

# КУРС ЛЕКЦИЙ: МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

## ТЕМА 1. МЕТРОЛОГИЯ

### ЛЕКЦИЯ 5

№	СОДЕРЖАНИЕ	
В	ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ (лекция 1)	
1	ВИДЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ (лекция 2)	
2	ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ (лекция 3)	
3	ВИДЫ И ОБЩИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ (лекция 4)	
4	СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СИЛЫ ТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (лекция 5)	1..26
4.0	Введение	2
4.1	Способы и средства измерений электрического тока	4
4.1.1	Подключение измерителей тока в электрическую схему	4
4.1.2	Виды измерителей электрического тока	6
4.2	Средства измерений электрического напряжения	14
4.2.0	Введение	14
4.2.1	Виды измерителей электрического напряжения	14
4.ПА	Градуировка шкалы электронных и цифровых вольтметров переменного тока	24
5	ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ. ВИДЫ. УСТРОЙСТВО. ХАРАКТЕРИСТИКИ (лекция 6)	
6	СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ (лекция 7)	
7	СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ (лекция 8)	
8	ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ (лекция 9)	

**Примечание** – Нумерация страниц, рисунков и таблиц сквозная в пределах раздела 4.

## 4 СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СИЛЫ ТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

### 4.0 Введение

В соответствии с началами физики под электрическим током понимается направленное движение электрических частиц (зарядов). Основной характеристикой тока является *сила электрического тока*  $I=q/t$  или более точно  $i=dq/dt$ .

- **Виды электрических сигналов: описание, характеристики**

В измерительной практике различают четыре типа электрических сигналов (токов и напряжений): *постоянные, переменные, импульсные и шумовые* (рисунок 4.1).

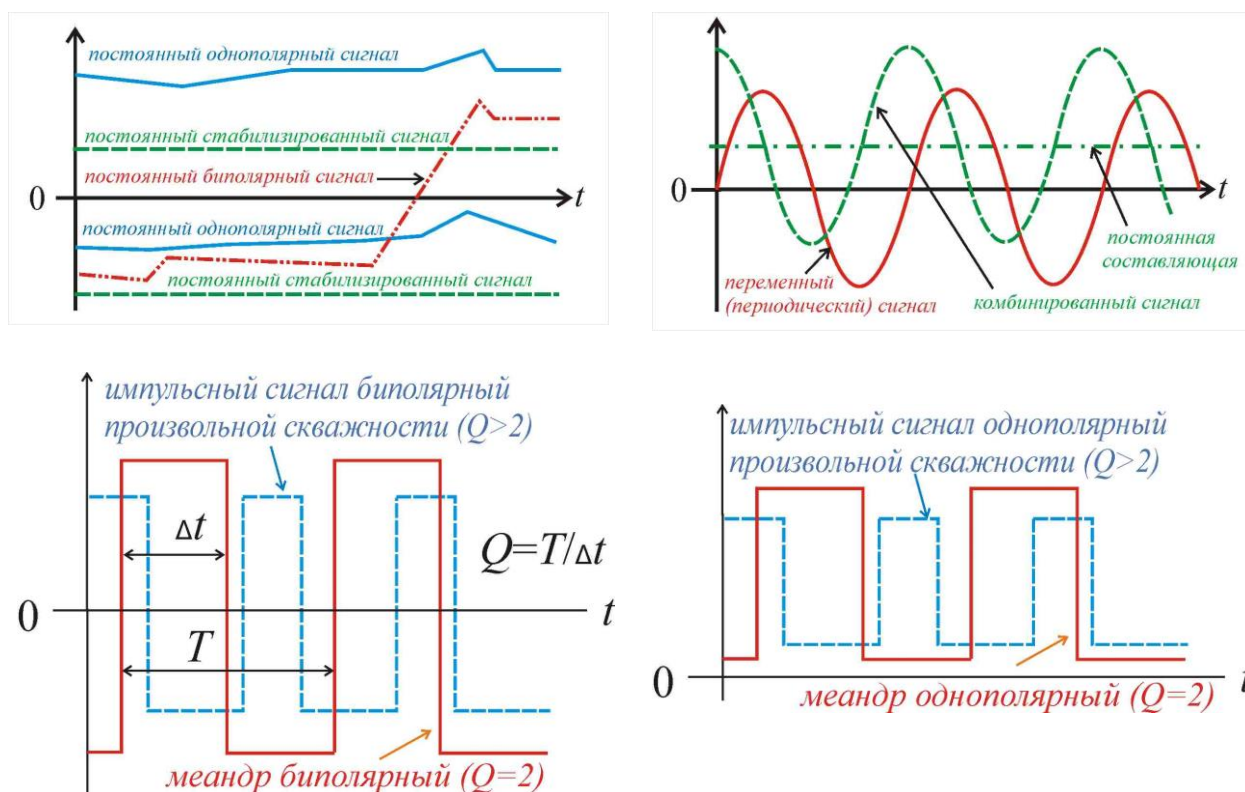


Рисунок 4.1 – Виды сигналов

#### Примечания –

- 1 Измерение импульсных и шумовых сигналов в данном курсе не рассматривается.
- 2 Далее в тексте применяется термин **сигналы**, если речь идёт одновременно о напряжениях и токах. Вместо громоздких терминов *сила электрического тока* и *электрическое напряжение* будем сокращённо писать – *ток* и *напряжение* соответственно.

Под *постоянными* обычно понимаются однополярные стабильные (напряжение источников постоянного тока) или медленно меняющиеся сигналы (выходное напряжение химических источников тока).

**Примечание** – В некоторых случаях постоянные сигналы могут менять и полярность, например, ток в аккумуляторе при зарядке имеет одно направления, а в нагрузку он отдаёт ток другого направления.

Под *переменным*, если отдельно не оговаривается – так принято исторически, понимают *двуполярный периодический*, например, синусоидальный сигнал в электросетях. Информативными параметрами переменного сигнала, которые мы будем измерять, являются его амплитудное ( $X_a$ ) и среднеквадратическое (или действующее\*) значения (рисунок 4.2).

**Примечание** – Среднеквадратическое значение сигналов будем обозначать без индексов:  $X$ ,  $U$ ,  $I$ . Точно также мы обозначаем постоянные напряжения и токи.

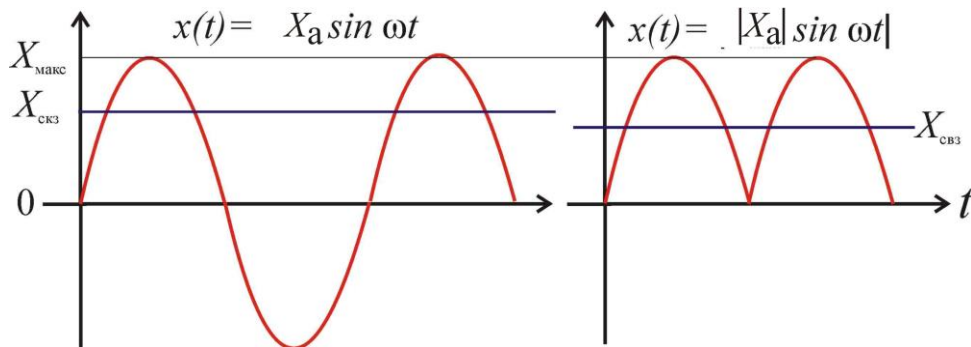


Рисунок 4.2 – Параметры переменных сигналов

**Примечание** – В ряде случаев используют понятие *средневыпрямленного значения* ( $X_{свз}$ , рисунок справа). Это понятие вводится в нашем курсе при описании *детекторов средневыпрямленного значения* (раздел 4.1.2). Аналитическое выражение  $X_{свз}$  для расчёта представлено ниже:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt \quad (0.1)$$

Поясним понятие среднеквадратического значения (СКЗ) сигналов на примере переменных токов. Для этого проведём эксперимент (рисунок 4.3).

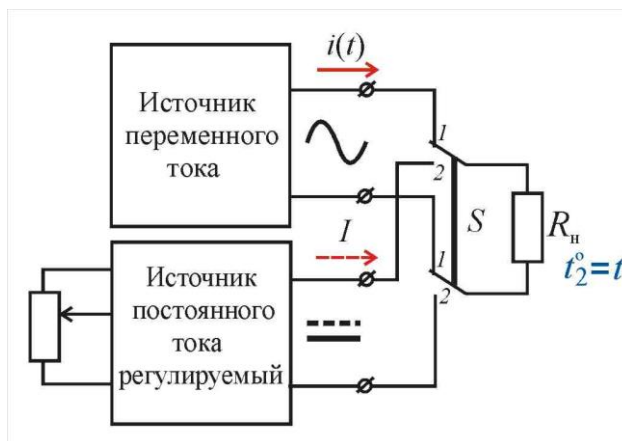


Рисунок 4.3 – Схема эксперимента по определению СКЗ переменного тока

К источнику **переменного** тока с помощью перекидного переключателя  $S$  подключим нагрузку  $R_n$  (положение 1 переключателя  $S$ ). Нагрузка, выделяя тепло, нагреется до некоторой температуры  $t_1^o$ . Затем нагрузку подключим к источнику регулируемого **постоянного** тока (положение 2 переключателя  $S$ ) и, регулируя (изменяя) значение постоянного тока, добиваемся того же значения температуры нагрузки  $t_2^o = t_1^o$ . Ток, при котором мы достигли этого равенства, и называется **среднеквадратическим значением** ранее поданного переменного тока.

СКЗ можно рассчитать, если известно аналитическое выражение сигналов:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (0.2)$$

**Примечание** – Переменный сигнал может иметь любую форму, однако часто мы имеем дело с синусоидальными сигналами. Для них легко показывается по (0.2) жёсткая связь между амплитудным и среднеквадратическими значениями:  $X = X_a / \sqrt{2}$ .

## 4.1 Способы и средства измерений электрического тока

### 4.1.1 Подключение измерителей тока в электрическую схему

Измерение токов на практике осуществляется часто. Для этих целей используют различного вида **амперметры**. Измерители тока включаются **в разрез** электрической схемы (рисунок 4.4).

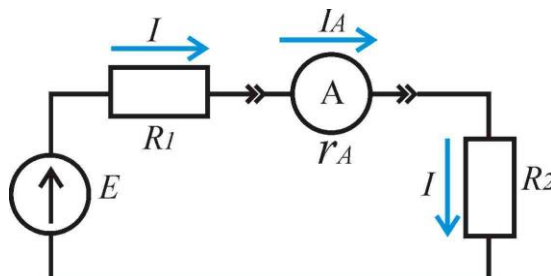


Рисунок 4.4 – Подключение амперметра в электрической схеме

Амперметры имеют внутреннее сопротивление  $r_A$ , которое влияет на общее сопротивление электрического контура: сопротивление контура увеличивается и это вносит погрешность в измерение тока: измеренное значение тока уменьшается. Такая погрешность называется *погрешностью взаимодействия* (лекция 9).

В этой связи внутреннее сопротивление амперметра  $r_A$  должно иметь маленькое значение, в идеале – нуль. Реальные сопротивления амперметров могут иметь значение в несколько сотен **ом**. С целью снижения погрешности взаимодействия используемый амперметр должен иметь внутреннее сопротивление существенно меньше сопротивления контура!

Для расширения диапазонов измерения тока используют *токовые шунты* или *измерительные трансформаторы* токов (ИТТ; рисунок 4.5).

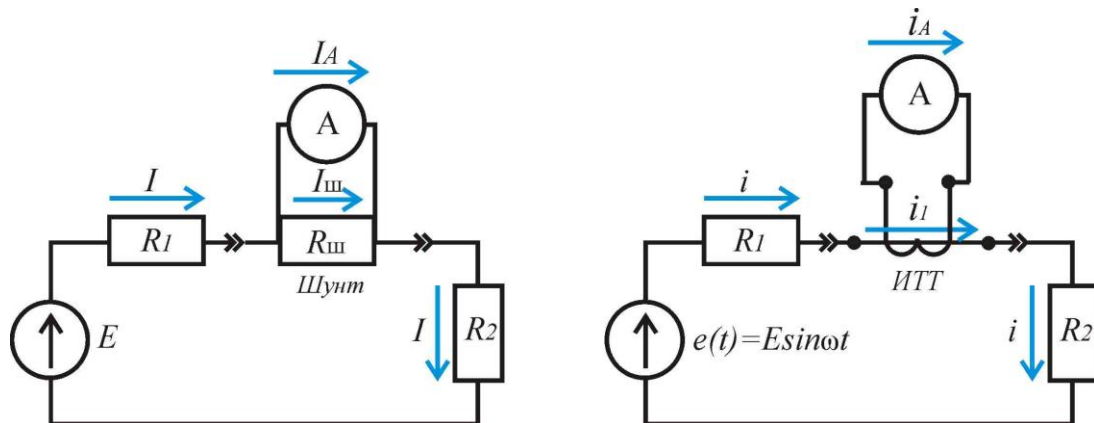


Рисунок 4.5 – Способы расширения диапазонов измерения амперметров

*Токовый шунт* представляет собой прецизионный резистор специальной конструкции (рисунок 4.6). Он имеет малое **нормированное** сопротивление и способен пропускать обычно значительные токи – **большие**, чем амперметр. Шунты могут применяться как в цепях постоянного тока, так и переменного.



Рисунок 4.6 – Примеры электрических шунтов

Измерительные трансформаторы тока (рисунок 4.7) используются для измерений в сетях постоянного и переменного тока. Они обладают дополнительным преимуществом – гальванически разделяют первичную цепь от цепи с амперметром и тем самым могут защищать персонал от поражения высоким напряжением первичной цепи при манипуляциях с амперметром\*.

Примечание (практическое) – Важно знать, что манипуляции с амперметром в этом случае не должны приводить к разрыву вторичной цепи ИТТ – это приведёт к аварии.



Рисунок 4.7 – Примеры измерительных трансформаторов тока

#### 4.1.2 Виды измерителей электрического тока

В современной практике широко используются следующие виды СИ для *непосредственного* измерения тока:

- электромеханические амперметры;
- выпрямительные амперметры;
- электронные амперметры;
- цифровые амперметры.

##### 4.1.2.1 Амперметры электромеханические

Это наиболее старые средства измерений. Они создаются на базе т.н. *измерительных механизмов*. В настоящее время актуально изучать и использовать только два механизма: *магнитоэлектрический* (МЭИМ) и *электромагнитный* (ЭМИМ). Они по-прежнему широко используются в промышленности и приборостроении (рисунок 4.9).

Магнитоэлектрические амперметры

Электромагнитные амперметры



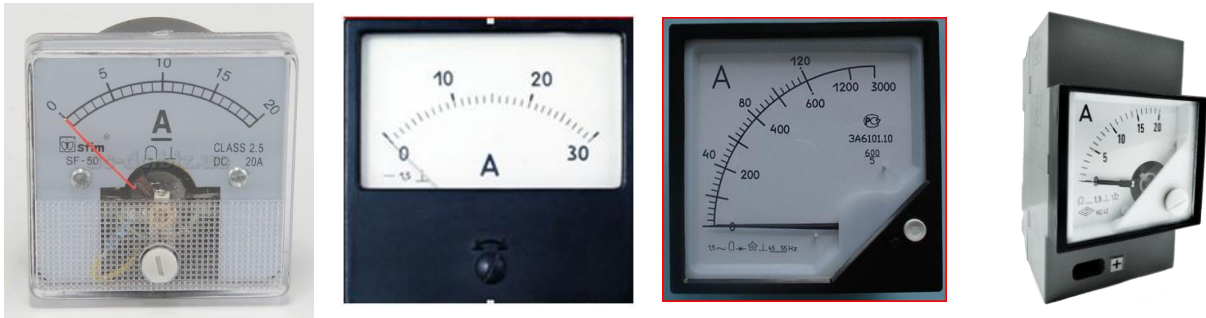
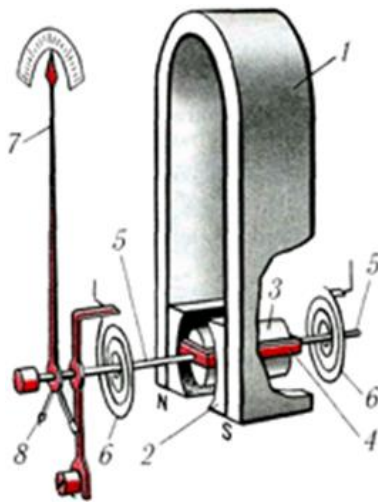


Рисунок 4.9 – Внешние виды электромеханических амперметров

Устройство механизмов достаточно сложное, поэтому дадим только поверхностное их описание.

- **Магнитоэлектрический механизм (рисунок 4.10).**



Основными деталями МЭИМ являются:

- постоянный магнит (деталь 1);
- подвижная (измерительная) катушка провода (деталь 4);
- ось, закрепляемая в корпусе прибора (деталь 5);
- пружины (деталь 6);
- стрелка со шкалой (деталь 7).

**Принцип работы:** измеряемый ток подаётся (не показано как) в катушку с проводом, магнитное поле которой взаимодействует с полем постоянного магнита. Чем больше ток, тем взаимодействие сильнее и катушка энергичнее поворачивается вокруг оси. Окончательный угол поворота, а вместе с ним – результат измерения, обусловлен силой противодействия пружины, которая возрастает пропорционально повороту оси. Стрелка останавливается, когда момент вращения, обусловленный током и характеристиками механизма, сравнивается с противодействующим моментом:  $M_{вр} = M_{пр}$ .

Рисунок 4.10 – Устройство МЭИМ

МЭИМ позволяют измерять только постоянные токи, в общем случае – постоянную составляющую переменного тока (рисунок 4.1).

Направление *вращающего момента* в МЭИМ зависит от направления тока, поэтому необходимо обращать внимание на полярность подаваемого на амперметр напряжения. Так, если имеем амперметр с нулевой отметкой в крайнем левом положении на шкале – таких приборов большинство, то подача отрицательного тока будет приводить к вращению механизма влево, и это может привести к выходу тока из строя. Если ноль посередине шкалы, то подавать на вход допустимо напряжение обеих полярностей (рисунок 4.11).

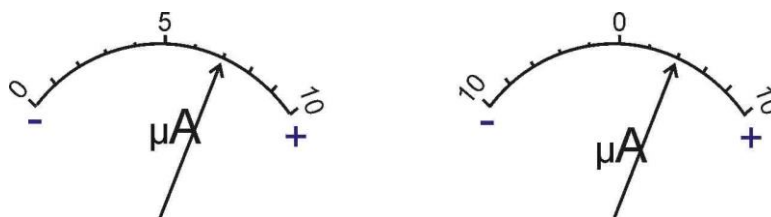


Рисунок 4.11 – Два типа шкал микроамперметров

МЭИМ имеют высокую чувствительность и позволяют измерять малые токи со значениями в несколько микроампер. Такие чувствительные измерители принято называть *миллиамперметрами* или *микроамперметрами*.

Механизмы характеризует высокая точность измерения. Достижимый класс точности 0,1 (*предельное значение основной приведённой погрешности*  $\gamma_{o.п.} = \pm 0,1\%$ ). Характерное внутреннее сопротивление (сопротивление подвижной катушки) – несколько сотен ом.

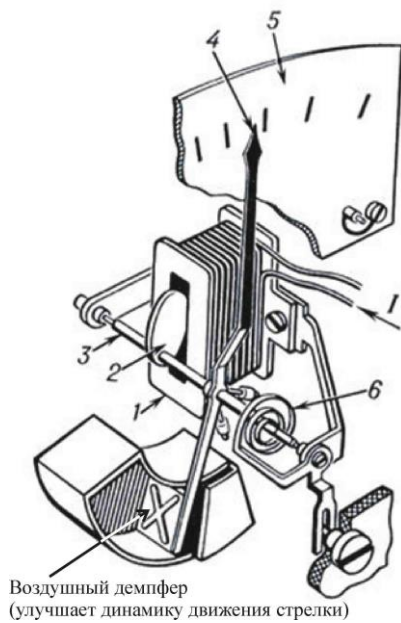
Помимо самостоятельных изделий – амперметров, МЭИМ широко встраиваются в различные изделия, например, источники постоянного тока (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Примеры использования МЭИМ в источниках питания

- **Электромагнитный механизм** (рисунок 4.13).





Основными деталями ЭМИМ являются:

- неподвижная (измерительная) катушка провода (деталь 1);
- сердечник (пластина) из *магнитомягкого* материала (деталь 2);
- ось, закрепляемая в корпусе прибора (деталь 3);
- стрелка (деталь 4);
- шкала (деталь 5).
- пружины (деталь 6);

**Принцип работы:** измеряемый ток ( $I$ ) подаётся в катушку с проводом, магнитное поле которой взаимодействует с полем намагниченного *сердечника* - сердечник втягивается в щель катушки и поворачивает ось. Чем больше ток, тем сильнее взаимодействие и тем *сердечник* энергичнее втягивается в катушку. Окончательный угол поворота, а вместе с ним – результат измерения, обусловлен силой противодействия *пружины*, которая возрастает пропорционально повороту оси.

Назначение: измерение СКЗ переменных токов.

Рисунок 4.13 – Устройство ЭМИМ

ЭМИМ позволяют измерять как постоянные, так и переменные токи, однако их обычно используют для измерений **среднеквадратических значений** переменных токов – постоянные токи лучше измеряют МЭИМ. ЭМИМ имеют невысокую чувствительность и чаще используются для непосредственного измерения достаточно больших токов в электросетях переменного тока. Для расширения диапазонов измерения в ЭМИМ используются *токовые шунты* или *измерительные трансформаторы тока* (см. введение в раздел).

ЭМИМ характеризуются средней точностью измерения, достижимый класс точности 0,5 ( $\gamma_{0.п.} = \pm 0,5\%$ ), типовые – 1,0 или 1,5. Характерное внутреннее сопротивление (сопротивление измерительной катушки с медным проводом) – несколько сотен **ом**.

ЭМИМ имеют узкий частотный диапазон измеряемых сигналов, который не превышает обычно 1000 Гц. Однако это не мешает их использовать в электроэнергетике, где частотный диапазон сигнала ограничивается значениями (45...500) Гц. В начале шкала приборов может быть существенно нелинейной, но в этой области измерения не рекомендуются.

### Сравнительные характеристики измерительных механизмов.

Таблица 4.1 – Типовые характеристики измерительных механизмов

Характеристики	МЭИМ	ЭМИМ
Вид измеряемого тока	Постоянный	Переменный и постоянный
Характер шкалы	Равномерный	Не равномерный в начале шкалы
Чувствительность	Высокая	Невысокая
Точность	Высокая	Средняя
Диапазоны измерения без шунтов	Микро- и десятки миллиампер	Десятки и сотни миллиампер, десятки ампер

#### 4.1.2.2 Амперметры выпрямительные

МЭИМ не способен непосредственно измерять *переменный* ток, однако по ряду причин их также приспособливают для измерения *переменных* сигналов. Для этого их снабжают *преобразователями переменного тока в постоянный ток – детекторами*. На рисунке 4.14 показана функциональная схема такого *выпрямительного амперметра (ВА)*, в качестве *детектора* в котором использован *выпрямительный мост*.

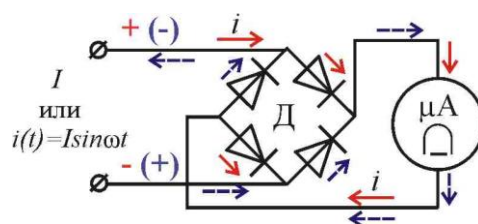


Рисунок 4.14 – Схема выпрямительного амперметра

На рисунке показано прохождение токов при сигналах противоположных полярностей (обозначены непрерывными и пунктирными стрелками двух цветов), как это происходит при измерении синусоидальных токов. Ток, проходящий через магнитоэлектрический микроамперметр, имеет **пульсирующий вид, т.е. представляет собой сумму периодического сигнала и постоянной составляющей**. МЭИМ в соответствии с рассмотренным ранее принципом его действия реагирует на постоянную составляющую такого сигнала, называемую *средневыпрямленным значением*  $I_{свз}$ . Эта особенность МЭИМ одновременно является и его недостатком: область его использования – измерение синусоидальных токов (см. далее вопросы калибровки электронных амперметров).

Преимущества ВА: простота реализации, отсутствие источников питания.

Обычная область применения ВА – в простых портативных многофункциональных измерительных приборах (*тестерах, авометрах*, и т.п.; рисунок 4.15).

#### 4.1.2.3 Амперметры электронные

Отличительная особенность *электронных амперметров (ЭА)* – наличие в структуре *электронного усилителя* с управляемым коэффициентом усиления и *электронного детектора*, который отличается от обычного выпрямителя сложной преобразовательной схемой, допускающей преобразование не только амплитудных и средневыпрямленных значений, но и среднеквадратических значений переменного тока. Напомним, что такая возможность позволяет амперметру осуществлять измерения не только синусоидальных токов, но и переменных токов различной формы. Структура электронного амперметра показана на рисунке 4.16.

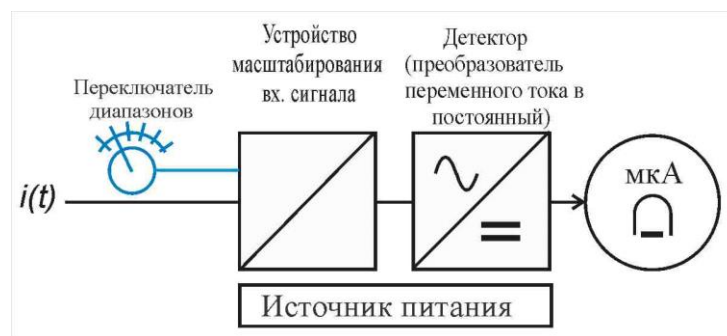


Рисунок 4.16 – Структура электронного амперметра переменного тока

Общее преимущество электронных амперметров: низкое входное сопротивление, большое количество диапазонов измерения\*), хорошие точностные возможности. Недостатки: для их работы требуется источник питания, высокая цена.

**Примечание** – Напоминаем известное метрологическое правило: диапазон измерения необходимо выбирать так, чтобы результат измерения находился как можно ближе к концу шкалы. В этом случае *точность измерения* будет наивысшей.

Электронные амперметры чаще всего применяются в лабораторных условиях.

#### 4.1.2.4 Амперметры цифровые

Цифровые амперметры (ЦА) это наиболее современный вид амперметров, который внешне выделяется способом отображения результатов измерения. ЦА выпускаются в различных конструктивных и эксплуатационных вариантах (рисунок 4.17).



Щитовой



Рисунок 4.17 – Конструктивные разновидности цифровых амперметров

ЦА полностью электронные, сложные измерительные приборы. Их типовая структурная схемы представлена на рисунке 4.18.



Рисунок 4.18 – Структурная схема цифрового амперметра

Структурное отличие от электронного амперметра заключается в замене измерительного механизма на *аналого-цифровой преобразователь* (АЦП) и *цифровое отсчётное устройство* (ЦОУ).

Более развитая структура цифровых амперметров представлена на рисунке 4.19.

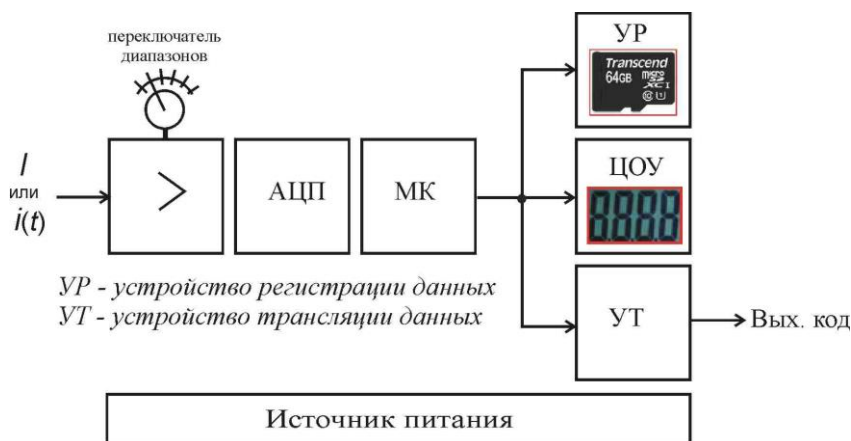


Рисунок 4.19 – Структура цифрового амперметра с микроконтроллером

Важной особенностью структуры является наличие *микроконтроллера*, который выполняет две укрупнённые функции: обработка сигналов (кодов), поступающих от АЦП, и управление структурными ресурсами. Не считая АЦП, таких ресурсов в общем случае три: ЦОУ, *устройство регистрации*

(УР) результатов измерений и *устройство трансляции* (УТ) данных (результаты измерений, время измерений и др.) удалённому потребителю. В более простых исполнениях один или даже два из указанных *устройств* может отсутствовать.

Итак, АЦП в данной схеме, в отличие от схемы на рисунке 4.18, работает по-другому, а именно: с его помощью кривая переменного тока *оцифровывается* – превращается из непрерывной в набор значений. Так на рисунке 4.20 показан пример *оцифровки* синусоидального напряжения: из непрерывной синусоида превращена в 16 дискретных значений. Микроконтроллер этот массив мгновенных значений обрабатывает и превращает в *среднеквадратическое (действующее)* значение тока. Поэтому детектор в этой структуре уже не требуется.

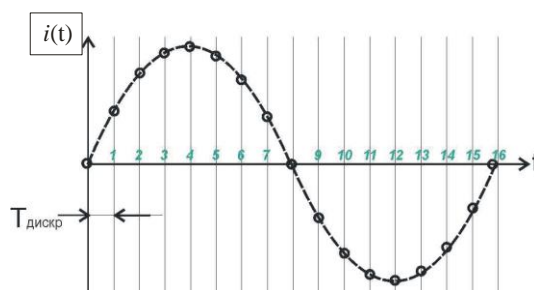


Рисунок 4.20 – Дискретизация измеряемого тока

По сравнению с аналоговыми (электромеханические, выпрямительные и электронные) амперметрами цифровые могут обладать гораздо лучшими *метрологическими характеристиками*. Отличительным признаком точного измерителя является число разрядов цифровой шкалы прибора. Простые (относительно грубые) приборы содержат обычно до трёх полных десятичных разряда (999). Точные приборы имеют четыре-пять полных разряда (9999 или 99999). Для тех и других старший разряд – самый левый, шкалы для некоторых изделий может принимать значение 2, 3, 4 или 5.

Простые ЦА обычно реализуются в портативных амперметрах и *мультиметрах*.

Точные ЦА – дорогие изделия, выпускаются как для лабораторного использования, но в ряде случаев и как портативные изделия.

## 4.2 Средства измерений электрического напряжения

### 4.2.0 Введение

Раздел развивает материал раздела 4. Дело в том, что методы измерений электрических напряжений фактически те же, что и у амперметров. Другими словами, виды вольтметров совпадают с видами амперметров.

Основное отличие вольтметров по характеристикам – входное сопротивление, оно должно быть принципиально большим, т.к. в противном случае возрастает погрешность взаимодействия с объектом измерения

### 4.2.1 Виды измерителей электрического напряжения

#### 4.2.1.1 Вольтметры электромеханической группы

Актуальность таких приборов как самостоятельных изделий, несмотря на их преклонный возраст, сохраняется в электроэнергетике, промышленности, на транспорте. По-прежнему они встраиваются как устройства индикации в более сложные изделия: источники питания, генераторы и т.п.

- **Магнитоэлектрические вольтметры (рисунок 4.21)**

Создаются на базе МЭИМ. Обладают в основном теми же свойствами, что и магнитоэлектрические амперметры. Не забудем, что такие измерители способны измерять только постоянные сигналы (токи и напряжения).



Рисунок 4.21 – Разновидности магнитоэлектрических вольтметров

В отличие от амперметров вольтметры должны иметь большое входное сопротивление для снижения погрешности взаимодействия с объектом измерения. Входное сопротивление в МЭИМ обусловлено сопротивлением провода подвижной (измерительной) катушки. Оно мало (несколько сотен **ом**) и чтобы его увеличить, последовательно включают *добавочное сопротивление* ( $R_{доб}$ ; рисунок 4.22).



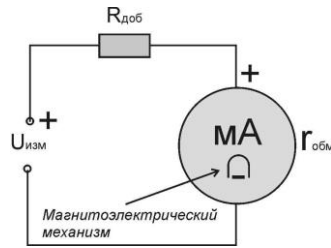


Рисунок 4.22 – Структура вольтметра постоянного тока на базе МЭИМ

Проведём расчёт значения добавочного сопротивления. Оно рассчитывается по (4.1), где  $U_k$  – *конечное значение* диапазона измерений, а  $I_{по}$  – *ток полного отклонения*. Это такой ток в *обмотке* катушки, при котором стрелка прибора установится на отметке  $U_k$ :

$$R_{вх} = R_{доб} + r_{обм} = U_k / I_{по} \quad (4.1)$$

Пусть  $I_{по} = 100$  мкА,  $U_k = 100$  В, тогда  $R_{вх} = 1$  МОм. Значение  $r_{обм}$  обычно известно из характеристик выбранного микроамперметра, тогда можно рассчитать  $R_{доб}$ . Полученный результат нас может удовлетворить: входное сопротивление в 1 МОм достаточно хороший результат. Но посмотрим, какие значения  $R_{вх}$  мы получим для *меньших* диапазонов измерений. Так для  $U_k = 10$  В из (4.1) мы имеем уже  $R_{вх} = 100$  кОм, напряжению  $U_k = 1$  В соответствует  $R_{вх} = 10$  кОм. Последний результат нас мало будет удовлетворять, но позволит ещё использовать такой вольтметр для измерений в заведомо низкоомных цепях.

Измеряемое напряжение ( $U_{изм}$ ), подаваемое на последовательное соединение  $R_{доб} + r_{обм}$ , вызывает пропорциональный ток в обмотке, поэтому шкалу используемого миллиамперметра можно *градуировать* в единицах напряжения – вольтах. На рисунке 4.23 показана структура серийного вольтметра с выполненной *градуировкой*.

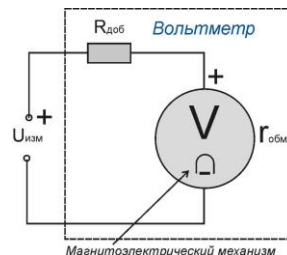


Рисунок 4.23 – Структура вольтметра постоянного тока на базе МЭИМ

В качестве примера рассмотрим основные характеристики семейства *щитовых* МЭИМ-вольтметров типа М42609:



Возможные пределы измерений, В – 2; 3; 7,5; 10; 15; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 250; 300; 400; 500; 600.

Классы точности – 1,5 или 2,5.

Габаритные размеры, мм<sup>3</sup> – 48×48×48.

Рабочее положение шкалы – вертикальное.

Масса, г – 120

Рисунок 4.24 – Внешний вид и характеристики МЭИМ-вольтметра типа М42609

Наиболее распространенные *электромагнитные* вольтметры с классами точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 позволяют измерять постоянные напряжения в диапазоне от 1 В до 1000 В. Для измерения больших напряжений (более 1 кВ) на вход вольтметра допускается подключение внешнего добавочного сопротивления. Для измерения напряжений менее 1 В наиболее целесообразно использовать *электронные* или *цифровые* вольтметры (см. далее).

- **Электромагнитные вольтметры (рисунок 4.25)**



Рисунок 4.25 – Разновидности электромагнитных вольтметров

Вольтметры, создаваемые на базе ЭМИМ, обычно предназначены для непосредственного измерения *действующего (среднеквадратического) значения* тока, протекающего по измерительной обмотке. В ряде случаев их можно использовать и для измерения постоянных напряжений – принцип действия механизма позволяет. Наиболее распространенные вольтметры имеют классы точности 0,5; 1,0; 1,5 и позволяют измерять переменные

напряжения от 1 В до 1000 В в частотном диапазоне сигнала от 45 Гц до 1 кГц. Входные сопротивления не велики. При этом следует ожидать, что входное сопротивление возрастает с ростом предела измерения.

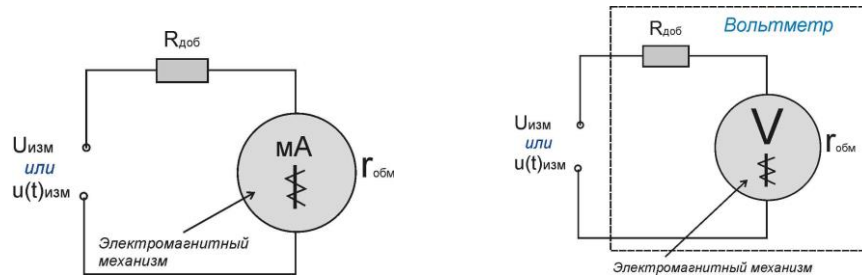


Рисунок 4.26 – Структуры вольтметров на базе электромагнитного механизма

#### 4.2.1.2 Вольтметры выпрямительной группы

Мы уже знаем, по какой причине создаются амперметры выпрямительной системы (см. раздел 4.1). Вольтметр, как и ранее, создаётся из амперметра путём подключения добавочного сопротивления.

В качестве примера рассмотрим характеристики семейства вольтметров ЭВ2265, созданного на рассмотренных основах (рисунок 4.27).



Пределы измерений, В – 5; 15; 30; 75; 150; 300; 600.

Классы точности – 0,2 или 0,5.

Габаритные размеры, мм<sup>3</sup> – 243×200×100.

Рабочее положение шкалы – горизонтальное.

Масса, г – 3000

Рабочий температурный диапазон, °С – 10...35

Относительная влажность, % - 80 при  $t^{\circ}=+20^{\circ}\text{C}$

Рисунок 4.27 – Вид и характеристики лабораторного вольтметра ЭВ2265

ЭВ2265 – аналоговый прибор прямого действия, выполнен в виде измерителя постоянного тока с выпрямителем. Измеритель постоянного тока магнитоэлектрической системы со стрелочным указателем и равномерной шкалой длиной 150 мм, с *антипараллаксным* устройством.

Дадим пояснение. Антипараллаксное устройство это зеркальная полоска, которая по форме повторяет дугу шкалы и позволяет уменьшить

*погрешность считывания результата.* Для этого необходимо считывать результат одним глазом так, чтобы стрелка и её отражение в зеркале совпали.

Лабораторные вольтметры ЭВ2265 – многопредельные приборы, предназначенные для измерения СКЗ напряжения переменного тока **синусоидальной – и только, формы.** Диапазон частот измеряемого напряжения от 45 до 1000 Гц. Вольтметры применяется при поверке и калибровке менее точных приборов, а также, для проверки параметров изделий при их производстве, контроле и испытаниях.

#### 4.2.1.3 Вольтметры электронные

В отличие от электромеханических аналоговых вольтметров *электронные вольтметры (ВЭ)* имеют в своем составе *электронные усилители напряжения* – отсюда название вольтметров. Напряжения малых значений преобразуется в этих приборах в постоянный ток, который протекает затем в измерительной катушке МЭИМ, шкала которого *градуируется* в единицах напряжения – вольтах.

Упрощенная типовая схема *ВЭ постоянного тока* состоит из трех основных узлов: *входного делителя* напряжения, *усилителя* постоянного тока, подключенного к его выходу – всё это т.н. *входные цепи (ВхЦ)*, и *магнитоэлектрического микроамперметра* (рисунок 4.28).

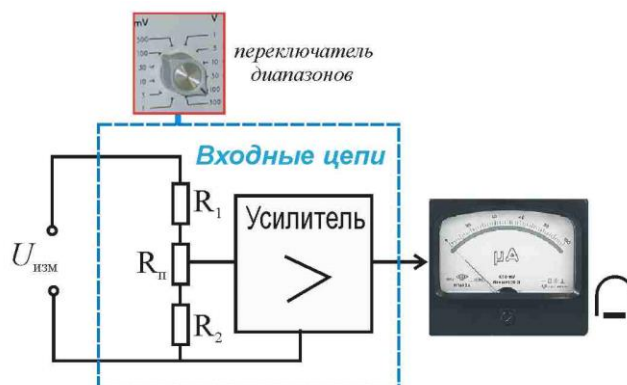


Рисунок 4.28 – Структура электронного вольтметра постоянного тока

Делитель напряжения обеспечивает высокое входное сопротивление электронного вольтметра (не менее 1 МОм). *Коэффициенты деления и усиления* можно дискретно регулировать вручную, что делает ВЭ *многодиапазонными*. За счет высокого коэффициента усиления усилителя ВЭ обеспечивает пользователю высокую *чувствительность* (другими словами,

можно измерять, в том числе, сравнительно малые напряжения) по сравнению с *электромеханическими*.

В структуру ВЭ для измерения переменных напряжений добавлен детектор, как это было сделано ранее для амперметров (рисунок 4.29).

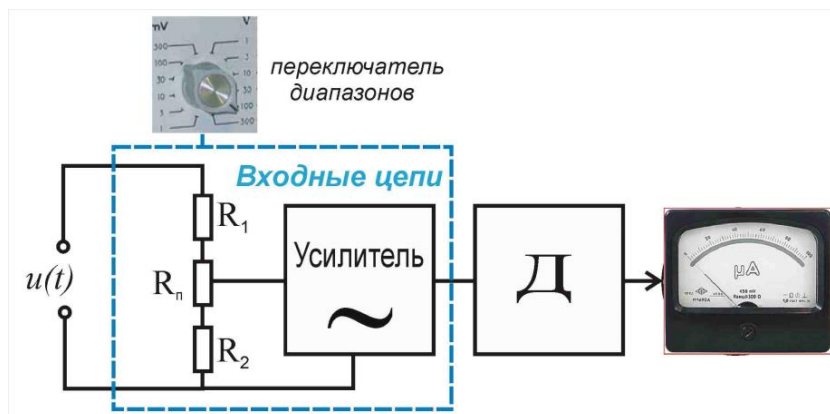


Рисунок 4.29 – Структура электронного вольметра переменного тока

В качестве примера на рисунке 4.10 представлен общий вид, а рядом – характеристики электронного милливольтметра переменного тока типа ВЗ-56.

Вольтметр ВЗ-56 предназначены для измерения среднеквадратического значения напряжения переменного тока **синусоидальной формы**. Шкалы приборов проградуированы в **среднеквадратических значениях синусоидального напряжения**.

Применяются для проверки, наладки и ремонта различной радиотехнической аппаратуры и аппаратуры связи в лабораторных, производственных, а также в жестких условиях эксплуатации.



Пределы измерений, мВ – 1; 3; 10; 30; 100. Пределы измерений, В – 1; 3; 10; 30; 100; 300.

Частотный диапазон напряжений, Гц – 45...10<sup>6</sup>.

Классы точности – 2,5 в частотном диапазоне 45 Гц ...200 кГц; 4 – на остальных частотах.

Габаритные размеры, мм<sup>3</sup> – 168×206×328.

Масса, кг – 6.

Рабочий температурный диапазон, °С – -30...+50

Относительная влажность, % – 98 при  $t^{\circ} = +35^{\circ}\text{C}$ .

Рисунок 4.30 – Внешний вид и основные характеристики вольтметра ВЗ-56

Наиболее распространенные аналоговые электронные вольтметры позволяют измерять напряжения от  $10^{-6}$  (микровольты) до  $10^3$  В (киловольты) в частотном диапазоне от 10 Гц до  $10^9$  Гц (гигагерцы). *Значения пределов основной приведенной погрешности* зависят от диапазона измерений и частоты измеряемого напряжения и составляют обычно  $\pm (0,5 \dots 5,0) \%$ .

#### 4.2.1.4 Вольтметры цифровые

Цифровые вольтметры (ЦВ) – современный и наиболее развиваемый класс вольтметров (рисунок 4.31). Это электронные вольтметры, которые привлекают способом отображения результатов измерения. Для отображения используются т.н. *цифровые дисплеи*, состоящие из нескольких десятичных цифр – декад. Чем больше декад в дисплее, тем точнее прибор.



Рисунок 4.31 – Конструктивные разновидности цифровых вольтметров

ЦВ отличаются от ранее описанных цифровых амперметров только особенностями входных цепей (ВхЦ), назначение которых – обеспечить необходимое согласование характеристик измеряемого напряжения с возможностями электронных преобразовательных схем вольтметра. Главная функция ВхЦ это масштабирование сигнала: если сигнал относительно мал, то ВхЦ его усиливают, если велик, то уменьшают. Переключение диапазонов измерения обычно осуществляет пользователь с помощью механического секторного или кнопочного переключателя на лицевой панели прибора, однако входные цепи некоторых ЦВ наделены замечательным свойством – **автоматически выбирать диапазон измерения.**

Другая функция ВхЦ – защита входа ЦВ от перегрузки, возникающей, когда на вход несанкционированно подаётся опасно большое напряжение.



С учётом сказанного, можно утверждать, что структура ЦВ полностью совпадает со структурой цифрового амперметра (см. рисунок 4.18).

В качестве примера современных ЦВ рассмотрим относительно простой *щитовой* вольтметр.

**ЦВ ИНС-Ф1** (рисунок 4.32). Прибор предназначен для измерений в сетях переменного тока, встраивается в электротехнические щиты и шкафы. Прибор имеет один диапазон измерения. Измеряет СКЗ переменного напряжения, имеющего как синусоидальную, так и **искажённую форму**.



Диапазон измерения, В – 0...264

Погрешность измерения, % –  $\pm 0,5$  в нормальных условиях и в диапазоне напряжений  $220\text{В} \pm 20\%$ .

Диапазон рабочих температур, °C – минус 20...+50.

Напряжение питания, В – 90...264.

Мощность потребления, не более, ВА – 4.

Габаритные размеры, мм<sup>3</sup> – 76×34×70

Масса, не более, г – 500

Рисунок 4.32 – Внешний вид и основные характеристики щитового ЦВ типа ИНС-Ф1

Мы рассмотрели простой и дешёвый вариант, который создан на основе одной-двух интегральных микросхем. Широко используются более дорогие ЦВ, которые имеют хорошие метрологические свойства и сложные функции. Такие ЦВ создаются на основе более сложной структуры, представленной на рисунке 4.33.

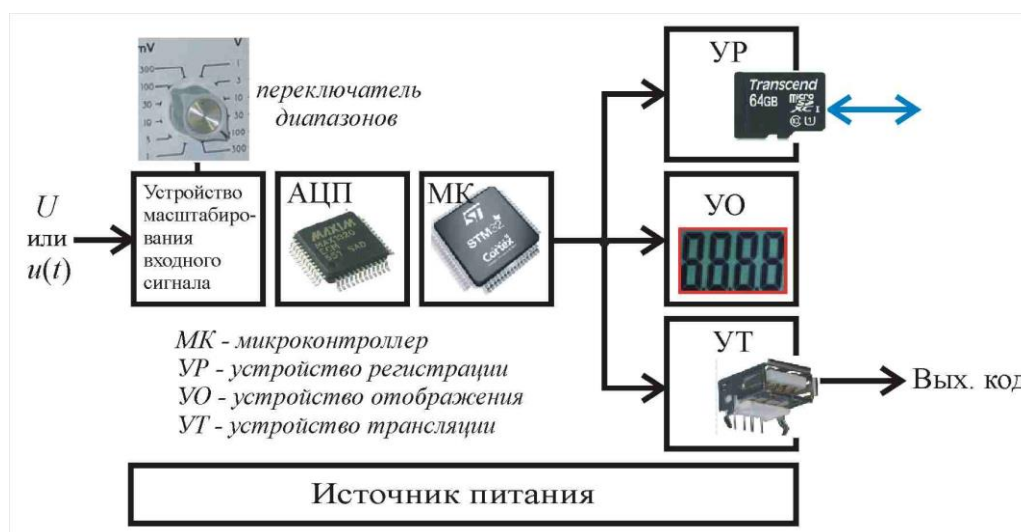


Рисунок 4.33 – Обобщённая структура микропроцессорного ЦВ

Ключевая особенность этой структуры – наличие микроконтроллера. Напомним, что современный МК способен как управлять всей структурой конечного изделия, например, цифрового прибора – это его основная задача, так и осуществлять высокопроизводительную обработку измерительной информации, которая в виде предварительно оцифрованных значений поступает в него с выхода АЦП. В некоторых случаях АЦП является встроенным функциональным ресурсом микроконтроллера.

Результаты измерений в СИ утилизируются в общем случае тремя способами: отображаются на дисплее, регистрируются тем или иным способом в устройствах регистрации, транслируются удалённому потребителю.

Часто все эти функции в одном изделии не реализуется и СИ получают усечённые структуры (рисунок 4.34).

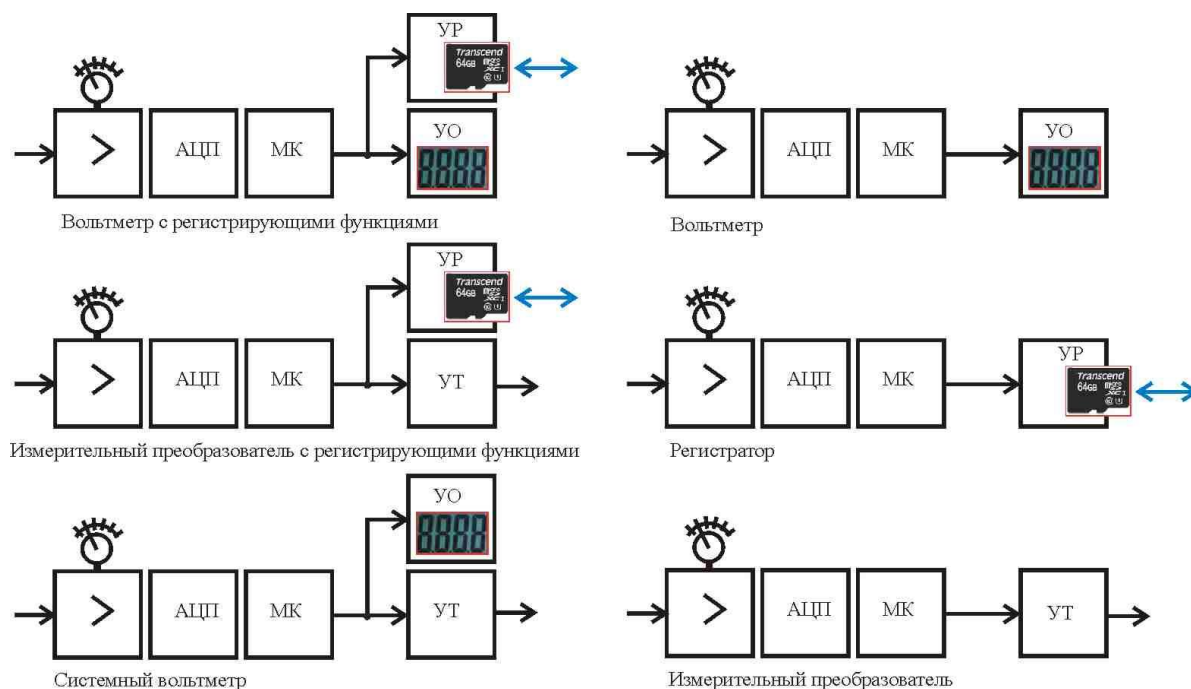


Рисунок 4.34 – Типовые структуры современных цифровых измерителей напряжения

В зависимости от реализованной структуры такие измерители напряжений могут называться регистраторами, вольтметрами с регистрирующими функциями, измерительными преобразователями, преобразователями с регистрирующими функциями, измерительными приставками и просто вольтметрами.

В качестве примера сложного ЦВ рассмотрим вольтметр СВ3010 (рисунок 4.35).



Рисунок 4.35 – Внешний вид цифрового вольтметра CB3010

**Описание и основные характеристики вольтметра CB3010.**  
Предназначен для измерений напряжения постоянного тока и СКЗ напряжения переменного тока частотой от 40 до 1500 Гц. Может использоваться в качестве точных рабочих приборов, а также рабочих эталонов для поверки приборов постоянного и переменного тока классов точности 0,3 и более грубых. По заказу выпускаются с интерфейсами *RS232* или *RS485*.

**Основные характеристики.**

Пределы измерений, В – 7,5; 15; 30; 60.

Пределы основной приведенной погрешности, % –  $\pm 0,1$ .

Входное сопротивление, не менее, кОм – 100.

Напряжение питания постоянного тока, В – 9 ... 18.

Потребляемая мощность, не более, Вт – 5.

Габаритные размеры, мм<sup>3</sup> – 225 × 100 × 200.

Масса, не более, кг – 1,0.

Диапазон рабочих температур, °С – от +5 до +40.

Относительная влажность воздуха при 25 °С, % – до 90.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4А

### Градуировка шкалы электронных и цифровых вольтметров переменного тока

ВЭ переменного тока строятся с применением т.н. *детекторов* (или *измерительных выпрямителей*). Их назначение – преобразование переменного напряжения в постоянный ток, с тем, чтобы его затем можно было измерить магнитоэлектрическим механизмом (МЭИМ; рисунок 4.П1).

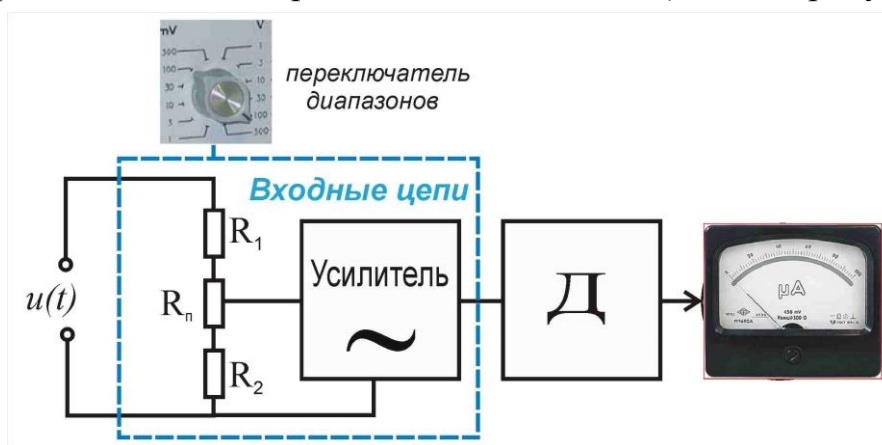


Рисунок 4.П1 – Типовая структура электронного вольтметра переменного тока

На практике реализуются три разновидности детекторов:

- *амплитудного значения*  $U_a$ . Преобразует максимальное (амплитудное) значение переменного напряжения в постоянное;
- *средневыпрямленного значения*. Преобразует средневыпрямленное значение переменного напряжения  $U_{свз} = (1/T) \cdot \int |u(t)| \cdot dt$  в постоянное;
- *среднеквадратического\*) значения* (СКЗ). Преобразует среднеквадратическое значение переменного напряжения  $U = \sqrt{(1/T) \cdot \int u^2(t) \cdot dt}$  в постоянное.

**Примечание** – Этот параметр часто в литературе обозначают по-другому: *среднее квадратическое, среднеквадратичное; действующее, эффективное*.

Детектор СКЗ ещё называют *детектором истинного СКЗ (true RMS)*. Дело в том, что именно это значение интересует конечного пользователя.

На примере **нормированного** синусоидального напряжения вида  $u(t) = 1 \cdot \sin \omega t$ , на графике (рисунок 4.П2) показаны значения всех трёх параметров синусоидального напряжения. Значения параметров рассчитаны по известным соотношениям:  $U = U_a / \sqrt{2}$ ;  $U_{свз} = U / 1,1$ .

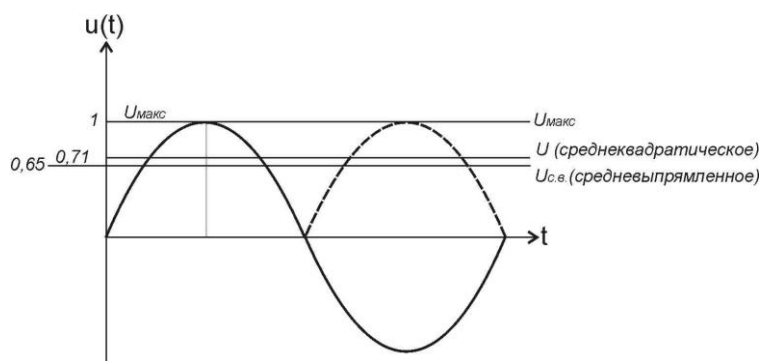


Рисунок 4.П2 – Параметры синусоидального напряжения

Важно знать, что независимо от вида Д шкалы ВЭ *градуируются* однотипно: в **среднеквадратических значениях синусоидального напряжения**.

Дадим пояснение. Соберём схему из эталонного генератора и трёх электронных вольтметров с разными детекторами (рисунок 4.П3). С помощью переключателя на генераторе будем последовательно формировать *эталонные значения\*)* **синусоидальных напряжений: 1 В, 2 В, 3 В, 4 В, 5 В и 6 В**. Это среднеквадратические значения синусоидальных напряжений – так принято градуировать шкалы генераторов.

Напоминаем, что эталонными считаются напряжения заведомо большей точности, чем точность проверяемых вольтметров. Критерий – *не менее, чем в три раза более точные*.

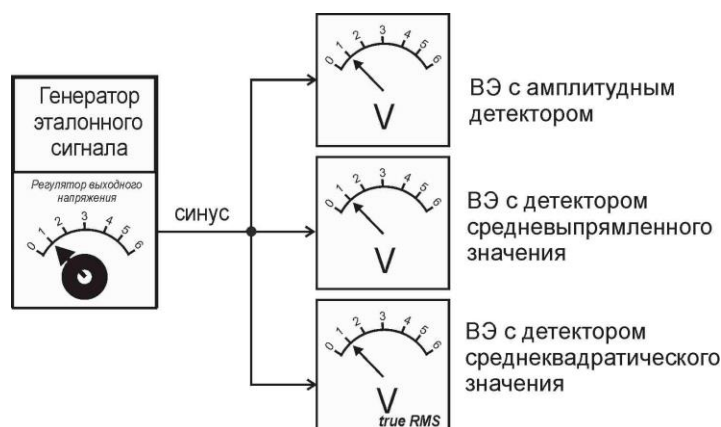


Рисунок 4.П3 – Схема градуировки электронных вольтметров

Без учёта погрешности измерения стрелки на шкалах подключённых вольтметров будут повторять формируемые генератором значения напряжений. Другими словами, независимо от вида реализованного детектора, все вольтметры будут показывать одно и тоже значение – среднеквадратическое значение поданного напряжения.

Проградуированные таким образом вольтметры могут использоваться для измерения **синусоидальных** напряжений на равных условиях. Их показания будут различаться только в соответствии с классами точности.

Однако, если мы будем измерять переменные напряжения, имеющие другие формы временн**ых** зависимостей (прямоугольные, треугольные, искажённая синусоида и т.п.), то показания рассмотренных выше вольтметров будут расходиться, т.к. в соответствии с рассмотренными особенностями применённых детекторов стрелки приборов будут отслеживать соответственно: амплитуду, средневыпрямленное или среднеквадратическое значение измеряемого напряжения соответственно. Для несинусоидального напряжения рассматриваемые параметры могут существенно различаться.

Важный вывод заключается в том, что если мы не знаем форму кривой измеряемого напряжения, то во избежании дополнительной ошибки, должны использовать вольтметры со среднеквадратическим детектором – он будет измерять всегда правильно!