительного механизма градуируется в единицах сопротивления. Наибольшее распространение получили схемы омметров, изображенные на рис. 9.16 и рис. 9.17, где ИСН – источник стабильного напряжения  $U_0$ ; УПТ – усилитель постоянного тока; ОУ – операционный усилитель; ИМ – измерительный механизм;  $R_x$  – измеряемое сопротивление;  $R_0$  – известное сопротивление;  $U_x$  – напряжение, функционально связанное с измеряемым сопротивлением  $R_x$ . Возможны два варианта включения  $R_0$  и  $R_x$ , показанные на рисунках без скобок (1-й вариант) и со скобками (2-й вариант).

В омметрах, построенных по схеме рис. 9.16, используется УПТ с большим входным сопротивлением  $R_{\text{вх}}$ . Пренебрегая шунтирующим влиянием  $R_{\text{вх}}$ , имеем  $a = kU_x = kU_0R_x/(R_0 + R_x)$  – для 1-го варианта и  $a = kU_x = kU_0R_0/(R_0 + R_x)$  – для 2-го варианта включения  $R_0$  и  $R_x$ , где  $\alpha$  – угол отклонения подвижной части ИМ;  $k$

– коэффициент преобразования УПТ и ИМ. Из формул видно, что в широком диапазоне измеряемых сопротивлений шкала таких омметров неравномерна с диапазоном показаний соответственно 0–∞ и ∞–0.

Для повышения точности отсчитывания весь диапазон измерений омметра разбивают на поддиапазоны, каждому из которых соответствует свое значение сопротивления  $R_0$ . Этим достигается изменение цены деления шкалы для одних и тех же значений  $R_x$ . Переключением  $R_0$  выбирают наиболее удобную шкалу для отсчитывания показаний в требуемом диапазоне измерений.

Для уменьшения погрешностей измерений, вызванных нестабильностью работы отдельных узлов прибора, особенно УПТ, в таких омметрах предусматривают регулировки «Установка нуля» при замкнутых входных зажимах ( $R_x = 0$ ) и «Установка ∞» при разомкнутых зажимах ( $R_x \rightarrow \infty$ ). Эти регулировки осуществляют путем изменения коэффициента преобразования усилителя и установки «нуля» его выходного сигнала.

Рассмотренная схема нашла применение в комбинированных приборах, в частности в универсальных вольтметрах, в которых усилитель постоянного тока используется для измерения как напряжения, так и сопротивления. Так, универсальный вольтметр В7-17 имеет диапазоны измерений сопротивлений 10 Ом ... 1000 МОм; класс точности 2,5.

В омметрах, построенных по схеме рис. 9.17, применен операционный усилитель, в цепь отрицательной обратной связи которого включен резистор  $R_x(R_0)$ . Операционный усилитель – усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления  $k$  и большим входным сопротивлением. Поэтому потенциал точки  $a$ , определяемый как  $U_x/k$ , и входной ток усилителя практически равны нулю. Следовательно, токи, протекающие через резисторы  $R_0$  и  $R_x$ , равны и справедливы соотношения  $U_0/R_0 = U_x/R_x$  или  $U_0/R_x = U_x/R_0$  в зависимости от схемы включения  $R_0$  и  $R_x$ . Для 1-го варианта включения  $U_x = U_0 R_x / R_0$  и, следовательно,  $\alpha = S_y U_0 R_x / R_0$ , где  $S_y$  – чувствительность ИМ. Такая схема включения предпочтительна, поскольку омметр имеет равномерную шкалу. Верхний предел измерений в таких омметрах изменяют путем подключения резисторов  $R_0$  различных сопротивлений. Такая схема используется в электронном омметре Е6-10, имеющем диапазон измерений 10 Ом ... 1000 МОм и класс точности 2,5.

В тераомметрах при измерении больших сопротивлений ( $R_x > 10^6 \dots 10^{12}$  Ом) использование 1-го варианта схемы рис. 9.17 приводит к существенному росту погрешности. Это обусловлено тем, что при ограничении выходного напряжения

$U_x$ , определяемого характеристиками  $OY$ , для больших  $R_x$  необходимо устанавливать большие сопротивления  $R_0$ , обеспечить требуемую точность которых достаточно трудно. Кроме того, токи, протекающие через  $R_x$  и  $R_0$ , в этом случае оказываются столь малыми, что становятся соизмеримыми с входными токами усилителя и токами утечки. Поэтому находит применение 2-й вариант включения  $R_0$  и  $R_x$  (на схеме в скобках). Шкала такого тераомметра неравномерна, поскольку  $a = S_U U_0 R_0 / R_x$ . Для повышения точности в таких схемах имеется возможность увеличивать ток, протекающий через  $R_x$ , путем увеличения  $U_0$  (до сотен вольт) и применять меньшие сопротивления  $R_0$ . Рассмотренная схема используется в тераометрах Е6-14 с диапазоном измерений  $10^7 \dots 10^{12}$  Ом, классами точности 4–10 в зависимости от поддиапазона измерений.

Измерение малых сопротивлений (до  $10^{-4}$  Ом) производится *электронными миллиомметрами*. При измерении таких сопротивлений возникают трудности, связанные с влиянием соизмеримых по значению сопротивлений контактов и соединительных проводов, а также контактных термоЭДС. Миллиомметры (рис. 9.18) работают по принципу, аналогичному работе омметра, изображенного на рис. 9.16. Однако для исключения влияния термоЭДС измерения производятся на переменном токе, вырабатываемом генератором  $G$ . Применение переменного тока позволяет использовать усилитель  $У$  переменного тока с большим коэффициентом усиления, что повышает чувствительность прибора при измерении малых сопротивлений. Выходной сигнал усилителя выпрямляется выпрямителем  $B$  и подается на магнитоэлектрический измерительный механизм  $ИМ$ . Для уменьшения влияния сопротивлений контактов и соединительных проводов резистор  $R_x$  включают по четырехпроводной схеме, при которой ток к резистору подводится по одной паре проводов (зажимы  $I_0$  и  $I$ ), а напряжение, пропорциональное измеряемому сопротивлению, снимается с другой пары проводов (зажимы  $u_0$ ,  $u$ ).

### Прибор для измерения изменения магнитного потока

На рис. 9.19 приведена упрощенная схема фотогальванометрического веберметра, построенная по принципу компенсационного преобразования со статической характеристикой. Фотогальванометрический веберметр представляет собой фотогальванометрический усилитель с отрицательной обратной связью по производной выходного тока, которая осуществляется с помощью  $RC$ -цепи. При изменении потока, сцепляющегося с витками измерительной катушки ИК, на ее зажимах возникает ЭДС:  $e = -w_K \cdot \frac{d\Phi_X}{dt}$

$$e = -w_K \cdot \frac{d\Phi_X}{dt}$$

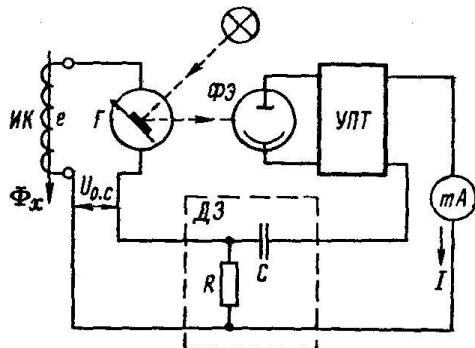


Рисунок 9.19

Под действием ЭДС в цепи магнитоэлектрического гальванометра Г потечет ток, при этом подвижная часть гальванометра повернется, что вызовет изменение светового потока, падающего на фотоэлемент  $\Phi\mathcal{E}$ , а следовательно и фототока. Фототок усиливается усилителем постоянного тока УПТ

Выходной ток  $I$  усилителя преобразуется с помощью дифференцирующего звена ДЗ в напряжение обратной связи  $U_{O.C.} = k \cdot \frac{dI}{dt}$ , которое поступает в цепь измерительной катушки. Поворот подвижной части гальванометра и изменение фототока будут происходить до тех пор, пока напряжение обратной связи  $U_{O.C.}$  не уравновесит ЭДС  $e$ , т.е.  $k \frac{dI}{dt} = w_K \cdot \frac{d\Phi_X}{dt}$ .

В процессе измерения происходит интегрирование ЭДС  $e$  во времени, что приводит к установлению зависимости, при которой изменение силы тока в цепи миллиамперметра  $\Delta I = w_K \cdot \Delta \Phi_X / k$ , где  $w_K$  - число витков измерительной катушки;  $\Delta \Phi_X$  – измерение измеряемого потока;  $k$  – постоянная цепи обратной связи. Таким образом, по силе тока можно судить о потоке  $\Phi_X$ . Шкалу миллиамперметра градуируют в единицах магнитного потока.

Фотогальванометрический веберметр обладает высокой чувствительностью, что позволяет измерять весьма малые магнитные потоки (2-500 мкВб). Благодаря действию отрицательной обратной связи входное сопротивление прибора увеличивается, что дает возможность использовать измерительные катушки с высоким сопротивлением (100 Ом и более).

В настоящее время находят применения также электронные аналоговые и цифровые веберметры. В аналоговом электронном веберметре интегрирующее звено выполняют в виде интегрирующего усилителя. Трудность создания такого

типа веберметров заключается в том, что для нормального функционирования интегрирующего усилителя требуется усиление весьма малых ЭДС порядка 10-100 мкВ. Для этого часто используются специальные магнитомодуляционные усилители. Электронные веберметры также обладают высокой чувствительностью (предел измерений от 25 до 2500 мкВб), но погрешность их меньше, чем у предыдущих приборов (порядка 1 %). Значительное увеличение точности измерения магнитного потока (погрешность измерения  $\pm 0,05 \%$ ) может обеспечить цифровой веберметр, основанный на преобразовании выходного сигнала измерительной катушки с помощью АЦП в частоту импульсов и получением отсчетов на цифровом табло.

В ряде случаев в цифровом веберметре измерение магнитного потока осуществляется путем измерения времени разряда интегрирующего конденсатора, который заряжается током измерительной катушки. В настоящее время для производственного контроля разработан компактный переносной интегрирующий флюксметр Фк-4 с цифровым отсчетом, который с успехом может заменить баллистический гальванометр. Более точными характеристиками обладает цифровой микровеберметр Ф5050 с автоматической установкой нуля и порогом чувствительности порядка  $10^{-8}$  Вб.

## Тема 10. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

### Общие замечания

Электронно-лучевые (электронные) осциллографы предназначены для визуального наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов. Возможность наблюдения изменяющихся во времени сигналов делает осциллографы чрезвычайно удобными при определении различных амплитудных и временных параметров наблюдаемых сигналов. Важными достоинствами осциллографов являются широкий частотный диапазон, высокая чувствительность и большое входное сопротивление. Все это обусловило их широкое практическое применение.

В настоящее время выпускается множество осциллографов, различающихся назначением и характеристиками. Осциллографы могут быть предназначены для наблюдения и измерения непрерывных или импульсных процессов; большое распространение получили универсальные осциллографы для периодических и не-периодических сигналов непрерывного и импульсного характера в широком (до 100 МГц) диапазоне частот. Выпускаются также осциллографы специального назначения: многофункциональные со сменными входными блоками, запоминающие для регистрации одиночных импульсов, стробоскопические для исследования высокочастотных процессов и другие. По количеству одновременно исследуемых сигналов осциллографы могут быть одноканальными и многоканальными (в основном двухканальными). В последнее время получили распространение цифровые электронные осциллографы. Осциллографы могут различаться также чувствительностью, полосой пропускания, погрешностью воспроизведения формы кривой и другими характеристиками.

Рассмотрим устройство и принцип действия наиболее распространенных универсальных электронно-лучевых осциллографов. В основе работы любых электронных осциллографов лежит преобразование исследуемых сигналов в видимое изображение, получаемое на экране электронно-лучевой трубы.

**Электронно-лучевые трубы.** Простейшая однолучевая трубка (ЭЛТ) представляет собой стеклянный баллон, из которого откачен воздух и в котором расположены (рис. 1) подогреваемый катод  $K$ , модулятор (сетка)  $M$ , фокусирующий анод  $A1$ , ускоряющий анод  $A2$ , две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин  $OP_x$  и  $OP_y$  (горизонтальные и вертикальные отклоняющие пластины).

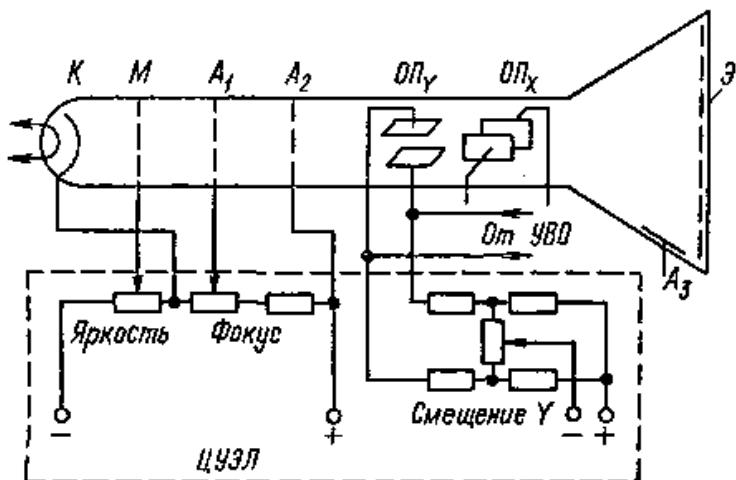


Рисунок 1

Внутренняя поверхность дна баллона (экран  $\mathcal{E}$ ) покрыта люминофором, способным светиться под действием бомбардировки электронами. Совокупность электродов  $K, M, A_1, A_2$  называют электронной пушкой. Конструктивно эти электроды выполнены в виде цилиндров, расположенных по оси трубы. Электронная пушка излучает узкий пучок электронов – электронный луч. Для этого на электроды пушки подают напряжение, как показано на рис. 1, где ЦУЭЛ – цепи управления электронным лучом. Интенсивность электронного луча регулируют путем изменения отрицательного относительно катода напряжения на модуляторе, что приводит к изменению яркости свечения люминофора. Напряжение на первом аноде фокусирует поток электронов в узкий луч, позволяющий получить на экране трубы светящееся пятно малого размера. Для ускорения электронов до скорости, необходимой для свечения люминофора, на второй анод подается высокое положительное напряжение. Сформированный электронный луч проходит между парами отклоняющихся пластин  $OП_x$  и  $OП_y$  и под действием напряжений, приложенных к этим пластинам, отклоняется, соответственно, по осям координат  $X$  и  $Y$ , вызывая смещение светящегося пятна на экране трубы. На рис. 1 также показана упрощенная схема управления начальной установки луча по оси  $Y$  (по оси  $X$  управление аналогично). Меняя положение подвижного контакта переменного резистора («Смещение  $Y$ »), можно изменять напряжение на пластинах  $Y$  и тем самым смещать луч по экрану.

При исследовании быстропротекающих процессов с малой частотой повторения или однократных импульсов электронный луч не успевает возбудить в достаточной мере люминофор и яркость свечения может оказаться недостаточной. Поэтому в современных электронно-лучевых трубках применяют дополнительное ускорение электронов при помощи третьего анода  $A_3$ , подавая на него большое

положительное напряжение.

Осциллографические электронно-лучевые трубы характеризуются чувствительностью, полосой пропускания, длительностью послесвечения, рабочей площадью экрана, цветом свечения люминофора и другими характеристиками.

Чувствительность трубы  $S_T = l_t/U_T$ , где  $l_t$  – отклонение луча на экране трубы, вызванное напряжением  $U_T$ , приложенным к отклоняющим пластинам. Обычно  $S_T = 0,5...5$  мм/В. С увеличением частоты напряжения чувствительность трубы падает. Верхняя частота полосы пропускания трубы равна такой частоте, при которой ее чувствительность уменьшается до значения  $0,707 S_T$  (на 3 дБ), где  $S_T$  – чувствительность на малых частотах. У рассматриваемых электронно-лучевых трубок верхняя частота примерно 100 МГц.

Длительность послесвечения экрана характеризуют временем от момента прекращения действия электронного луча до момента, когда яркость изображения составит 1 % первоначальной. Трубы с длительным послесвещением (более 0,1с) облегчают наблюдение непериодических и медленно изменяющихся сигналов. Специальные запоминающие трубы позволяют сохранить изображение сигнала на интервалы времени от нескольких минут до нескольких суток.

Рабочая площадь экрана определяется диаметром трубы. Выпускают трубы с диаметром 70 мм и более. Тип люминофора определяет цвет свечения экрана. Обычно находят применение трубы с зеленым цветом свечения. Для фотографирования изображения с экрана осциллографа используют трубы с голубым свечением экрана.

В современных осциллографах применяют также и более сложные, в частности, многолучевые трубы для наблюдения сразу двух и более сигналов, трубы с линией бегущей волны для наблюдения за сверхвысокочастотными колебаниями и др.

**Устройство и принцип действия осциллографа.** Упрощенная функциональная схема осциллографа (рис. 2) включает в себя электронно-лучевую трубку ЭЛТ, входной делитель напряжения ВД, усилитель вертикального отклонения УВО, состоящий из предварительного усилителя ПУ, линии задержки ЛЗ и выходного усилителя ВУ, блок синхронизации БС, генератор развертки ГР усилитель горизонтального отклонения УГО и калибраторы амплитуды КА и длительности КД.

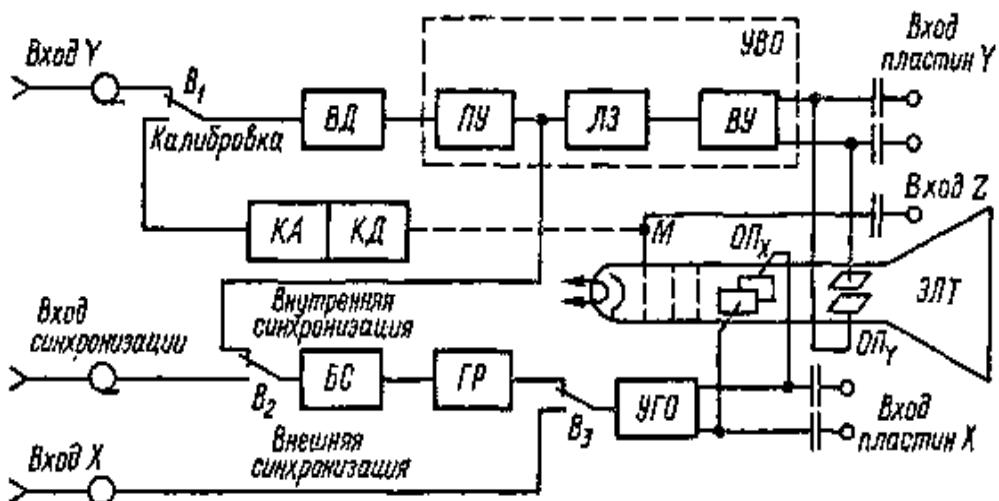


Рисунок 2

Исследуемый сигнал подается на вход  $Y$  канала вертикального отклонения, включающего в себя входной делитель и усилитель вертикального отклонения. Выходное напряжение  $YVO$ , поступая на вертикально отклоняющие пластины, управляет отклонением электронного луча в трубке по оси  $Y$ . Для получения требуемого размера изображения на экране входной сигнал усиливается (или ослабевает) в канале вертикального отклонения до необходимого значения, определяемого чувствительностью трубы. Последовательное включение делителя напряжения и усилителя вертикального отклонения обеспечивает значительный диапазон исследуемых напряжений. Основное усиление  $YVO$  обеспечивается предварительным усилителем  $ПУ$ , а выходной усилитель  $VU$  в основном служит для преобразования усиливаемого сигнала в управляющее напряжение, подаваемое на отклоняющие пластины.

При подаче переменного напряжения на вход  $Y$  электронный луч вычерчивает на экране осциллографа вертикальную линию. Для получения изображения исследуемого сигнала, развернутого во времени, необходимо смещать (развертывать) луч по оси  $X$  с равномерной скоростью – линейная развертка. Это осуществляется подачей на отклоняющие пластины  $OP_X$  линейно изменяющегося напряжения (рис. 3).

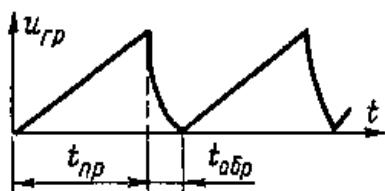


Рисунок 3

На рисунке показана форма линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения, она имеет прямой ход  $t_{np}$  – время развертки и обратный –  $t_{obr}$ . Принцип развертки изображения иллюстрируется рис.10.4, где даны кривые изменения напряжения  $u_x$  и  $u_y$ , подаваемые на пластины  $OP_x$  и  $OP_y$ , и получающееся при этом изображение на экране осциллографа. Цифрами 1–4, 1'–4' обозначены точки кривых в соответствующие моменты времени. Из рисунка видно, что при равенстве периодов напряжений  $u_x$  и  $u_y$  на экране получается неподвижное изображение одного периода исследуемого сигнала. При увеличении периода пилообразного напряжения  $u_x$  в  $n$  раз на экране появится изображение  $n$  периодов исследуемого сигнала.

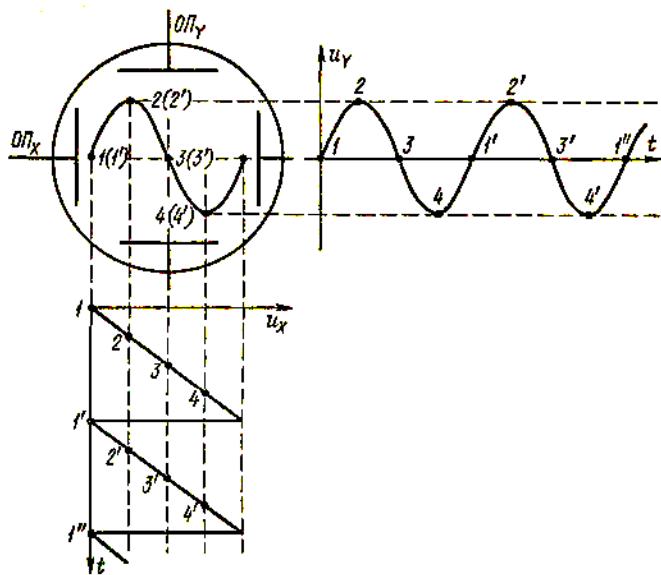


Рисунок 4

Напряжение развертки  $u_{GP}$  вырабатывает генератор развертки  $ГР$ . Реальная кривая напряжения развертки (см. рис. 3) имеет время прямого  $t_{np}$  и время обратного  $t_{obr}$  хода – время возвращения луча в исходное положение. Для того чтобы во время обратного хода электронный луч не вычерчивал линии на экране осциллографа, его гасят на это время путем подачи отрицательного импульса на модулятор. Исследование сигналов в широком диапазоне частот обеспечивается переключением частоты пилообразного напряжения, предусмотренном в генераторе развертки. Это позволяет проводить наблюдения исследуемых сигналов в нужном масштабе времени. Выходное напряжение генератора усиливается в  $УГО$  до значения, необходимого для управления электронным лучом в ЭЛТ и получения изображения требуемого размера.

Для получения устойчивого изображения на экране осциллографа частота пилообразного напряжения развертки должна быть кратна частоте исследуемого

сигнала. Выдержать точно кратность частот напряжений  $u_x$  и  $u_y$  на практике оказывается достаточно сложно вследствие «ухода» частоты генератора  $GP$  и изменения частоты исследуемого сигнала. Это приводит к неустойчивости изображения сигнала. Для обеспечения устойчивости изображения в осциллографе имеется блок синхронизации  $BC$  (см. рис. 2), который осуществляет изменение частоты генератора  $GP$  (в некоторых пределах) в соответствии с частотой исследуемого процесса. Для этого сигнал из канала вертикального отклонения подается на блок синхронизации, на выходе которого вырабатываются импульсы синхронно с изменением исследуемого сигнала для управления генератором развертки, принудительно заставляя его работать с частотой, кратной частоте входного сигнала. Такой режим работы генератора развертки называется непрерывным. Он применяется при наблюдении периодических сигналов.

При исследовании непериодической последовательности импульсов или одиночных импульсов непрерывный режим работы  $GP$  приводит к тому, что положение изображения импульсов на экране по оси времени становится неопределенным. В этом случае применяют ждущий режим работы генератора, при котором  $GP$  вырабатывает пилообразный импульс только с приходом исследуемого импульса. При таком режиме обеспечивается устойчивое положение изображения импульсов на экране. Рисунок 5 иллюстрирует ждущий режим работы  $GP$ , где показаны входные импульсы  $u_y$  (рис. 5, а), пилообразные импульсы  $u_{GP}$  (рис. 5, б) генератора развертки и изображение на экране осциллографа (рис. 5, в).

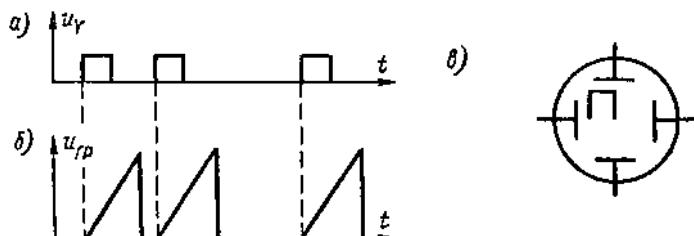


Рисунок 5

В осциллографах предусматривается также возможность запуска генератора  $GP$  от внешнего источника (внешняя синхронизация). Для этого имеется специальный вход «Вход синхронизации» и переключатель  $B_2$ .

Исследование импульсных и особенно непериодических сигналов имеет ряд особенностей. В частности, генератор развертки вследствие своей инерционности вырабатывает пилообразное напряжение с некоторым запаздыванием во времени ( $t_{zp}$ ) по отношению к запускающему импульсу. Это может привести к тому, что начальная часть импульса не будет развернута во времени на экране (рис. 6,

а). Для устранения таких искажений в канале вертикального отклонения имеется линия задержки  $L3$ , осуществляющая временной сдвиг (задержку) на некоторое время  $t_3 > t_{rp}$  сигнала, подаваемого на пластины  $OP_y$  (рис. 6, б, где  $u_{l3}$  – напряжение на выходе  $L3$ ). Такая задержка позволяет получить изображение всего импульса, включая его начальную часть, на экране осциллографа. В низкочастотных осциллографах, предназначенных для исследования периодических процессов, линия задержки может отсутствовать.

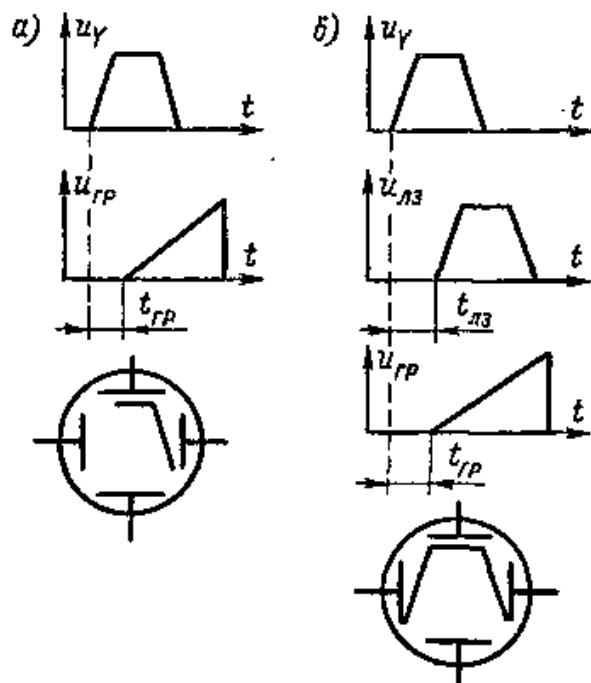


Рисунок 6

Для расширения функциональных возможностей осциллографа имеются дополнительные входы, позволяющие осуществить управление электронным лучом. Во многих осциллографах предусмотрена возможность управления отклонением луча по оси  $X$  внешним напряжением. Для этого у осциллографа есть «Вход  $X$ » (см. рис. 2), на который подается внешнее управляющее напряжение, и переключатель  $B_3$ , устанавливаемый в этом случае в нижнее (по схеме) положение. В осциллографах имеются также зажимы «Вход пластин  $X$ » и «Вход пластин  $Y$ », позволяющие подавать внешнее напряжение непосредственно на пластины электронно-лучевой трубки. В некоторых осциллографах имеется вход  $Z$ , который через разделительный конденсатор (или специальный усилитель) соединен с модулятором  $M$  электронно-лучевой трубки. Подавая импульсы напряжения на этот вход, можно модулировать (изменять) яркость свечения изображения на экране. Это позволяет, например, отмечать характерные точки на изображении, подавая

импульсы на вход  $Z$  в необходимые моменты времени.

При измерении амплитудных и временных параметров исследуемых сигналов обычно измеряют соответствующие геометрические размеры изображения сигнала на экране и с помощью коэффициентов отклонения и коэффициентов развертки (см. далее), характеризующих чувствительность каналов, определяют значения этих параметров. Для повышения точности измерений осциллографы имеют калибраторы амплитуды  $KA$  и длительности  $K\Delta$ , позволяющие контролировать и устанавливать номинальные значения коэффициентов отклонения и коэффициентов развертки. Калибраторы часто представляют собой генераторы прямоугольных импульсов с известными значениями амплитуды и частоты. Для проверки коэффициентов отклонения переключатель  $B_1$  (см. рис. 2) ставится в положение «Калибровка». Меняя усиление  $УВО$ , добиваются нормированного отклонения луча на экране, что приводит к установке соответствующего коэффициента отклонения. По периоду калибровочного импульса можно проверить или установить нормированное значение коэффициента развертки. В некоторых осциллографах  $K\Delta$  представляет собой стабильный по частоте генератор, выход которого при измерении подключается к модулятору ЭЛТ. Сигнал генератора вызывает появление на экране чередующихся светлых и темных участков. По их числу, зная частоту генератора  $K\Delta$ , можно определить временные параметры исследуемых сигналов.

### **Основные метрологические характеристики осциллографов**

*Коэффициент отклонения*  $m_u$  – отношение напряжения входного сигнала к отклонению луча (в делениях шкалы), вызванному этим напряжением. У наиболее распространенных осциллографов коэффициент отклонения находится в диапазоне 50 мкВ/дел – 10 В/дел. Коэффициент отклонения – параметр, обратный чувствительности.

*Полоса пропускания* – диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения изменяется не более чем на 3 дБ (примерно 30 %) относительно его значения на некоторой средней (опорной) частоте. Для низкочастотных осциллографов полоса пропускания находится в диапазоне от 0 до 1–5 МГц; для универсальных осциллографов верхняя частота достигает десятков мегагерц, для высокочастотных – сотен мегагерц.

*Для измерения импульсных сигналов важными являются параметры переходной характеристики – время нарастания переходной характеристики и максимальный выброс.*

Коэффициент развертки  $t_t$  – отношение времени к отклонению луча, вызванному напряжением развертки за это время. Обычно осциллографы имеют широкий диапазон изменения коэффициента развертки. Например, у осциллографа С1-65 коэффициент развертки находится в диапазоне 0,01 мкс/дел – 0,05 с/дел. Коэффициент развертки – параметр, обратный скорости перемещения луча по оси X.

Основная погрешность измерения напряжения и основная погрешность измерения временных интервалов определяются максимально допускаемыми погрешностями измерения соответствующих параметров при подаче на вход осциллографа стандартного сигнала синусоидальной или прямоугольной формы. В зависимости от значений этих погрешностей выпускают осциллографы четырех классов точности – 1, 2, 3, 4, имеющих, соответственно, основные погрешности измерений, не превышающие 3, 5, 10, 12 %.

Часто вместо основных погрешностей измерений нормируют *основные погрешности коэффициента отклонений и коэффициента развертки*, а также *нелинейность отклонения и развертки*.

Параметры входов осциллографа определяются входным активным сопротивлением  $R_{вх}$  и входной емкостью  $C_{вх}$ . Обычно  $R_{вх} > 1$  МОм, а  $C_{вх}$  составляет десятки пикофарад. Для высокочастотных осциллографов  $C_{вх}$  составляет единицы пикофарад. Осциллографы характеризуются и другими параметрами, например: максимально допустимым входным напряжением, размерами рабочей части экрана, потребляемой мощностью, габаритами, массой и др.

### Измерение частоты, фазы, временных интервалов

При научных исследованиях и в производственной практике часто встречается необходимость измерения частоты, временных интервалов, фазового сдвига между напряжением и током нагрузки в цепях промышленной частоты и между периодическими напряжениями одинаковой частоты любой формы. Большое значение, особенно в научных исследованиях, имеет анализ спектра электрических сигналов.

Диапазон частот периодических сигналов, используемых в различных областях науки и техники, очень широк – от долей герца до десятков гигагерц. Весь спектр частот электромагнитных колебаний делят на два диапазона – низких и высоких частот. К низким частотам относят инфразвуковые (ниже 20 Гц), звуковые (20 – 20000 Гц) и ультразвуковые (20 – 200 кГц). Высокочастотный диапазон,

в свою очередь, разделяют на высокие частоты (200 кГц – 30 МГц), ультравысокие (30 – 300 МГц) и сверхвысокие (выше 300 МГц). Измерения частоты в высокочастотном диапазоне (ультра- и сверхвысокие частоты) относят к радиоизмерениям.

Измерение частоты по сравнению с измерениями других физических величин возможно с очень большой точностью, обусловленной высокой помехозащищенностью частотного сигнала и возможностью преобразования частоты с большой точностью в цифровой код. Погрешность измерения частоты зависит от используемых средств и методов измерений и различна для разных диапазонов частот.

Временной интервал отличается многообразием форм представления. Так, временной интервал может быть в виде периода синусоидальных колебаний, периода следования импульсов, интервала между двумя импульсами, в виде длительности импульса и т. п. Диапазон измеряемых временных интервалов очень широк: от долей микросекунды до десятков часов и более.

В некоторых случаях частота и время связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью и могут быть измерены с одинаковой точностью. Предельная точность измерений временных интервалов и частоты определяется точностью государственного первичного эталона, обеспечивающего воспроизведение единиц времени и частоты со средним квадратическим отклонением результата измерения, не превышающим  $1 \cdot 10^{-13}$  при неисключенной систематической погрешности  $1 \cdot 10^{-12}$ . Государственный первичный эталон передает размер единиц времени и частоты через вторичные эталоны, эталоны-копии, рабочие эталоны образцовым средствам измерений времени и частоты, средние квадратические отклонения результата поверки которых составляют от  $1 \cdot 10^{-11}$  до  $1 \cdot 10^{-5}$ . В свою очередь, образцовые средства измерений времени и частоты передают размер единиц рабочим средствам, средние квадратические отклонения результата поверки которых составляют от  $1 \cdot 10^{-11}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$ .

Диапазон измерения угла фазового сдвига составляет  $\varphi = 0 \div 360^\circ$ . Некоторые средства измерений градуируют не в единицах угла сдвига, а в безразмерных единицах коэффициента мощности  $\cos\varphi$  – для синусоидальных напряжений (токов) или  $\cos\Phi = P_A / P_{\Pi}$  – для несинусоидальных напряжений (токов), где  $P_A$  и  $P_{\Pi}$  – активная и полная мощность соответственно;  $\cos\varphi$  (или  $\cos\Phi$ ) измеряют в диапазоне от 0 до  $\pm 1$ .

Точность измерения угла фазового сдвига зависит от частоты напряжений (токов), фазовый сдвиг между которыми измеряется, а также от применяемых средств и методов измерений.

Предельная точность измерений угла фазового сдвига определяется государственным специальным эталоном угла фазового сдвига между двумя электрическими напряжениями в диапазоне частот  $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^5$  Гц, обеспечивающим воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением результата измерения от  $0,3 \cdot 10^{-3}$  до  $10 \cdot 10^{-3}$  градуса в зависимости от измеряемой величины. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей образцовых средств измерений 1-го разряда не должны превышать  $0,1^\circ$ , а 2-го разряда —  $0,3^\circ$ . Для рабочих средств измерений пределы допускаемых абсолютных погрешностей составляют от 0,03 до  $5^\circ$ .

**Измерение частоты.** В зависимости от диапазона измерений и требуемой точности используют различные средства и методы измерений.

Для измерения частоты в узком диапазоне (45—55; 450—550 Гц и т. д.) при наибольшей частоте 2500 Гц применяют электродинамические и электромагнитные частотомеры. Классы точности электродинамических частотомеров 1; 1,5; электромагнитных частотомеров — 1,5; 2,5.

Для измерения низкой частоты в узком диапазоне (48—52; 45—55 Гц и т. д.) могут применяться резонансные частотомеры. Класс точности таких частотомеров 1—2,5.

В диапазоне высоких и сверхвысоких частот частота может измеряться высокочастотными резонансными частотомерами, в которых, в отличие от электромеханических резонансных частотомеров, используется колебательный контур из катушки индуктивности и конденсатора. Погрешность измерения частоты в этом случае составляет  $\pm(0,05—0,1)\%$ .

Для измерения частоты в широком диапазоне (от 10 Гц до нескольких мегагерц) могут применяться электронные аналоговые частотомеры. Класс точности 0,5—2,5.

Для измерения частоты электрических сигналов получил распространение метод сравнения, отличающийся относительной простотой, сравнительно высокой точностью и пригодностью для использования в широком диапазоне частот. Измеряемая частота определяется по равенству или кратности известной частоте. Индикатором равенства или кратности частот может служить электронный ос-

циллограф. Этот способ измерения частоты пригоден для измерения частот в пределах полосы пропускания электронно-лучевой трубы. Измерение частоты можно производить при линейной, синусоидальной и круговой развертках.

При линейной развертке период сигнала измеряемой частоты  $f_x$  сравнивается с периодом развертки, либо с периодом меток времени калибратора длительности  $T_M$ . В первом случае учитывается коэффициент развертки  $m_t$ , а результат измерения частоты  $f_x$  определяется по формуле  $f_x = 1/(m_t l)$ , где  $l$  – период сигнала частоты  $f_x$ , отсчитанный в делениях шкалы на экране осциллографа. При измерении частоты с помощью меток времени калибратора длительности устанавливают на экране несколько периодов измеряемой частоты и регулируют период меток  $T_M$  так, чтобы их изображение попадало в одну и ту же точку каждого периода. В этом случае измеряемая частота  $f_x = 1/(nT_M)$ , где  $n$  – число меток, находящихся в пределах одного периода исследуемого напряжения. Преимуществом этих способов является возможность исследования колебаний любой формы, недостатком – низкая точность: погрешность может достигать  $\pm(5-10)\%$ .

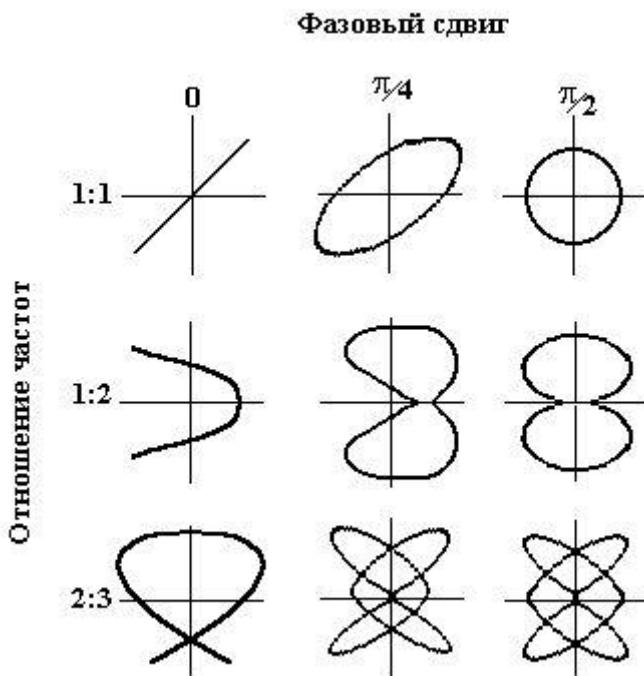


Рисунок 7

Более точные результаты могут быть получены при сравнении двух колебаний синусоидальной формы методом фигур Лиссажу. На одну из пар отклоняющих пластин осциллографа подают синусоидальное напряжение известной частоты, а на другую – исследуемое напряжение. Изменяя известную частоту, до-

биваются получения кривой на экране в виде неподвижной или медленно перемещающейся фигуры Лиссажу. По виду фигуры Лиссажу судят о частоте и фазовом сдвиге исследуемого напряжения.

На рис. 7 показаны фигуры Лиссажу для нескольких соотношений частот и углов фазового сдвига. Кратность частот при любой форме неподвижного изображения фигуры определяют по числу пересечений изображения фигуры горизонтальной  $n_G$  и вертикальной  $n_B$  линиями. Отношение  $n_G / n_B = f_G / f_B$ , где  $f_G$  и  $f_B$  – частоты напряжений, поданных на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины соответственно. Если напряжение измеряемой частоты  $f_x$  подано на вертикально отклоняющие пластины, а напряжение известной, образцовой частоты  $f_O$  – на горизонтально отклоняющие пластины, то  $f_x = f_O n_G / n_B$ .

Этот метод применяют лишь при относительно небольшой кратности частот, обычно не превышающей 10, так как в противном случае фигуры Лиссажу становятся запутанными и с трудом поддаются расшифровке.

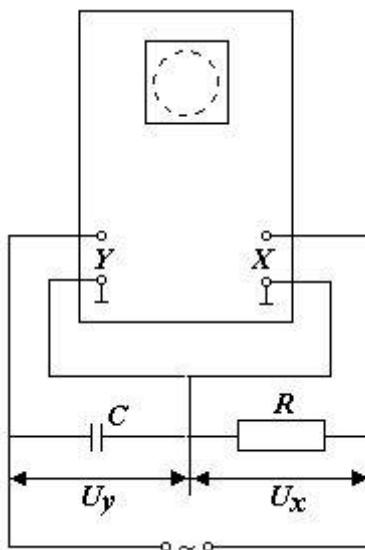


Рисунок 8

При большей кратности сравниваемых частот предпочтительным оказывается метод круговой развертки. В этом случае два равных напряжения  $U_x$ ,  $U_y$  низкой частоты  $f_x$  с фазовым сдвигом  $90^\circ$  подают на оба входа осциллографа (см. рис. 8). Под действием этих напряжений луч на экране описывает окружность с частотой напряжений  $U_x$ ,  $U_y$ . Напряжение измеряемой частоты  $f_x$  подают к электроду, модулирующему яркость электронного луча (канал Z). При кратности частот на экране будет изображение окружности в виде штриховой линии. Число темных или светлых штрихов  $n$  равно кратности частот, откуда  $f_x = nf_O$ .

При круговой развертке сравнивать частоты можно до кратности 50, а при фотографировании осциллограмм – до нескольких сотен.

Погрешность осциллографических методов измерения частоты определяется главным образом погрешностью определения  $f_o$  и может быть доведена до  $10^{-4}$  –  $10^{-6}$ .

В последнее время перечисленные методы и средства измерений частоты все более вытесняются измерением с помощью цифровых частотомеров. Выпускаемые промышленностью цифровые частотомеры могут измерять частоту в диапазоне от 0,01 Гц до 17 ГГц. Погрешность цифровых частотомеров главным образом зависит от нестабильности образцового (кварцевого) генератора и меняется от  $10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$ .

**Измерение временных интервалов.** Для измерения временных интервалов применяют электронно-лучевые осциллографы и цифровые измерители временных интервалов.

При применении электронно-лучевого осциллографа временной интервал измеряют, используя метки времени калибратора с периодом длительности  $T_M$ , либо учитывая коэффициент развертки  $m_t$ . Результат измерения в первом случае определяется по формуле  $t_x = nT_M$ , где  $n$  – число меток, находящихся в пределах измеряемого временного интервала. Во втором случае на экране осциллографа определяют временной интервал в делениях шкалы  $l$  и результат рассчитывают по формуле  $t_x = m_t l$ . Погрешность измерения временных интервалов в этом случае достигает 5 – 10%.

Для измерения временных интервалов однократно протекающих импульсных процессов необходимо применять осциллографы с достаточным послесвечением.

Для измерения временных интервалов очень малой длительности импульсов ( $10^{-9}$  –  $10^{-10}$  с) используют стробоскопические осциллографы, принцип действия которых состоит в измерении мгновенных значений повторяющихся сигналов с помощью коротких так называемых стробирующих импульсов напряжения.

Цифровые приборы для измерения временных интервалов являются наиболее точными при измерении относительно больших интервалов (миллисекунды и более). При измерении малых интервалов времени погрешность дискретности, определяемая конечным значением частоты заполнения, может оказаться значи-

тельной. Для уменьшения этой погрешности применяют способ растяжения измеряемого интервала в определенное число раз, а при измерении периода колебаний – способ усреднения.

В способе растяжения применяют поочередное интегрирование двух стабилизованных напряжений постоянного тока  $U_1$  и  $U_2$  различной полярности. Напряжение  $U_1$  интегрируется в течение измеряемого интервала времени  $t_x$ , а напряжение  $U_2$  – в течение интервала  $t'_x$ , определяемого от момента окончания интервала  $t_x$  до момента времени, когда напряжение на выходе интегратора станет равным нулю. Интервалы времени  $t_x$  и  $t'_x$  связаны соотношением  $t'_x = t_x U_1 / U_2$ .

При способе усреднения измеряется период, больший измеряемого в определенное число раз. Увеличение периода осуществляется с помощью делителя частоты. Результатом измерения в этом случае будет среднее значение периода исследуемого колебания.

При измерении длительности коротких (десятки наносекунд) однократных импульсов применяют нониусный способ измерения.

**Измерение фазового сдвига.** Для измерения фазового сдвига между напряжением и током нагрузки в цепях промышленной частоты применяют электродинамические фазометры классов точности 0,2; 0,5.

В симметричных трехфазных цепях коэффициент мощности может измеряться специальными трехфазными фазометрами, классы точности которых 1,5; 2,5.

В несимметричной трехфазной цепи измеряют фазовые сдвиги между напряжением и током в каждой фазе отдельно. При этом токовые зажимы фазометра включают последовательно в фазу трехфазной цепи, а потенциальные — между фазой и нулевой точкой трехфазной цепи. Если нулевая точка недоступна, то ее создают искусственно.

Большое распространение получили цифровые фазометры, имеющие частотный диапазон входных напряжений до 150 МГц. Приведенная погрешность цифровых фазометров  $\pm (0,1 - 0,5) \%$ .

Для измерения фазового сдвига применяют электронно-лучевые осциллографы. Проще всего измерения фазового сдвига выполняют с помощью двухлучевых или двухканальных осциллографов. В этом случае на экране получают изображение двух напряжений, что дает возможность измерить временной сдвиг  $t_x$  между напряжениями и период  $T_x$  и оценить фазовый сдвиг (в градусах) по

формуле  $\varphi_x = 360t_x/T_x$ . Погрешность измерения  $\varphi_x$  определяется погрешностью измерения  $t_x$  и  $T_x$ , и может достигать  $\pm (5 - 10) \%$ .

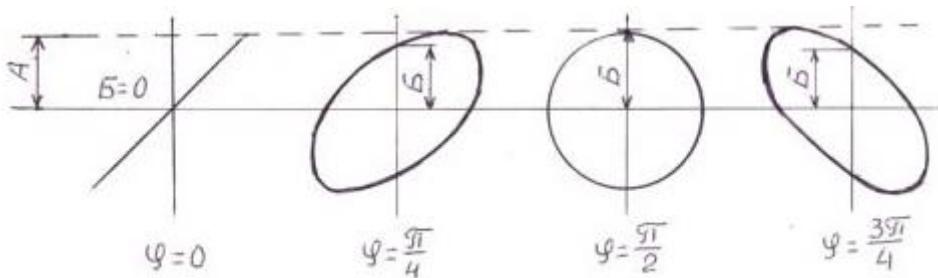


Рисунок 9

Фазовый сдвиг может быть измерен также с использованием фигур Лиссажу. На рис. 9 показаны фигуры Лиссажу, получающиеся при подаче на два входа X и Y осциллографа двух синусоидальных напряжений  $U_x$  и  $U_y$  одинаковой частоты при разных фазовых сдвигах.

Значение фазового сдвига  $\varphi = \arcsin(B/A)$ , где  $A$  и  $B$  – отрезки осей координат, определяемые по изображению. Погрешность определения фазового сдвига составляет  $\pm(5—10) \%$ .

Более высокую точность измерения можно получить, используя электронно-лучевой осциллограф как нуль-индикатор. В этом случае между источником одного напряжения (положим  $U_x$ ) и соответствующим входом осциллографа (X) включается фазовращающее устройство. Фазовый сдвиг регулируется фазовращающим устройством до тех пор, пока фигура Лиссажу на экране осциллографа не превратится в прямую линию. Измеряемый фазовый сдвиг в этом случае отсчитывается по шкале фазовращателя.

Для измерения фазового сдвига, а также коэффициента мощности (или косинуса угла сдвига) можно воспользоваться также косвенным методом трех приборов; амперметра, вольтметра и ваттметра. Недостатком этого метода является суммирование погрешностей отдельных средств измерений и необходимость одновременного отсчета показаний трех приборов и вычисления значения искомой величины.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

### 1.1 Принцип аналого-цифрового преобразования

Цифровые измерительные устройства (ЦИУ) – средства измерений, автоматически вырабатывающие сигналы измерительной информации в цифровой форме (в виде кода). Основой работы ЦИУ является принцип аналого-цифрового преобразования. В процессе преобразования осуществляется операции дискретизации по времени, квантования по уровню и кодирования [1].

Принцип аналого-цифрового преобразования поясняется рис. 1.1.

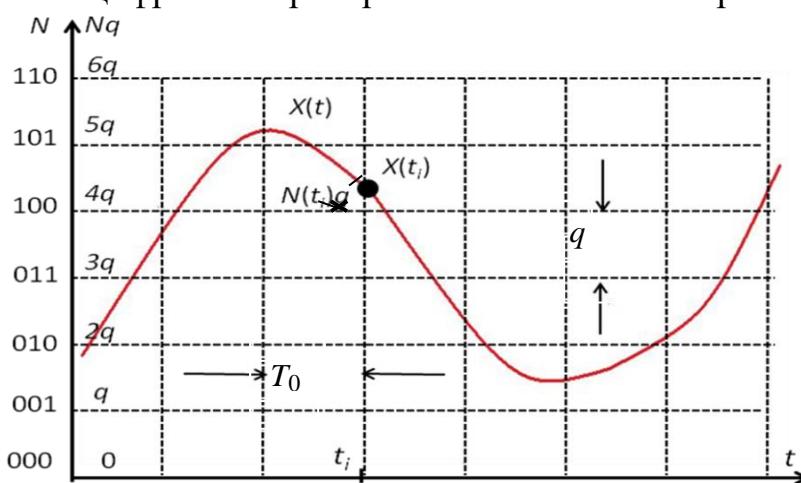


Рис. 1.1

В результате *дискретизации по времени* измеряемая аналоговая величина  $X(t)$  преобразуется в последовательность своих значений (отсчетов) в определенные моменты времени  $t_i - \{X(t_i)\}$ , т.е. величину, значения которой совпадают с соответствующими значениями  $X(t)$  только в определенные моменты времени. Промежуток времени между соседними отсчетами  $T_0$  называется шагом дискретизации, который может быть постоянным, при равномерной временной дискретизации, или переменным.

При *квантовании по уровню* в диапазоне изменения измеряемой величины  $X_{min}...X_{max}$  задается ряд известных значений – уровней квантования  $X_{k1}, X_{k2}, …, X_{kn}$ . Разность между соседними уровнями квантования обычно выбирается постоянной и называется шагом квантования по уровню  $q$ . Значения уровней квантования образуют квантованную шкалу и их значения можно представить в виде  $Nq$ , где  $N$  – целое число (номер уровня квантования),  $q = \text{const}$ .

Операция квантования по уровню сводится к отождествлению значений отсчетов  $X(t_i)$ , со значениями ближайших уровней квантования  $X_{ki}$ .

При кодировании в момент времени  $t_i$  фиксируется номер уровня квантования  $N(t_i)$  в виде целого числа, а затем представляется в виде кода. За результат измерения в момент времени  $t_i$  принимается значение

$$X_p(t_i) = N(t_i)q.$$

На рис. 1.1. в качестве примера в момент времени  $t_i$  зафиксировано значение уровня квантования 4 $q$  двоичный код результат 100.

## 1.2 Выбор шага дискретизации

При аналого-цифровом преобразовании необходимо задать два параметра: шаг квантования  $q$  и шаг дискретизации по времени  $T_0$ . По дискретным отсчетам исходный сигнал  $X(t)$  может быть восстановлен во времени путем аппроксимации, результатом которой является сигнал  $X_B(t)$ . На практике применяют два способа восстановления:

а) ступенчатая экстраполяция (рис. 1.2 а)

б) линейная интерполяция (рис. 1.2 б)

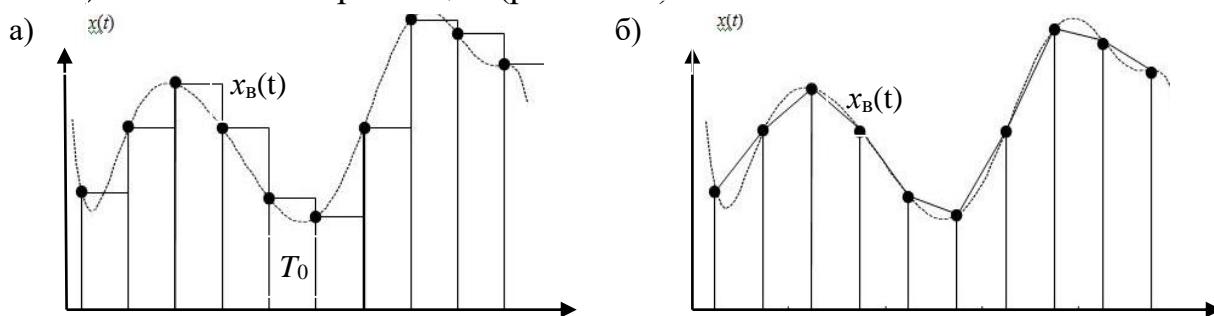


Рис. 1.2

Шаг дискретизации  $T_0$  выбирается исходя из заданной допустимой погрешности восстановления мгновенных значений сигнала по его дискретным отсчетам. Качество восстановления сигнала оценивается погрешностью восстановления. Максимальная абсолютная погрешность восстановления при ступенчатой экстраполяции и шаг дискретизации равны

$$\Delta = M_1 T_0; T_0 = \Delta / M_1,$$

где  $M_1$  – модуль-максимум первой производной сигнала.

Определим шаг дискретизации для синусоиды частоты  $f_x$  и допустимой погрешности восстановления  $\Delta$

$$X(t) = A \sin 2\pi f_x t.$$

Для ступенчатой экстраполяции шаг дискретизации равен

$$T_0 = \Delta/M_1 = \Delta/2\pi f_x A = \gamma/(2\pi f_x 100) = \gamma T_x/(2\pi 100),$$

где  $M_1 = 2\pi f_x A$  – модуль-максимум первой производной;  $T_x = 1/f_x$  – период сигнала,  $\gamma = (\Delta/A) 100$  – приведенная погрешность восстановления в %.

Частота дискретизации  $f_0 = 1/T_0$  характеризует требования к быстродействию ЦИУ и для высокочастотных сигналов может быть достаточно велика. Для оценки эффективности ступенчатой экстраполяции определим число отсчетов  $N_0$  на период синусоиды  $T_x$  при заданной приведенной погрешности восстановления  $\gamma$  (%)

$$N_0 = T_x/T_0 = (2\pi 100)/\gamma.$$

Величина  $N_0$  показывает во сколько раз частота дискретизации больше частоты сигнала. Абсолютная погрешность восстановления при линейной интерполяции и шаг дискретизации равны [1]

$$\Delta = \frac{M_2 T_0^2}{8} ; \quad T_0 = \sqrt{\frac{8\Delta}{M_2}},$$

где  $M_2$  – модуль-максимум второй производной сигнала.

Для линейной интерполяции число выборок  $N_1$  на период синусоиды  $T_x$

$$N_1 = T_x/T_0 = 20\pi/\sqrt{8}\gamma.$$

Для сравнения двух способов восстановления в табл.1.1 приведены значения числа отсчетов для сигнала при различных значениях приведенной погрешности восстановления.

Таблица 1.1

Приведенная погрешность восстановления, %	Число отсчетов сигнала на период синусоиды $N = T_x/T_0$	
	Ступенчатая экстраполяция	Линейная интерполяция
5	123	10
2	314	15
1,5	420	18
1	628	22
0,5	1256	32

Приведенные в табл.1.1 данные показывают, что линейная интерполяция более эффективна, т.к. обеспечивает значительно меньшую частоту при дискретизации по сравнению со ступенчатой экстраполяцией и тем большему меньше приведенная погрешность восстановления.

### 1.3 Методы аналого-цифрового преобразования

При аналого-цифровом преобразовании квантование по уровню происходит путем сравнения аналоговой (преобразуемой) величины с квантованной. Можно выделить три основных метода [1].

*Метод последовательного счета.* В этом методе (рис. 1.3) происходит последовательное во времени сравнение преобразуемой величины  $X$  с известной квантованной величиной  $X_k(t)$ , меняющейся равномерно ступенчато во времени с шагом  $T_T$ .

Величина  $X_k$  увеличивается с шагом равным кванту по уровню  $q$  и равна значению кванта по уровню умноженного на текущее значение кода  $N$ . В процессе преобразования ведется подсчет числа ступеней  $X_k$ , с начала преобразования до момента времени  $t_i$ , при котором  $X_k(t_i) > X$ .

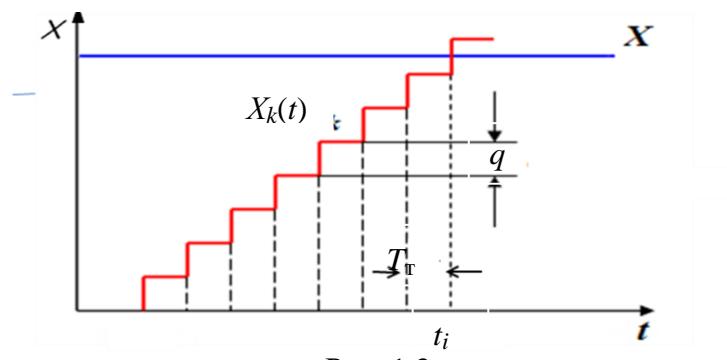


Рис. 1.3

В процессе преобразования образуется единичный последовательный непозиционный код. Для этого метода время преобразования определяется соотношением  $t_{\text{пр}} = NT_T$ , где  $N$  – значение кода.

*Метод последовательного приближения* (поразрядного уравновешивания). При этом методе (рис. 1.4) происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины  $X$  с известной квантованной величиной  $X_k(t_i)$ , меняющейся во времени скачками по определенному правилу в соответствии с принятой системой счисления. На первом такте определяется старший разряд кода, затем следующий за старшим и т. д. Время преобразования определяется числом разрядов выходного кода  $n$  и длительностью такта  $T_T$ :  $t_{\text{пр}} = nT_T$ .

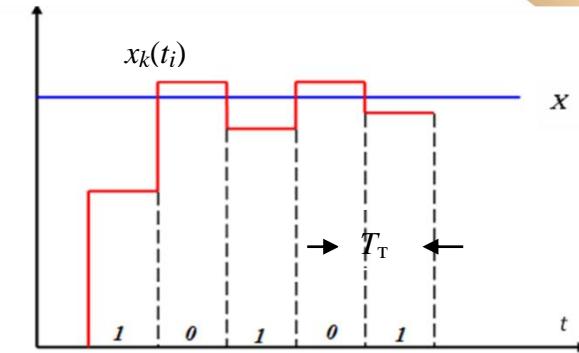


Рис. 1.4

*Метод считывания.* При этом методе (рис. 1.5) в момент времени  $t_i$  происходит одновременное сравнение измеряемой величины  $X$  с известными величинами  $X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{ki}$ , значения которых задают уровни квантования.

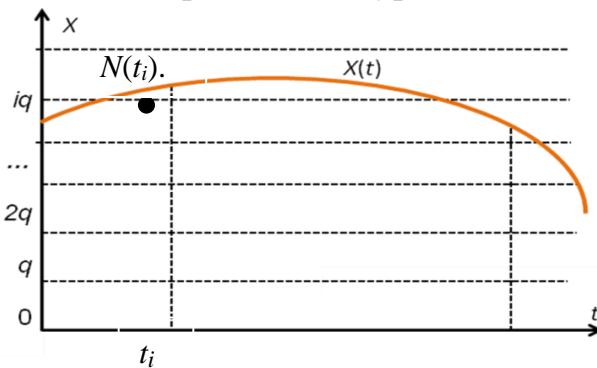


Рис. 1.5

Значение  $X(t)$  в момент времени  $t_i$  отождествляется со значением ближайшего уровня квантования, номер этого уровня  $kq$  определяет код результата преобразования  $N(t_i)$ .

#### 1.4 Сравнение методов преобразования по быстродействию

Оценим время преобразования  $t_{\text{пр}}$  для рассмотренных выше методов. Будем исходить из одинаковой точности преобразования, что обеспечивается при одинаковом числе  $N_{\text{max}}$ . Для метода последовательного счета

$$t_{\text{пр}} = N_{\text{max}} T_{\text{T}},$$

где  $T_{\text{T}}$  – длительность такта,  $N_{\text{max}} = 2^n - 1$  – максимальное значение кода результата.

Для метода последовательного приближения

$$t_{\text{пр}} = nT_{\text{T}} = (\log_2 N_{\text{max}}) T_{\text{T}},$$

где  $T_{\text{T}}$  – длительность такта,  $n$  – число двоичных разрядов кода.

Результаты оценки времени преобразования приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Максимальное значение кода	100	$10^3$	$10^4$
Метод последовательного счета	$100T_T$	$10^3 T_T$	$10^4 T_T$
Метод последовательного приближения	$7T_T$	$10T_T$	$14T_T$

Сравнительная оценка времени преобразования, показывает, что метод последовательного приближения обеспечивает большое быстродействие на 2-3 порядка по сравнению с методом последовательного счета.

### 1.5 Классификация цифровых измерительных устройств

Существует большое число признаков, которые могут использоваться для классификации ЦИУ. Ниже приводится классификация по наиболее общим признакам.

По назначению ЦИУ делятся на аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифровые измерительные приборы (ЦИП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) (рис. 1.6).

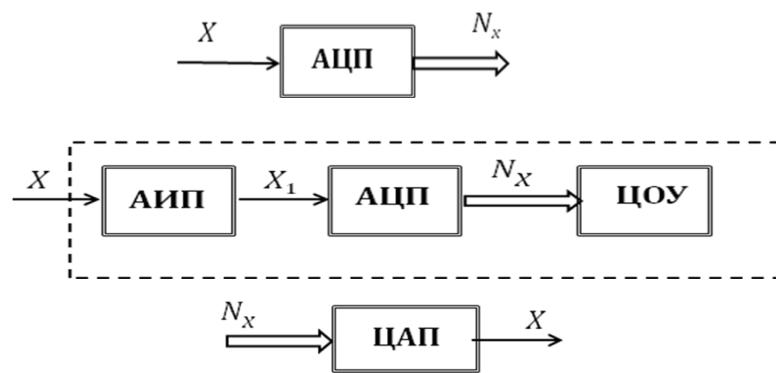


Рис. 1.6

АЦП предназначены для автоматического преобразования входной аналоговой величины  $X$  в код  $N_x$  и применяются в системах сбора и обработки данных. Выходной код АЦП, как правило, двоичный.

ЦИП в отличие от АЦП предназначены для применения оператором и отображают результат измерения в виде десятичного числа на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ).

ЦАП осуществляют обратное преобразование кода в аналоговую величину и применяются в качестве узлов АЦП и ЦИП или отдельных устройств.

В зависимости от метода используемого преобразования в код различают:  
 ЦИУ последовательного счета; *ЦИУ последовательного приближения*; *ЦИУ считывания*.

По измеряемой величине ЦИП делятся на *вольтметры, частотомеры, фазометры, вольтамметры, омметры* и т.д.

В зависимости от наличия усреднения делят на ЦИУ *измеряющие мгновенные значения* и *интегрирующие* ЦИУ, измеряющие среднее значение за определенный интервал времени.

По режиму работы ЦИУ разделяют на *циклические* и *следящие*. В циклических ЦИУ процесс преобразования осуществляется по заданной программе независимо от характера изменения измеряемой величины.

В следящих ЦИУ процесс преобразования начинается при отклонении измеряемой величины от ранее измеренного значения на определенную величину.

На рис. 1.7 приведена классификация ЦИУ по приведенным выше признакам.

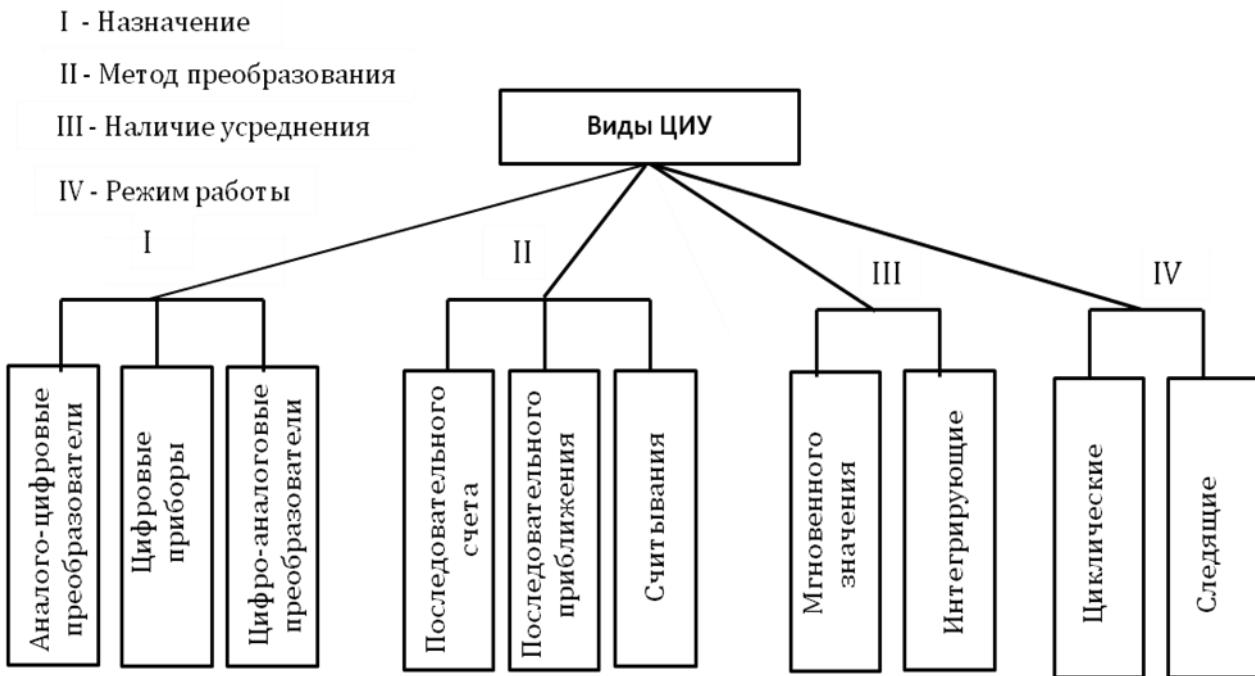


Рис.1.7

## 1.6 Коды, применяемые в цифровых измерительных устройствах

Результат измерения ЦИУ представлен в виде кода. Код представляет комбинацию определенных символов для передачи некоторого сообщения. Результатом измерения являются численные значения, поэтому в ЦИУ применяются числовые коды, построение которых осуществляется в соответствии с опреде-

ленной системой счисления. Рассмотрим классификацию кодов, применяемых в ЦИУ по наиболее употребляемым признакам [1].

По типу применяемой системы счисления коды делятся на позиционные (взвешенные) и непозиционные (не взвешенные). В позиционной системе счисления значение символа (цифры) зависит от занимаемого места, в непозиционной – не зависит. При построении кода каждому символу числа соответствует определенный элемент кода. В ЦИУ применяются коды, построенные на обоих типах систем счисления.

Достоинством позиционных кодов является возможность выполнения арифметических операций, а достоинством непозиционных кодов – большая помехоустойчивость.

Любое число в позиционной системе счисления представляется в виде

$$N = \sum k_i a^{i-1},$$

где  $a$  – основание системы счисления,  $n$  - число разрядов,  $k_i$  – коэффициент, принимающий  $a$  различных значений. При записи чисел указываются только значения коэффициентов.

В десятичной системе используются десять значений коэффициентов от 0 до 9. Например, число 583 в десятичной системе представлено в виде

$$5 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0,$$

а при записи числа записываются только коэффициенты.

В технических устройствах физически код представлен в виде сигналов, представляющих определенные числовые значения. Сигналы должны иметь отличительные признаки, в качестве которых обычно используются уровни напряжения или наличие или отсутствие импульса.

Непосредственное использование в технических устройствах десятичной системы для построения кодов неудобно, в силу большого числа используемых признаков (всего 10). Более удобны для реализации двоичные коды, для которого  $a = 2$ , а  $k_i$  – принимает два значения 0 или 1. Для этих кодов достаточно использовать сигналы с двумя признаками, например, напряжение высокого (соответствует символу "1") или низкого уровня (символ "0").

В ЦИП результат измерения (выходная величина) отображается на отсчетном устройстве в виде десятичного числа. Для удобства индикации в ЦИП используются двоично-десятичные коды, которые строятся на основе комбинации десятичной и двоичной систем счисления, при которой каждый десятичный разряд отображается четырьмя двоичными разрядами, например, число 489 представлено в виде 0100 1000 1001.

В ЦИУ находят применение также единичные коды, как результат промежуточных преобразований. Эти коды строятся на основе наиболее простой системе счисления – единичной, имеющей один символ (цифра 1), при помощи которой можно выразить любое число, например, следующим образом:

число в десятичной системе счисления 1 2 3 4 .....

число в единичной системе счисления 1 11 111 1111 .....

Находят применение комбинация десятичной и единичной систем счисления, на основе которой строятся единично-десятичный код. В этом коде каждый разряд десятичного числа представлен единичным кодом.

В зависимости от способа передачи элементов кода во времени различают последовательные и параллельные коды. На рис. 1.8 приведена классификация кодов по выше приведенным признакам.

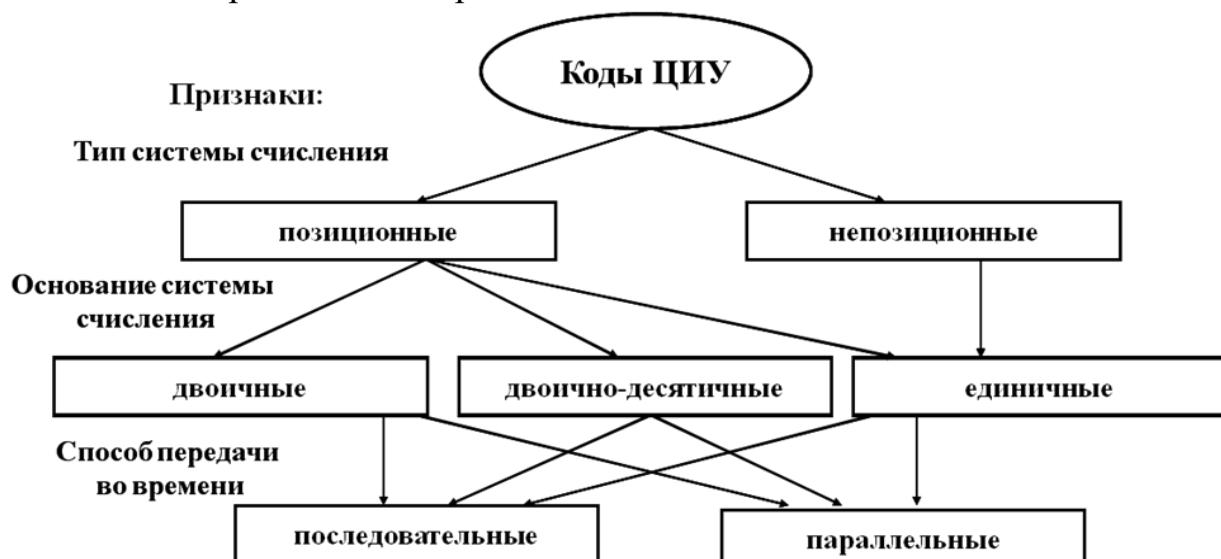


Рис. 1.8

Для последовательных кодов все элементы передаются последовательно во времени, для параллельных – одновременно. Достоинством последовательных кодов является простота передачи кода, т.к. достаточно двух линий, а для параллельного потребуется большее число линий, равное максимальному значению кода плюс 1.

Рассмотрим в качестве примеров физическое представление различных видов единичных кодов, представленных на рис. 1.9...1.11. Для непозиционного единичного последовательного кода значение кода определяется общим числом импульсов (рис. 1.9). Для позиционного единичного последовательного кода значение кода определяется номером временной позиции, на которой появляется импульс (рис. 1.10).

Для непозиционного единичного параллельного кода значение кода определяется общим числом импульсов одновременно присутствующих на некотором числе линий (рис. 1.11 а). Для позиционного единичного параллельного кода значение кода определяется номером линии, на которой присутствует импульс (рис. 1.11 б).

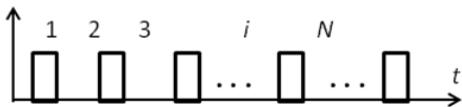


Рис. 1.9. Непозиционный единичный последовательный код

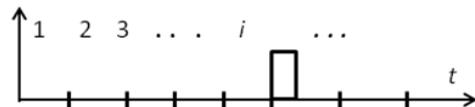


Рис. 1.10. Позиционный единичный последовательный код

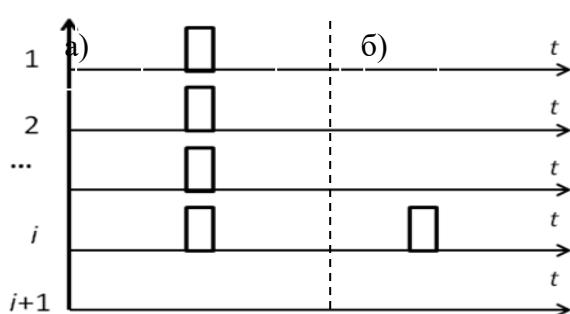


Рис. 1.11. Непозиционный (а) и позиционный (б) единичный параллельный код

Определим время, необходимое для передачи кода. Для последовательного кода это время равно  $T = N_x T_c$ , а для параллельного кода  $T = T_c$ , где  $N_x$  – значение кода, а  $T_c$  – время на передачу одного символа кода. Приведенные выражения показывают, что для последовательного кода это время значительно больше.

## 2 МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

### 2.1 Статические характеристики

В цифровых измерительных приборах результаты измерений представлены в цифровом виде. При этом в отличие от аналоговых приборов их показания меняются дискретно на единицу младшего разряда. Это приводит к ряду особенностей определения и представления метрологических характеристик цифровых приборов.

К основным метрологическим характеристикам (МХ) цифровых приборов относятся: *статическая характеристика преобразования, шаг квантования или единица младшего разряда, инструментальная погрешность* [1]. Для экспери-

ментального определения этих характеристик измеряются известные значения, воспроизводимые мерой.

*Статическая характеристика преобразования.* Эта характеристика ЦИУ устанавливает связь между преобразуемой (входной) величиной  $X$  и результатом преобразования, за который принимается значение  $Nq$ , где  $N$  - значение выходного кода,  $q$  - квант по уровню.

Характеристика преобразования идеального ЦИУ имеет вид, показанный на рис.2.1.

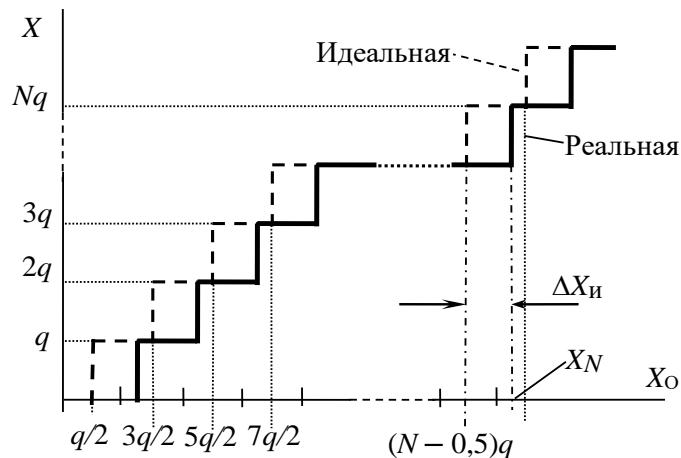


Рис.2.1

Она получена при квантовании путем отождествления с ближайшим уровнем квантования. Изменения значений кода идеального ЦИУ со значений  $N-1$  на  $N$  происходят при фиксированных значениях входной величины равных  $(N-0,5)q$ , где  $N$  – целое число.

Статическая характеристика преобразования устанавливает связь между измеряемой величиной  $X_0$  и показаниями прибора, равными дискретным значениям  $X_{\Pi} = Nq$ , где  $N$  – десятичное целое число,  $q$  – шаг квантования. Значение  $q$  связано с пределом измерений  $X_m$  и числом разрядов выходного кода ЦИП  $n$  соотношением

$$q = X_m / 10^n.$$

*Статическая характеристика преобразования* идеального цифрового прибора (рис.2.1) получается при квантовании измеряемой величины путем отождествления её с ближайшим или равным уровнем квантования, которое будет рассмотрено ниже.

Изменения показаний идеальных цифровых приборов  $X_{\Pi} = Nq$  на единицу младшего разряда  $q$  происходят при фиксированных значениях измеряемой величины, равных  $(N - 0,5)q$ , где  $N = 1, 2, 3, \dots$  (целое число).

Идеальный цифровой прибор имеет только погрешность квантования, предельная абсолютная погрешность которой равна  $\Delta X_{\text{кв}} = \pm 0,5q$ .

Статическая характеристика преобразования реальных цифровых приборов отличается от статической характеристики идеального. Причина этого – инструментальные погрешности. Различие проявляется в том, что смена показаний реальных приборов происходит при значениях входной величины  $X_N$ , отличных от значений  $(N - 0,5)q$ . В общем случае *абсолютная основная погрешность* прибора равна

$$\Delta X = X_{\Pi} - X_0,$$

где  $X_{\Pi}$  – показание прибора;  $X_0$  – действительное значение измеряемой величины. Эта погрешность включает методическую погрешность квантования и инструментальную погрешность.

*Абсолютная инструментальная погрешность*  $\Delta X_{\text{и}}$  определяется для показаний прибора  $X_{\Pi} = Nq$  (рис. 2.1) по отличию реальной характеристики прибора от идеальной

$$\Delta X_{\text{и}} = (N - 0,5)q - X_N,$$

где  $X_N$  – значение входной величины, при котором происходит смена показаний прибора (показания меняются на единицу младшего разряда).

Идеальное ЦИУ имеет только погрешность квантования, являющуюся методической погрешностью. Характеристика реального ЦИУ отличается от идеальной, что приводит к появлению инструментальных погрешностей.

*Диапазон измерений*  $X_{\min} \dots X_{\max}$ , *вид кода* и *число разрядов кода*, *значение единицы младшего разряда кода*, *разрешающая способность* – это характеристики, которые относятся к метрологическим и используются для получения результата измерения.

*Значение единицы младшего разряда кода АЦП* – значение кванта по уровню  $q$ , которое быть найдено при заданном диапазоне измерения и числе разрядов выходного кода  $n$  по формуле  $(X_{\max} - X_{\min}) / 2^n$ .

*Разрешающая способность* – характеристика равная минимальному изменению входной величины, которое можно обнаружить по изменению выходной величины ЦИУ.

*Статические погрешности ЦИУ* – это погрешность ЦИУ в статическом режиме. Абсолютное значение статической погрешности ЦИУ может быть определено по формуле  $\Delta X = Nq - X$ , где  $N$  – выходной код ЦИУ,  $q$  – квант по уровню,  $X$  – входная величина.

## 2.2 Погрешность квантования

Квантование по уровню в ЦИУ приводит к появлению погрешности, которая является методической погрешностью и определяет потенциальную точность ЦИУ. Основным параметром является шаг квантования по уровню  $q$ . Результатом квантования сигнала  $X(t)$  является сигнал  $X_k(t)$ , как это показано на рис. 2.2 а.

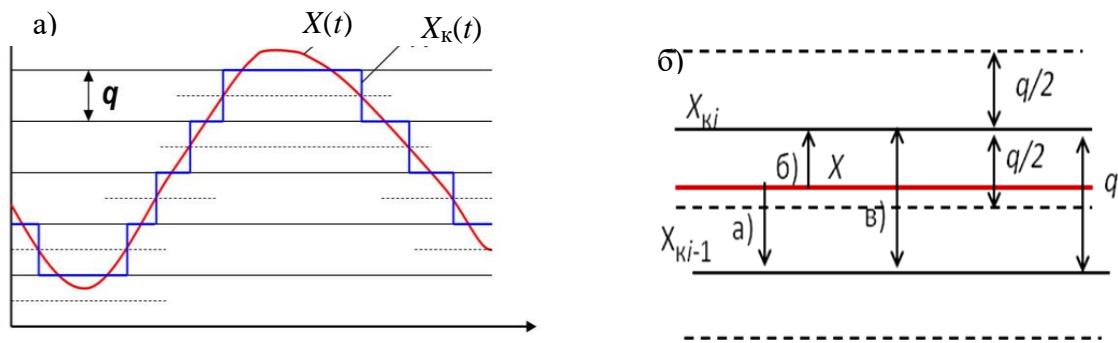


Рис. 2.2.

Различают три способа отождествления при квантовании по уровню, которые приведены на рис. 2.2 б.

- а) отождествление с ближайшим меньшим или равным уровнем квантования;
- б) отождествление с ближайшим большим или равным уровнем;
- в) отождествление с ближайшим или равным уровнем.

Погрешность квантования при произвольном входном сигнале рассматривается как случайная величина и для этого случая закон распределения погрешности квантования является равномерным. Графики плотности вероятности абсолютной погрешности квантования для рассматриваемых трех способов квантования являются равномерными и приведены на рис. 2.3.

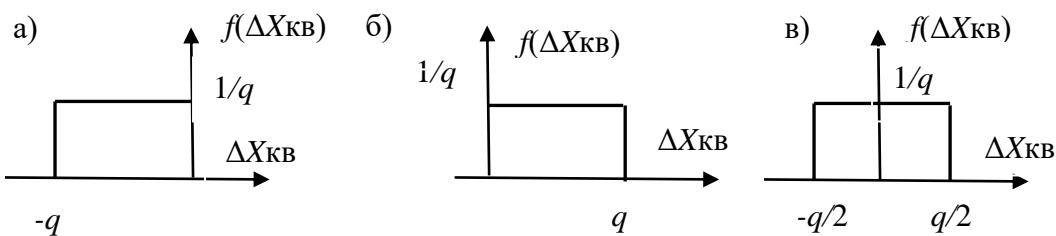


Рис. 2.3

В качестве характеристик погрешности квантования используются предельные значения и вероятностные числовые характеристики: дисперсия  $\sigma^2$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  и математическое ожидание  $M$ .

Приведем значения вероятностных характеристик погрешности для различных способов отождествления.

а) Отождествление с ближайшим меньшим или равным уровнем квантования. Для этого способа погрешность квантования имеет следующие характеристики:

- абсолютная погрешность  $\Delta X_{\text{кв}} \in [-q; 0]$ ;
- математическое ожидание  $M = -q/2$ ;
- дисперсия  $\sigma^2 = q^2/12$ .

б) Отождествление с ближайшим большим или равным уровнем квантования:

$$\Delta X_{\text{кв}} \in [0; q]; M = q/2; \sigma^2 = q^2/12.$$

в) Отождествление с ближайшим или равным уровнем квантования:

$$\Delta X_{\text{кв}} \in [-q/2; q/2]; M = 0; \sigma^2 = q^2/12.$$

Наряду с вероятностными характеристиками погрешности квантования используются также ее предельные значения, приведенные в табл.2.1 для выходного двоичного кода, т.е. для АЦП. Предельные значения погрешности определяются числом разрядов выходного кода  $n$  и значением кода результата преобразования  $N_x$ . Для цифровых приборов вместо показателя степени 2 должны использоваться степени с основанием 10.

Таблица 2.1

Способ отождествления	Границы абсолютной погрешности	Предельная абсолютная погрешность	Предельная относительная погрешность %	Предельная приведенная погрешность %
а) с ближайшим меньшим или равным уровнем	$[-q; 0]$	$\Delta X_{\text{кв}} = -q$	$\delta_{\text{кв}} = -\frac{100\%}{N_x}$	$\gamma_{\text{кв}} = -\frac{100\%}{2^n}$
б) с ближайшим большим или равным уровнем	$[0; q]$	$\Delta X_{\text{кв}} = q$	$\delta_{\text{кв}} = \frac{100\%}{N_x}$	$\gamma_{\text{кв}} = \frac{100\%}{2^n}$
в) с ближайшим или равным уровнем	$[-q/2; q/2]$	$\Delta X_{\text{кв}} = \pm q/2$	$\delta_{\text{кв}} = \pm \frac{100\%}{2N_x}$	$\gamma_{\text{кв}} = \pm \frac{100\%}{2^{n+1}}$

Как видно из таблицы, наименьшее значение погрешности квантования обеспечивает квантование путем отождествления с ближайшим или равным уровнем квантования. При определении инструментальной погрешности реального ЦИУ, как это будет рассмотрено ниже, необходимо задавать идеальную функцию преобразования.

### 2.3 Экспериментальное определение основной погрешности

На практике важным вопросом является определение основной погрешности ЦИУ путем эксперимента, который основан на измерении известной величины  $X_0$  испытуемым ЦИУ. В качестве примера на рис. 2.4 для воспроизведения  $X_0$  используется источник образцовых сигналов (ИОС).

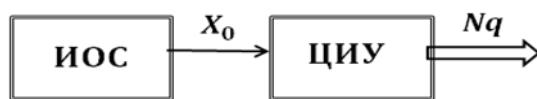


Рис. 2.4

Для определения основной погрешности определяется отличие реальной функции преобразования от идеальной. Экспериментальное определение функции преобразования заключается в определении значений входной величины  $X_N$ , для которой выходной код меняется со значения  $N - 1$  на  $N$ . Если мы проведем эксперимент по определению значений входной величины, для которой меняется выходной код на 1, то получим график, представленный на рис. 2.5. На этом же рисунке приведена идеальная функция преобразования, которая известна и ее не надо определять экспериментально.

Приведем формальное представление идеальной и реальной функций преобразования ЦИУ. Идеальная функция преобразования соответствует способу отождествления с ближайшим или равным уровнем квантования, как это было рассмотрено в п. 2.2.

Идеальная функция преобразования может быть представлена в виде

$$Nq = F_{\text{и}}(X_0)$$

где  $(N - 0,5)q < X_0 < (N + 0,5)q$ , где  $N = 1, 2, 3, \dots$ .

Смена кода с  $N - 1$  на  $N$  для идеальной функции преобразования происходит при  $X_0 = (N - 0,5)q$ , где  $N = 1, 2, 3, \dots$ .

Реальная функция преобразования может быть представлена в виде

$$Nq = F_{\text{р}}(X_0)$$

где  $X_N < X_0 < X_{N+1}$

Смена кода с  $N - 1$  на  $N$  для реального случая происходит при значениях входной величины при  $X_0 = X_N$ . Определим абсолютную погрешность  $\Delta X$  в виде функции от входной величины  $X$  для двух случаев (см. рис. 2.5):

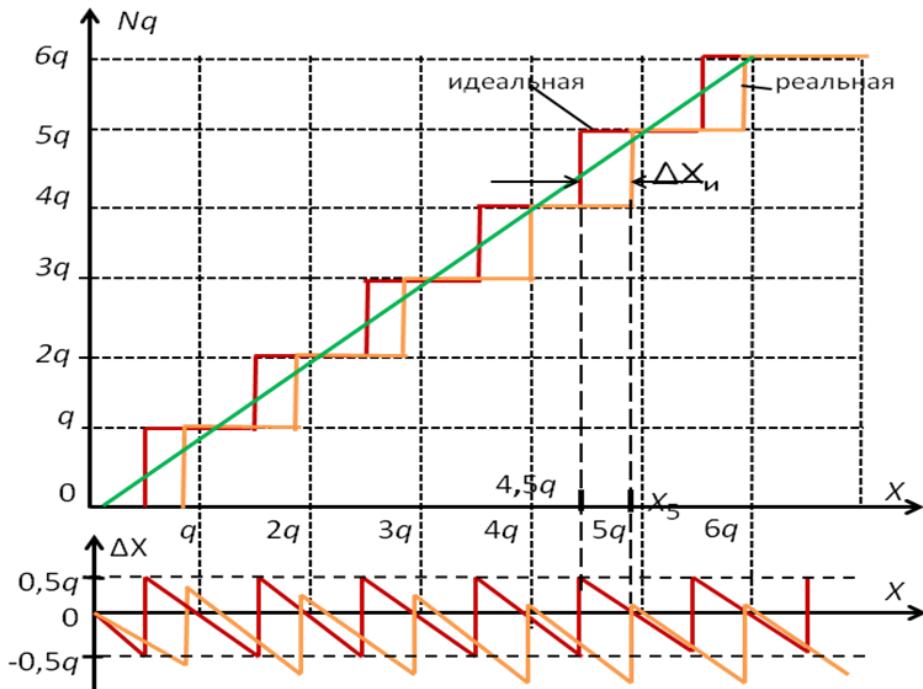


Рис. 2.5

- а) идеального ЦИУ  $\Delta X_{\text{кв}}(X) = F_{\text{и}}(X) - X$ , для которого предельная абсолютная погрешность равна  $\Delta X_{\text{кв}} = \pm 0,5q$ , где  $N$  – значение кода,  $q$  – шаг квантования;
- б) реального ЦИУ

$$\Delta X_p(X) = F_p(X) - X.$$

Предельная абсолютная погрешность зависит от выходного кода  $N$ , поэтому ее можно представить в виде функции от выходного кода

$$\Delta X(N) = Nq - X_N.$$

Инструментальная погрешность  $\Delta X_i$  может быть определена по отлинию реальной и идеальной функций преобразования в виде функции  $\Delta X_i(N)$

$$\Delta X_i(N) = \Delta X(N) - \Delta X_{\text{кв}} = q(N - 0,5) - X_N.$$

Приведенная методика используется при метрологических испытаниях ЦИУ, а также при их поверке и калибровке.

## 2.4 Нормирование основной погрешности ЦИУ

Для ЦИУ, как правило, абсолютная основная погрешность имеет аддитивно-мультипликативный характер изменения по диапазону измерения и

для них пределы допускаемой основной абсолютной погрешности задаются в виде суммы аддитивной  $\Delta x_a$  и мультипликативной  $\Delta x_m$  составляющих

$$\Delta x = \pm (\Delta x_a + \Delta x_m) = \pm (a + bx),$$

где  $a, b$  – положительные числа,  $x$  – значение измеряемой величины.

При нормировании основной погрешности в этом случае задаются пределы допускаемой относительной погрешности  $\delta$  (%) в виде стандартной формулы [1], в которую входят численные коэффициенты  $c$  и  $d$  из обозначения класса точности в виде  $c/d$ , а также верхний предел измерения  $x_k$

$$\delta = \pm \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \%$$

где  $x_k$  – больший (по модулю) из пределов измерений СИ;  $c = (b + d)$  %,

$$d = \frac{a}{|x_k|} \cdot 100\%; x – \text{показания ЦИУ.}$$

В условном обозначении *класса точности* в виде  $c/d$  значение  $d$  задает пределы допускаемой основной приведенной аддитивной погрешности, а  $c$  задает пределы допускаемой основной приведенной погрешности.

## 2.5 Помехозащищенность ЦИУ

Под помехозащищенностью понимается способность ЦИУ проводить измерения с заданной погрешностью при наличии помех. Помехи можно разделить на два вида: нормального и общего. Помехи нормального вида можно представить в виде эквивалентного генератора, включенного последовательно с источником измеряемого напряжения.

Для количественной оценки помехозащищенности ЦИУ используется *коэффициент подавления помехи D*, определяемый по формуле

$$D = 20 \lg (U_p / U_e) \text{ дБ},$$

где  $U_p$  и  $U_e$  – значение помехи (для помехи переменного тока амплитуда помехи) и эквивалентной помехи нормального вида соответственно.

Для уменьшения влияния помех нормального вида в виде переменного напряжения применяют фильтры, а также ЦИУ, принцип действия которых основан на интегрировании входного сигнала. На рис. 2.6 приведена обобщенная структурная схема интегрирующего вольтметра (ИЦВ).

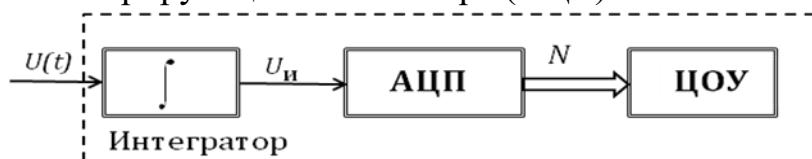


Рис.2.6

Действие аддитивной помехи нормального вида можно представить в виде суммы сигнала и помехи, как это показано на рис. 2.7. Показания ИЦВ для случая синусоидальной помехи амплитуды  $U_{\text{п}}$  частоты  $f_{\text{п}}$  можно представить в виде двух слагаемых

$$Nq = \kappa \int_{t_1}^{t_{\text{и}}} (U_x + U_{\text{п}} \sin(2\pi f_{\text{п}} t)) dt = \kappa \int_{t_1}^{t_{\text{и}}} U_x dt + \kappa \int_{t_1}^{t_{\text{и}}} U_{\text{п}} \sin(2\pi f_{\text{п}} t) dt$$

Первое слагаемое можно выразить через среднее значение входного напряжения, которое и есть результат измерения для ИЦВ

$$Nq = \kappa \int_0^{t_{\text{и}}} U_x dt = t_{\text{и}} \frac{1}{t_{\text{и}}} \kappa \int_0^{t_{\text{и}}} U_x dt = \kappa t_{\text{и}} U_{\text{ср}}$$

а второе слагаемое есть погрешность, вносимая помехой при интегрировании

$$\Delta Nq = \kappa \int_0^{t_{\text{и}}} U_{\text{п}} \sin(2\pi f_{\text{п}} t) dt$$

При определенном выборе времени интегрирования действие синусоидальной помехи на результат измерения ИЦВ можно исключить, что поясняется рис. 2.7. Если время интегрирования равно  $t_{\text{и}} = mT_{\text{п}}$ , где  $f_{\text{п}}$  – частота помехи;  $T_{\text{п}} = 1/f_{\text{п}}$  – период помехи, а  $m$  – целое число, то действие синусоидальной помехи на результат измерения исключается.

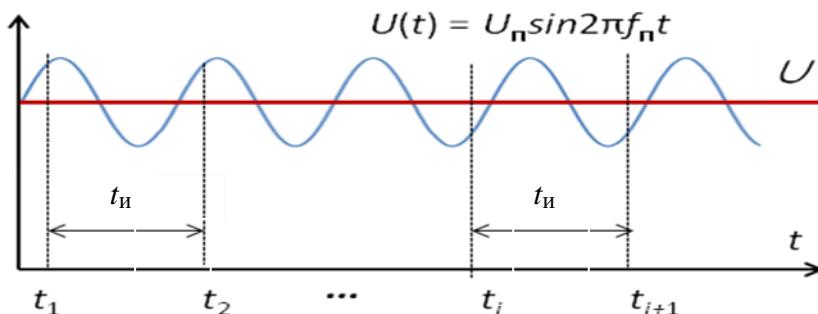


Рис. 2.7

На практике обычно предполагают, что помеха имеет частоту 50 Гц, тогда минимальное время интегрирования равно 20 мс.

Для ИЦВ в качестве показателя помехозащищенности применяется следующий показатель

$$D = 20 \lg \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{экв}}}, \text{ дБ}$$

где  $U_{\text{экв}}$  – эквивалентная помеха нормального вида приведенная ко входу ИЦВ

$$U_{\text{экв}} = \Delta Nq / \kappa t_{\text{и}}.$$

Поскольку время преобразования ИЦВ обязательно включает время, необходимое для интегрирования, их быстродействие невелико.

### 3. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Ниже будут рассмотрены некоторые виды цифровых измерительных приборов (ЦИП), их принцип действия, структурные схемы и основные характеристики [1,2].

#### 3.1. Цифровой хронометр

Цифровой хронометр [1] предназначен для измерения интервала времени. Данное преобразование широко применяется для построения ЦИУ различных величин ввиду простоты и высокой точности. При этом измеряемая величина предварительно преобразуется в интервал времени, а затем интервал времени в код. Указанное преобразование достаточно просто осуществляются для ряда величин, примерами которых являются период, фазовый сдвиг, постоянное напряжение.

Принцип действия поясняется временной диаграммой, приведенной на рис. 3.1 а. Длительность измеряемого интервала времени ограничивается “Старт” и “Стоп” импульсами, результат преобразования представлен числом импульсов известного периода  $T_0$ , подсчитанных за измеряемый интервал  $t_x$ . В данном ЦИУ реализован метод последовательного счета, уровни квантования задаются импульсами стабильной частоты, квант по уровню равен периоду квантующих импульсов  $T_0$ .

Структурная схема приведена на рис.3.1 б и состоит из триггера Тг, генератора импульсов стабильной частоты (ГИСЧ), схемы совпадения (логическое И), счетчика импульсов (СИ). Выходной код  $N$  с выхода СИ используется для индикации в ЦИП или для дальнейшего преобразования, передачи, хранения с случае АЦП. Для удобства индикации результата измерения в ЦИП используются двоично-десятичные счетчики.

Перед началом измерения СИ приводится в нулевое состояние сигналом установки нуля. При поступлении импульса “Старт” триггер устанавливается в состояние “единица”, при котором высокий уровень напряжения с выхода  $Q$  триггера открывает схему И для импульсов с выхода ГИСЧ. Эти импульсы подсчитываются счетчиком СИ до момента появления импульса “Стоп”, который приводит триггер в состояние “нуль” (низкий уровень напряжения на выходе триггера), закрывающее схему И для импульсов с выхода ГИСЧ.

Число импульсов, зафиксированное СИ за время  $t_x$  равно

$$N = t_x/T_0 = t_x f_0,$$

где  $f_0$  – частота ГИСЧ.

Составляющие погрешности хронометра: погрешность квантования; инструментальная погрешность, обусловленная изменением частоты (нестабиль-

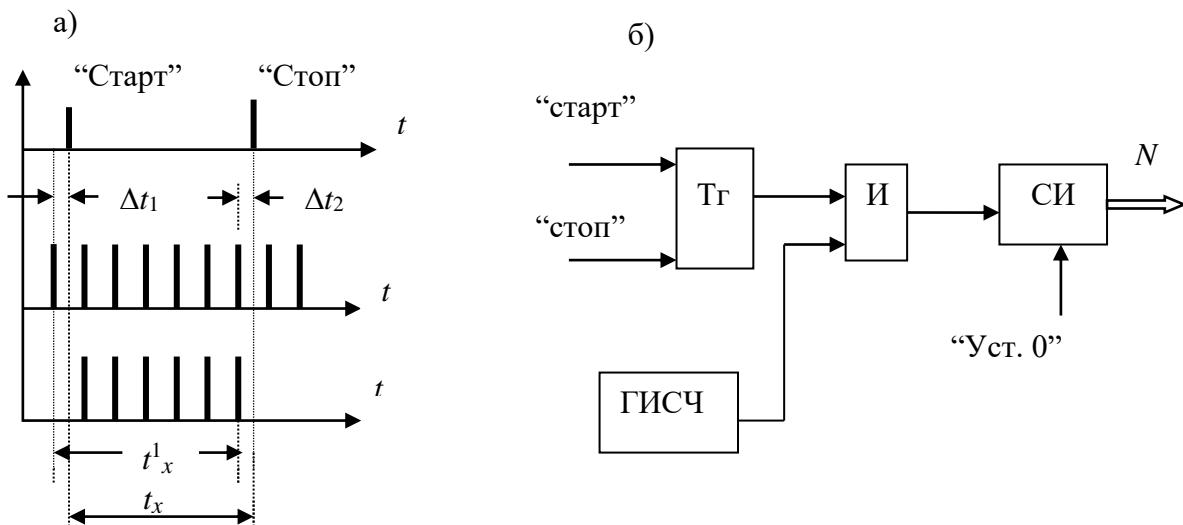


Рис. 3.1

ностью) ГИСЧ, относительное значение которой равно  $\delta_f = (\Delta f/f_0)100\%$ .

Погрешность квантования обусловлена временными сдвигами “Старт” и “Стоп” импульсов относительно квантующих импульсов и имеет две составляющие:  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ . Первую составляющую называют погрешностью от случайного расположения начала квантованной шкалы и она является случайной величиной с равномерной плотностью вероятности в интервале  $[0; T_0]$ . Вторая составляющая обусловлена квантованием путем отождествления с ближайшим меньшим или равным уровнем и является случайной величиной с равномерной плотностью вероятности на интервале  $[-T_0; 0]$ .

Абсолютная погрешность квантования временного интервала может быть найдена из рис. 4.1 а. Результат преобразования  $t_x^l = NT_0$ , а погрешность квантования  $\Delta t = t_x^l - t_x = \Delta t_1 - \Delta t_2$ .

Предельное значение результирующей абсолютной погрешности квантования равно  $\Delta t_m = \pm T_0$ , а относительной погрешности

$$\delta = \pm (T_0/t_x)100\% = \pm (1/f_0 t_x)100\% = \pm (1/N)100\%.$$

Среднеквадратическое отклонение результирующей погрешности квантования  $\sigma = T_0/\sqrt{6}$ , а систематическая составляющая равна 0.

В качестве ГИСЧ применяются прецизионные генераторы на кварцевых резонаторах, для которых  $\delta_r = (10^{-4} \dots 10^{-6})\%$ . В связи с этим цифровые хронометры являются одним из наиболее точных видов ЦИУ.

Пределы измерения хронометра можно определить исходя из максимальной величины выходного кода и величины предельной погрешности. Верхний предел измерения  $t_{xmax}$  определяется максимальным значением выходного кода  $N_{xmax} = t_{xmax}f_0$ , которое ограничивается емкостью СИ, зависящей от числа разрядов  $n$  и равной  $10^n$  для ЦП или  $2^n$  для АЦП. Отсюда имеем  $t_{xmax} = 10^n/f_0$  или  $t_{xmax} = 2^n/f_0$ . Для расширения диапазона измерения в область больших интервалов времени необходимо уменьшать частоту ГИСЧ  $f_0$ , что может быть осуществлено с помощью делителей частоты.

При уменьшении величины интервала времени погрешность квантования растет, поэтому нижний предел измерения можно определить при заданной допустимой погрешности квантования  $\delta_{\text{доп}} = \pm 100/(f_0 t_{xmin})\%$ , откуда получим  $t_{xmin} = 100/(f_0 \delta_{\text{доп}})\%$ . Для расширения диапазона измерения в область малых значений требуется увеличивать частоту  $f_0$  ГИСЧ, которая ограничивается быстродействием применяемой элементной базы.

### 3.2 Частотомер среднего значения

Принцип построения частотомера [1] схож с принципом построения хронометра. Отличие в том, что фиксирован интервал времени, за который подсчитываются импульсы измеряемой частоты. Если измеряется частота импульсной последовательности, то результат преобразования  $N$  определяется путем подсчета числа импульсов за фиксированное время  $t_i$ . Число импульсов при этом равно  $N = f t_i$ , а квант по уровню  $q = f/N = 1/t_i$ . При изменяющейся частоте импульсов, результат преобразования равен  $N = f_{\text{ср}} t_i$ , где  $f_{\text{ср}}$  - среднее значение частоты за время  $t_i$ .

Структурная схема частотомера приведена на рис. 3.2 и включает в себя следующие узлы: Ф – формирователь импульсов; ГИЗД – генератор импульса заданной длительности  $t_i$ ; И – схема, реализующая логическую функцию “И”; СИ – счетчик импульсов, с выхода которой снимается код результата  $N$ . Формирователь Ф предназначен для преобразования входного сигнала в импульсную последовательность той же частоты.

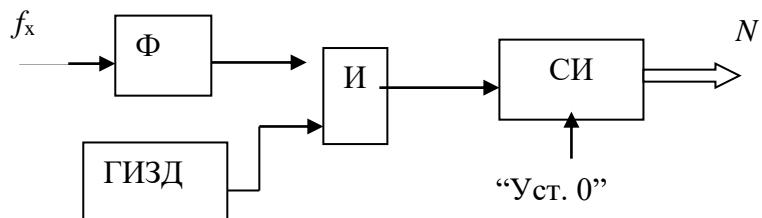


Рис. 3.2

Погрешность частотомера складывается из погрешности квантования и инструментальной погрешности. Абсолютная предельная погрешность квантования равна  $\pm 1/t_i$ , а относительная  $\delta_{\text{кв}} = \pm 100/(t_i f_x) \%$ .

Инструментальная погрешность обусловлена нестабильностью ГИЗД. При использовании для построения ГИЗД генератора на основе кварцевого резонатора, погрешностью от неточного формирования интервала времени  $t_i$  можно пренебречь и тогда погрешность измерения частоты сводится к погрешности квантования. Погрешность квантования может быть уменьшена соответствующим выбором  $t_i$ .

Верхний предел измерения  $f_{x\max}$  определяется максимальным значением выходного кода  $N_{x\max} = f_{x\max} t_i$ , которое ограничивается емкостью СИ, зависящей от числа разрядов  $n$  и равной  $10^n$  для ЦИП или  $2^n$  для АЦП. Отсюда имеем  $f_{x\max} = 10^n/t_i$  или  $f_{x\max} = 2^n/t_i$ .

Нижний предел измерения определяется допустимым значением погрешности квантования  $\delta_{\text{доп}}$  и равен  $f_{x\min} = 100/(t_i \delta_{\text{доп}})$ . Для расширения диапазона измерения в область меньших значений интервал времени  $t_i$  следует увеличивать, что снижает быстродействие частотомера. Данный частотомер целесообразно применять при измерении высоких частот.

### 3.3 Цифровые вольтметры

Обобщённая структурная схема цифрового вольтметра (ЦВ) [1] представлена на рис. 3.3. Основные узлы ЦВ следующие: МП – масштабный преобразователь; АП – аналоговый преобразователь переменного тока в постоянный (может отсутствовать); ФНЧ – аналоговый фильтр низких частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВУ – вычислительное устройство; ДШ – дешифратор (преобразователь кода); ОУ – отсчётное цифровое устройство; НОЗ – набор

образцовых значений; УУ – устройство управления; ПВВ – порт ввода—вывода (служит для связи с ЭВМ).

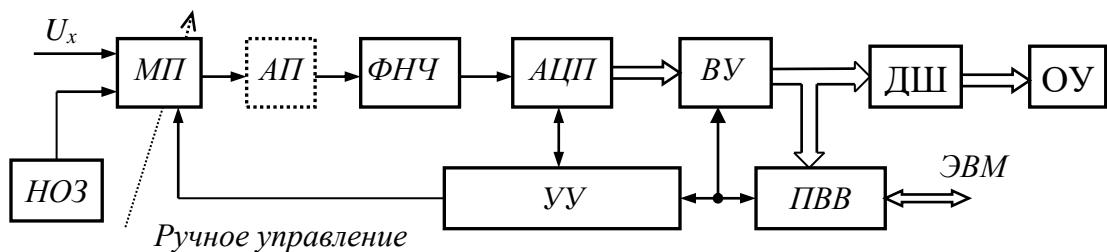


Рис. 3.3

Масштабный преобразователь МП позволяет выбрать оптимальный поддиапазон измерения. Выбор осуществляется оператором или автоматически по анализу последовательности результатов преобразования АЦП. Анализ осуществляется звеньями ВУ и УУ. Последнее звено формирует сигналы, устанавливающие необходимый коэффициент передачи ( $k$ ) МП. Изменённое в  $k$  раз входное воздействие преобразуется звеном АП в одну из характеристик: действующее значение, средневыпрямленное или амплитудное.

Аналоговые преобразователи способны осуществлять операцию в диапазоне частот от долей Гц до единиц ГГц с приведённой погрешностью от 0,01% до 2,5%. Наименьшее значение погрешности достигается в диапазоне частот ( $10\dots 10^5$ ) Гц. В этом случае фильтр ФНЧ устраняет пульсации выходного сигнала преобразователя АП.

В настоящее время существует тенденция определять искомую характеристику по последовательности результатов преобразований АЦП путём вычислений, а не с помощью аналоговых преобразователей. Это расширяет возможности прибора: изменение программы работы вычислительного устройства ВУ на основе микроконтроллера позволяет измерять различные характеристики входной величины.

Одной из функций звена ВУ является *цифровая коррекция* результатов преобразования. Необходимость коррекции вызвана нестабильностью коэффициентов передачи и смещением нуля (и его температурным дрейфом) аналоговых звеньев. Для определения корректирующих значений периодически отводится интервал времени, в течение которого вместо входной величины подключаются образцовые значения из набора НОЗ.

Масштабный преобразователь МП состоит из входного делителя ВД и дифференциального усилителя ДУ (на рисунке не показаны). Входное сопротивление ЦВ постоянного тока для поддиапазонов выше 20 В определяется ВД

и составляет 10 МОм. Для поддиапазонов до 20 В входное сопротивление обеспечивается усилителем ДУ и может достигать 100 ГОм и более.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов/  
Б. Я. Авдеев, В. В. Алексеев, Е. М. Антонюк и др.; под ред. В. В. Алексеева. 3-е  
изд., стер. М.: Академия, 2010.
2. Кончаловский В. Ю. Цифровые измерительные устройства: учеб. по-  
собие для вузов. – М., Энергоатомиздат, 1985.

## Тема 12. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### Требования, предъявляемые к измерительным преобразователям

Для того чтобы преобразователь некоторой неэлектрической величины в электрическую стал средством измерений, т.е. стал **измерительным** преобразователем, он должен удовлетворять некоторым обязательным требованиям и иметь определенные характеристики.

Требования, предъявляемые к ИП, могут различаться в зависимости от того, где применяются те или иные преобразователи.

Перечислим основные требования, предъявляемые к ИП:

1. Однозначность функции преобразования  $y = f(x)$ , где  $y$  – выходная электрическая величина;  $x$  – измеряемая (преобразуемая) неэлектрическая величина.

2. Воспроизводимость функции преобразования, т. е. получение заданной характеристики  $y = f(x)$  у разных преобразователей одного и того же типа.

3. Взаимозаменяемость ИП. Данное требование важно при использовании ИП в измерительных информационных системах (ИИС), где одновременно могут применяться сотни и даже тысячи ИП и где часто просто недопустима перенастройка системы при замене, например, вышедшего из строя ИП.

4. Высокая надежность, высокий технический ресурс. Это требование характерно для ИП, применяемых для контроля параметров промышленных объектов. В некоторых случаях ИП устанавливаются на объекте во время его строительства, встраиваются в объект, и заменить такой преобразователь иногда просто невозможно.

5. Точность измерительного преобразователя. Как и любое средство измерений, ИП должен обладать определенной точностью, т. е. погрешности преобразования не должны превышать заранее установленных пределов.

6. Быстродействие измерительного преобразователя. Естественное стремление уменьшить время преобразования (иногда говорят «время реакции») наталкивается на некоторые трудности. Например, практически все преобразователи тепловых величин (терморезисторы, термопары) являются инерционными. В то же время тензорезисторы, например, относятся к разряду малоинерционных преобразователей.

7. Малое влияние внешних факторов. Естественно, что внешние факторы, влияющие на работу ИП, меняются в зависимости от условий работы объекта. Например, для космического объекта существенным влияющим фактором может

оказаться космическая радиация, а для тепловой электростанции более важным влияющим фактором оказывается, например, изменение окружающей температуры.

#### 8. Малые габариты, масса измерительного преобразователя.

Порядок перечисления требований не является обязательным во всех возможных случаях. Например, для малых летающих объектов чуть ли не главным требованием может оказаться требование малых габаритов и массы, а требование высокого технического ресурса окажется менее существенным из-за малого срока службы объекта контроля (например, ракета ближнего действия).

### Динамические характеристики измерительных преобразователей

В общем случае преобразуемая неэлектрическая величина является функцией времени  $x(t)$ . ИП не должен искажать эту зависимость, и между входным и выходным параметрами должно сохраняться уравнение преобразования  $y = f(x)$  в виде  $y(t) = f[x(t)]$ .

Для ИП с линейной характеристикой (см. зависимости 1 и 2 на рис. 1.2) это уравнение принимает вид

$$y(t) = Sx(t),$$

где  $S$  – чувствительность ИП.

Последнее уравнение характерно для некоторого идеального безынерционного ИП, каких практически не бывает. Реальный ИП всегда имеет определенную инерционность, зависящую от конструкции и типа ИП: наличия движущихся частей, емкостных и индуктивных элементов, нелинейных элементов, помех.

Для оценки качества работы ИП в динамическом режиме рассмотрим его динамические характеристики, которые делят на полные и частные.

С помощью полных динамических характеристик можно восстановить входной преобразуемый сигнал по полученному выходному параметру ИП.

С помощью частных динамических характеристик восстановить входной сигнал по полученному выходному параметру невозможно.

К полным динамическим характеристикам относится прежде всего дифференциальное уравнение, связывающее величины  $x(t)$  и  $y(t)$ :

$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_0 y = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + b_0 x$ , где индексы при  $y$  и  $x$  обозначают порядок дифференцирования по времени. Порядок дифференциального уравнения может быть различным и зависит от структуры ИП. Вид решения дифференциального уравнения определяется характером изменения входного

сигнала. Например, при синусоидальном входном сигнале  $x(t) = x_m \sin \omega t$  выходная величина  $y(t)$  также имеет синусоидальный характер изменения с комплексной амплитудой  $y_m$ , сдвинутой на угол  $\varphi$  по отношению к  $x_m$ .

Существует понятие динамической чувствительности, являющейся отношением комплексного значения выходного сигнала к комплексному значению входного:  $\dot{S}_d = \dot{y}/\dot{x}$ . В случае синусоидального входного сигнала  $\dot{S}_d$  представляет собой комплексную величину, зависящую от частоты изменения  $\omega$  входного сигнала. Динамическая чувствительность в комплексном виде представляется выражением

$$S(j\omega) = \frac{y_m}{x_m} e^{j\varphi}.$$

При этом выходная величина описывается вектором  $y(t) = S(j\omega)x_m e^{j\omega t}$  с действительной частью  $|y(t)| = |S(j\omega)| \sin(\omega t - \varphi)$ . Модуль комплексной чувствительности и угол сдвига между входной и выходной величинами являются функциями частоты. Зависимости  $S(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  называют соответственно амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками ИП. Для ИП с линейной градиуро-вочной характеристикой амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики полностью характеризуют динамические свойства ИП при синусоидальном входном воздействии. Идеальной амплитудно-частотной характеристикой считается та, которая не зависит от частоты, т. е.  $S(\omega) = S$ , где  $S$  – статическая чувствительность ИП.

Динамические свойства ИП часто оценивают по рабочей полосе частот. При этом предельные частоты определяются по допустимому спаду амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), задаваемый на уровне 0,707 или 0,9 от номинального значения. Для ИП, работающих как в статическом, так и в динамическом режимах, АЧХ имеет вид амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот, имеющей одну граничную частоту сверху, а для ИП, работающих только в динамическом режиме, АЧХ имеет вид амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра, имеющего две граничные частоты: снизу и сверху.

Комплексная динамическая чувствительность представляет собой частное решение дифференциального уравнения и определяет установившийся процесс при подаче на вход ИП синусоидального воздействия.

Решение дифференциального уравнения, как известно, можно искать также в операторной форме, позволяющей определить динамическую чувствительность

при любом входном воздействии. Динамическая чувствительность или передаточная функция ИП в операторной форме находится по формуле

$$S(p) = \frac{y(p)}{x(p)}.$$

Частным случаем передаточной функции является переходная характеристика, представляющая собой временную зависимость выходного сигнала при скачкообразном изменении входного сигнала.

Характеристики динамических звеньев, представляющих наиболее распространенные ИП, представлены в таблице.

Таким образом, очевидно, что любой реальный ИП не может мгновенно реагировать на изменение входной величины и возникает динамическая погрешность, определении подчеркивается, что погрешность в динамическом режиме всегда содержит также и статическую погрешность  $\Delta_{ст}$ .

Появление динамической погрешности легко продемонстрировать на графике, иллюстрирующем переходный процесс при скачкообразном изменении входной величины  $x(t)$  в предположении, что статическая погрешность отсутствует (рис. 1). В начальный момент  $t_1$  выходной параметр  $y(t)$  значительно отличается от установившегося значения  $y_{уст}$ , которое он должен иметь в соответствии со значением  $x(t)$ . Погрешность в динамическом режиме по выходной величине  $\Delta y_d = y(t) - y_{уст}$  постепенно уменьшается и при  $t \rightarrow \infty$   $y(t) \rightarrow y_{уст}$ , а  $\Delta y_d \rightarrow 0$ . Таким образом, если величина  $x(t)$  после скачка остается неизменной, достаточно выждать некоторое время  $\tau$  и получить неискаженное значение  $y_{уст}$ .

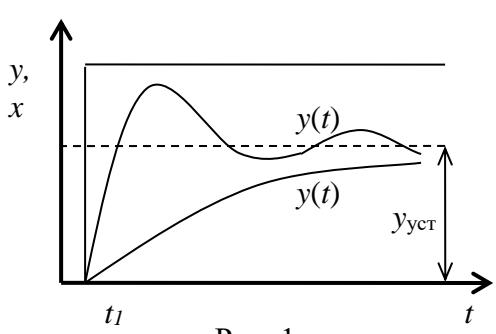


Рис. 1

Это время называется временем установления выходного сигнала ИП и является частной динамической характеристикой, которая часто нормируется и указывается в паспорте ИП. Очевидно, что время установления выходного сигнала ИП зависит от величины недохода  $y(t)$  до  $y_{уст}$

Это время называют постоянной времени и определяют на уровне 63 % от установившегося значения  $y_{уст}$ .

Если входная величина  $x(t)$  непрерывно изменяется во времени, то устанавлившееся значение  $y(t)$  также зависит от времени и динамическая погрешность

всегда присутствует. В этом случае  $\Delta y_{\text{д}}(t) = y(t) - y_{\text{уст}}(t)$  является мгновенным значением динамической погрешности выходной величины  $y$ . Если предположить, что  $y_{\text{уст}}(t) = Sx(t)$ , то  $\Delta y_{\text{д}}(t) = y(t) - Sx(t)$  и абсолютная динамическая погрешность по входной величине определяется из выражения

$$\Delta x_{\text{д}}(t) = \frac{1}{S} y(t) - x(t).$$

Сравнивая последнюю формулу с предыдущей, получим формулу для трансформации динамической погрешности с выхода на вход ИП и обратно:

$$\Delta x_{\text{д}}(t) = \frac{1}{S} \Delta y_{\text{д}}(t).$$

Соответственно могут быть найдены и относительные динамические погрешности как по входной, так и по выходной величинам.

### Измерительные преобразователи с унифицированным выходным сигналом

Унификацией выходного сигнала называют приведение сигнала к линейной шкале с заданными начальной и конечной точками. Унификация необходима для ИП, применяемых в измерительных информационных системах, где используются общие элементы для последующей обработки информации от разнообразных ИП.

Унифицированные сигналы делятся на аналоговые, импульсно-аналоговые и цифровые. Наибольшее распространение для ИП получили аналоговые унифицированные сигналы, хотя развитие микропроцессорной техники позволит расширить возможности унификации выходных сигналов ИП в других формах.

В качестве аналоговых унифицированных сигналов нашли применение следующие сигналы: постоянный ток 0...1 мА, 0...5 мА; напряжение постоянного тока 0...1 В, 0...10 В; частота переменного тока. Эти значения постоянного тока и напряжения постоянного тока были в свое время установлены государственным стандартом и потому носят название «нормированные».

Для получения линейной характеристики ИП, что требуется при унификации выходного сигнала, приходится выполнять так называемую операцию линеаризации градуировочной характеристики ИП. Большинство существующих ИП имеют нелинейные характеристики. Наиболее простым способом линеаризации является замена нелинейной характеристики приближенно линейной.

Любая нелинейная зависимость  $y = f(x)$  может быть представлена степенным рядом вида

$$y = S_1x + S_2x^2 + \dots + S_nx^n.$$

Для приближения этой зависимости к линейной необходимо, чтобы все коэффициенты  $S_2, S_3, \dots, S_n$  были бы много меньше  $S_1$ . В результате получим приближенное равенство  $y \approx S_1x$ . Реальная характеристика ИП будет отличаться от принятой линейной, и появится погрешность линейности характеристики, или погрешность от нелинейности. Примером применения этого метода линеаризации является линейная зависимость сопротивления терморезистора из меди от температуры  $R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$ , полученная разложением в ряд с последующим упрощением функции вида  $R_t = R_0e^{\alpha(t-t_0)}$ , описывающей электротепловые процессы в проводниках.

Линеаризованная таким образом характеристика ИП может использоваться только в определенном ограниченном диапазоне изменения входной преобразуемой величины. В частности, для медного терморезистора этот диапазон преобразуемых температур от  $-50$  до  $180$  °C.

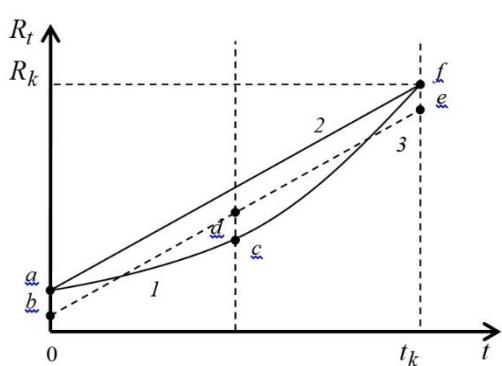


Рис. 2

Существуют графоаналитические методы линеаризации и оценки нелинейности характеристик ИП. Рассмотрим этот вопрос на примере платинового терморезистора, уравнение преобразования которого в области положительных температур имеет вид

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

$$\text{где } A = 3,97 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}; \quad B = 5,85 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

– постоянные коэффициенты. Эта зависимость представлена кривой 1 на рис. 2. Заменив кривую 1 прямой 2, проходящей через крайние точки рабочего диапазона с координатами  $R_0, t_0 = 0$  и  $R_k, t_k$ , получим линеаризованную градуировочную характеристику. Для кривой 2 можно написать:

$$R'_t = R_0(1 + \alpha t),$$

$$\text{где } \alpha = \frac{R_k - R_0}{R_0 t_k}.$$

Погрешность линейности при этом определяется по формуле

$$\Delta R_t = R'_t - R_t = R_0 t (\alpha - A - Bt).$$

Максимальная абсолютная погрешность линейности для квадратичного уравнения преобразования будет в середине диапазона  $0 \dots t_k$  и равна

$$\Delta R_{t_{\max}} = \frac{1}{4} B R_0 t_k^2.$$

Для уменьшения погрешности линейности за градуировочную характеристику принимают не прямую 2, а прямую 3, проведенную так, чтобы были равны между собой отрезки  $ab$ ,  $cde$  и  $ef$ . При этом удается уменьшить максимальное значение абсолютной погрешности, которая теперь может иметь как положительный, так и отрицательный знак. Оценив нелинейность характеристики ИП и убедившись, что она не превышает допустимого значения, градуированную характеристику считают линейной и указывают в паспорте ИП.

Для наиболее точных ИП, у которых погрешность линейности незначительна и проявляется как случайное отклонение, линеаризация характеристики ИП может быть произведена с использованием метода наименьших квадратов. В этом случае реальная характеристика  $y = f(x)$  заменяется линейной характеристикой  $y' = ax + b$ , отличающейся наилучшим приближением к реальной. С помощью метода наименьших квадратов определяют коэффициенты  $a$  и  $b$  линейной зависимости, имеющей наивероятнейший вид по отношению к реальной функции  $y = f(x)$ .

Весь диапазон изменения  $x$  разбивается на ряд равных участков, и измеряются ординаты точек  $y_i$  при различных значениях  $x$ . Этот метод предполагает, что сумма квадратов отклонений значений  $y_i$  от линейной зависимости  $y'_i = ax_i + b$  должна быть минимальной. Данное положение записывается уравнением

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 = \min.$$

Продифференцировав это уравнение по  $a$  и  $b$  и приравняв полученные выражения к нулю, получим 2 уравнения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]x_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)] &= 0. \end{aligned}$$

Из этих уравнений определяются значения  $a$  и  $b$  для проведения прямой  $y' = ax + b$ , расположенной наилучшим образом по отношению к нелинейной зависимости  $y = f(x)$ .

В случае, когда требуется высокая степень приближения характеристики ИП к линейной, используются специальные методы коррекции нелинейности. К таким методам относятся использование дифференциальных ИП и применение схем коррекции с активными и пассивными элементами коррекции.

Рассмотрим недифференциальный и дифференциальный емкостные измерительные преобразователи именно с точки зрения линейности этих преобразователей. Итак, емкостный измерительный преобразователь представляет собой двухобкладочный конденсатор, одна из пластин которого является подвижной. Емкость такого конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между пластинами (если диэлектрик отсутствует, то  $\epsilon$  принимается равной единице);  $S$  – площадь пластин;  $d$  – расстояние между пластинами, т. е. при изменении расстояния  $d$  между пластинами емкость изменяется.

Обозначим через  $C_0$  емкость этого преобразователя при некотором начальном положении подвижной пластины, т. е. при начальном расстоянии  $d_0$  между пластинами:  $C_0 = \epsilon_0 \epsilon S / d_0$ . Очевидно, что при увеличении расстояния  $d$  емкость  $C$  уменьшается, а при уменьшении  $d$  – увеличивается. Рассмотрим для примера случай, когда  $d$  уменьшается, а  $C$  увеличивается.

Обозначим изменение расстояния между пластинами через  $\Delta d$ , тогда можно записать  $C_0 + \Delta C = \epsilon_0 \epsilon S / (d_0 - \Delta d)$ , где  $\Delta C$  – приращение емкости ИП. Разделив числитель и знаменатель правой части последней формулы на  $d_0$ , получим  $C_0 + \Delta C = C_0 / (1 - \delta_d)$ , где  $\delta_d = \Delta d / d_0$  – относительное изменение расстояния между пластинами ИП. Разделив правую и левую части последнего выражения на  $C_0$ , получим зависимость относительного изменения емкости  $\delta_C = \Delta C / C_0$  от относительного изменения расстояния между пластинами, а именно  $\delta_C = \delta_d / (1 - \delta_d)$ . Видно, что зависимость относительного изменения выходной величины от относительного изменения входной величины нелинейна. Линейная зависимость в этом случае:  $\delta_C = \delta_d$ . Величина нелинейности определяется относительным изменением входной величины. Так, при  $\delta_d = 0,1$   $\delta_C = 0,111\dots$ , т. е. погрешность линейности составляет более 11 %. При увеличении расстояния  $d$

между пластинами последняя формула принимает вид

$$\delta_C = \delta_d / (1 + \delta_d).$$

Дифференциальный емкостный ИП представляет собой 2 одинаковых конденсатора с общей подвижной пластиной, так что при перемещении этой пластины емкость одного конденсатора увеличивается, а другого – уменьшается на то же значение. Выходным сигналом дифференциального ИП является разность выходных сигналов отдельных частей ИП, т. е.  $C_{12} = C_1 - C_2$ . При этом  $C_1 = C_0 / (1 - \delta_d)$ , а  $C_2 = C_0 / (1 + \delta_d)$ , где  $C_0$  – емкость первого и второго конденсаторов при одинаковых расстояниях между подвижной и неподвижной пластинами. Относительное изменение емкости  $C_{12}$ , т. е.  $\delta_C = C_{12} / C_0$ , будет равно:  $\delta_C = 2\delta_d / (1 - \delta_d^2)$ . Линейная зависимость в этом случае будет иметь вид  $\delta_C = 2\delta_d$ . Так как  $\delta_d < 1$ , то  $\delta_d^2$  всегда будет меньше  $\delta_d$ , а, следовательно, и погрешность линейности дифференциального емкостного ИП меньше погрешности недифференциального ИП. Так, при  $\delta_d = 0,1$   $\delta_C = 0,202$ , и погрешность линейности составляет всего 1 %, т. е. на порядок меньше погрешности линейности недифференциального преобразователя.

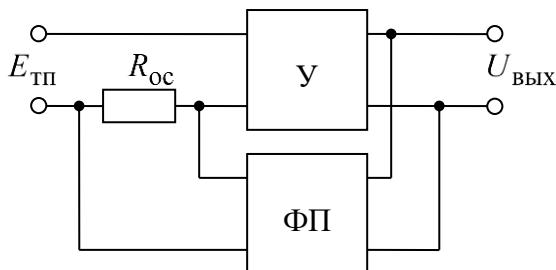


Рис. 3

Заметим также, что дифференциальный преобразователь имеет и большую чувствительность, о чем свидетельствует коэффициент 2 в последней формуле.

Одним из способов коррекции нелинейности ИП является использование функциональных преобразователей (ФП) в цепи отрицательной обратной связи. Рассмотрим этот случай на примере коррекции нелинейности термоэлектрического преобразователя (термопары).

Схема коррекции нелинейности характеристики термопары приведена на рис. 3, где обозначено:  $E_{\text{tp}}$  – ЭДС термопары;  $R_{\text{oc}}$  – сопротивление обратной связи;  $Y$  – усилитель;  $\Phi P$  – функциональный преобразователь;  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение преобразователя.

Нелинейная характеристика термопары аппроксимируется полиномом  $E_{\text{tp}} = C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3$ , где  $C_1, C_2$  и  $C_3$  – постоянные коэффициенты, зависящие от типа термопары;  $t$  – температура. Для этой схемы можно записать

$$U_{\text{вых}} = \frac{k}{1 + \beta k} E_{\text{пп}},$$

где  $k$  – коэффициент усиления усилителя;  $\beta$  – коэффициент отрицательной обратной связи. При  $\beta k \gg 1$   $U_{\text{вых}} = E_{\text{пп}} / \beta$ .

Полагая  $U_{\text{вых}} = St$ , где  $S$  – чувствительность преобразователя, получим выражение для функциональной обратной связи, т. е. зависимость коэффициента  $\beta$  от выходного напряжения ИП:

$$\beta = a_1 + (a_2 / S)U_{\text{вых}} + (a_3 / S^2)U_{\text{вых}}^2,$$

где  $a_1 = C_1 / S$ ;  $a_2 = C_2 / S$  и  $a_3 = C_3 / S$ .

Реализация последнего выражения возможна, например, с помощью ФП на основе диодно-резисторных схем. Коррекция нелинейности возможна также с помощью пассивных элементов, которые в некотором смысле подавляют нелинейность первичного ИП. Так, нелинейность полупроводниковых терморезисторов (термисторов) уменьшают, включая параллельно им резистор из манганиновой проволоки, сопротивление которого практически не зависит от температуры.

В настоящее время широко применяется компенсация нелинейности ИП с помощью средств цифровой вычислительной техники в измерительных информационных системах или в цифровых приборах промышленного назначения. По сравнению с аналоговыми средствами линеаризации цифровые устройства обеспечивают большую точность, помехозащищенность и удобство хранения информации. Сущность цифровой линеаризации заключается в добавлении к текущему значению закодированного выходного сигнала ИП дополнительных кодовых сигналов в соответствии с рассчитанной заранее функцией коррекции.

Рассмотрим пример. Пусть уравнение преобразования  $y = C + f(x)$ , где  $x$  – измеряемая (преобразуемая) величина;  $C$  – начальное значение выходного сигнала ИП, т. е. при  $x = 0$ . При  $x = a$  выходная величина уравнена  $b$ . Для определения коэффициента цифрового пересчета измеряемого параметра введем коэффициент  $K = a / (b - c)$ . Тогда можно записать  $Ky - KC = Z$ , и, следовательно,  $Z = Kf(x)$ , где  $C$  и  $Z$  – начальное и текущее значения выходной величины в цифровом виде.

Для линеаризации характеристики измерительного преобразователя необходимо выработать функцию коррекции  $\lambda(x) = Kf(x)Z$ , где  $Z$  – цифровое представление линейной характеристики преобразователя. График рассчитанной функции  $\lambda(x)$  аппроксимируется отрезками прямой, число которых определяется точностью коррекции. В зависимости от знака производной  $d\lambda(x)/dx$  на аппроксимируемом участке находится число добавляемых или вычитаемых единиц (например,



импульсов).

### **Рекомендуемая литература**

Аббакумов К.Е., Антонюк Е.М., Филатов Ю.В. Измерительные преобразователи: Учеб.пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 63 с.