

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

КАФЕДРА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

весна 2020 г.

П.К.МАКАРЫЧЕВ, Н.А.СЕРОВ, А.Н.СЕРОВ, А.А.ЛУПАЧЁВ,
С.И. ГЕРАСИМОВ

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Лабораторная работа № 1.20 (курс ИИТ для ИЭЭ)

Методическое пособие

по курсам

«Метрология, стандартизация и сертификация»,
«Информационно-измерительная техника»

для студентов, обучающихся по направлениям «Электроэнергетика»,
«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»,
«Информатика и вычислительная техника»

ВВЕДЕНИЕ

Измерения напряжений являются наиболее часто встречающимися в практике проведения измерений. Эти измерения осуществляются с помощью вольтметров, мультиметров, потенциометров. В том случае, когда метрологические требования к измерениям невысокие также для этих целей используют осциллограф (лабораторная работа №6).

В ряде практических случаев напряжение может быть измерено *косвенным методом*.

Объектами измерений могут выступать источники напряжений различных видов (приложение Б):

- напряжения постоянного тока (*DC*);
- напряжения переменного тока (*AC*):
 - гармонические (синусоидальные);
 - полигармонические (ПГН);
 - гармонические/ полигармонические с постоянной составляющей (*AC+DC*).

Цели данной работы:

- научиться выбирать вольтметры для инженерных экспериментов;
- научиться измерять электрическое напряжение с минимальными погрешностями.

Рекомендуемое время на изучение – **3 часа**.

Примечание – Обращать особое внимание при изучении на элементы текста, выделенные *наклонным шрифтом*. Это термины, которые необходимо знать и профессионально использовать. Перечень актуальных терминов представлен в приложении В.

1 СОСТАВ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

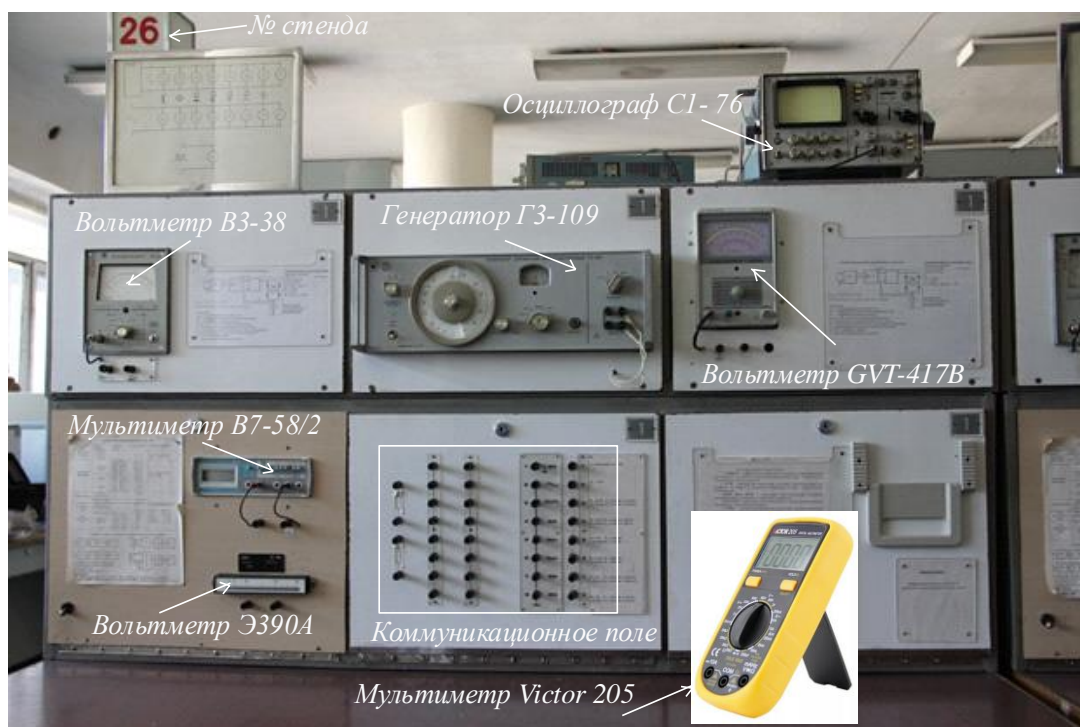


Рисунок 1.1 – Внешний вид стенда

1.1 Изучаемые измерители напряжений

1.1.1 Электромагнитный вольтметр, щитовой узкопрофильный однопредельный со световым отсчётом Э390А // СССР, г. Краснодар «ЗИП»,

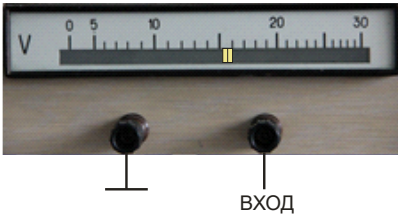
	Актуальные характеристики	
	Измеряемая величина	СКЗ узкополосного напряжения
	Предел измерений, В	30
	Класс точности, $\gamma_{0,п}$	1,0
	Цена деления, q , В	1,0
	Температурный коэффициент влияния, k_{Θ} , В/°С	$\Delta_{оп}/10$
	Номинальная частота измеряемого напряжения, $f_{ном}$, Гц	50
	Диапазон рабочих значений частот, $\Delta F_{раб}$, Гц	нет сведений
	Входное сопротивление, R_V , кОм	нет сведений
	Входная ёмкость, C_V , макс, пФ	нет сведений

Рисунок 1.2 – Графическое описание вольтметра Э390А


Дополнительная техническая информация.

Электромагнитные вольтметры (ВЭ) относятся к группе *электромеханических измерительных приборов*. Принцип действия и устройство в приложении Г.

В соответствии с физическим принципом действия стрелка ВЭ отклоняется пропорционально *среднеквадратическому значению напряжения* (СКЗ; действующее). В современной практике приборы используются для измерений только синусоидальных напряжений в узком диапазоне частот с номиналом 50 Гц или 400 Гц.

Область применения приборов – промышленная электроэнергетика, электросети, электротранспорт.

1.1.2 Милливольтметр электронный переносной многопредельный ВЗ-38 // Пунане-Рэт (выпускался до 1990 г. в г. Таллин, Эстонская ССР)

	Актуальные характеристики	
	Измеряемая величина	СКЗ синусоидального напряжения
	Тип встроенного преобразователя переменного напряжения в постоянное	средневыпрямленного значения
	Пределы измерений, $U_k =$	1, 3, 10, 30, 100 мВ; 1, 3, 10, 30, 100 (300) В
	Класс точности для пределов 1 мВ; 3, ..., 300 В	4,0
	Класс точности для пределов 3, ..., 300 мВ; 1 В	2,5
	Диапазон нормальных значений температур, $\Delta\Theta_{ном}$, °С	20±5
	Диапазон рабочих значений температур, $\Delta\Theta_{раб}$, °С	0...45
	Температурный коэффициент влияния k_{Θ} , В/°С	$\Delta_{оп}/10$
	Диапазон нормальных значений частот, $\Delta F_{ном}$, Гц	45...10 ⁶
	Диапазон рабочих значений частот, $\Delta F_{раб}$, Гц	20... 5×10 ⁶
	Входное сопротивление, R_V , кОм	4000±10%

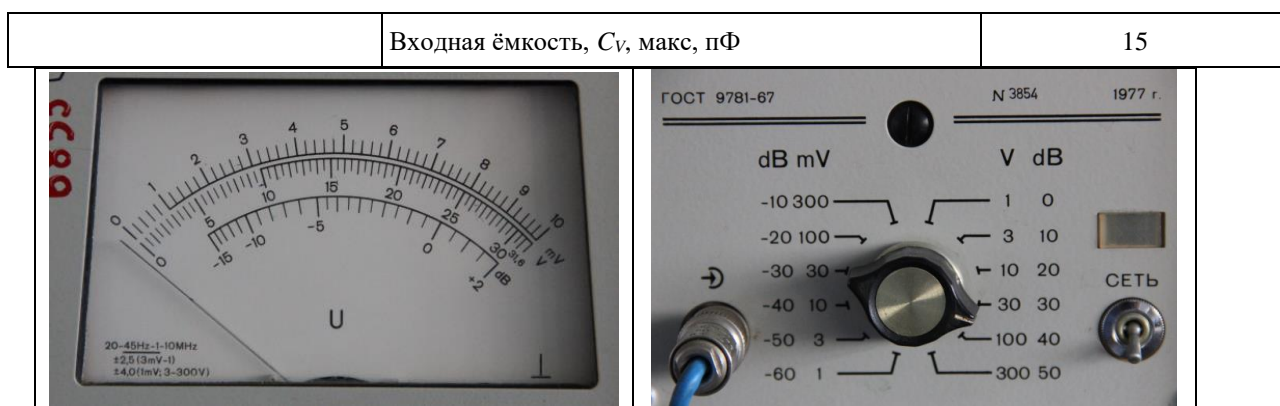


Рисунок 1.3 – Графическое описание вольтметра ВЗ-38

Дополнительная техническая информация.

Вольтметр содержит в структуре *преобразователь средневыпрямленного значения* и предназначен для измерений синусоидальных напряжений (см. приложение В). Использование для измерений *полигармонических напряжений* (ПГН) требует дополнительных обоснований.

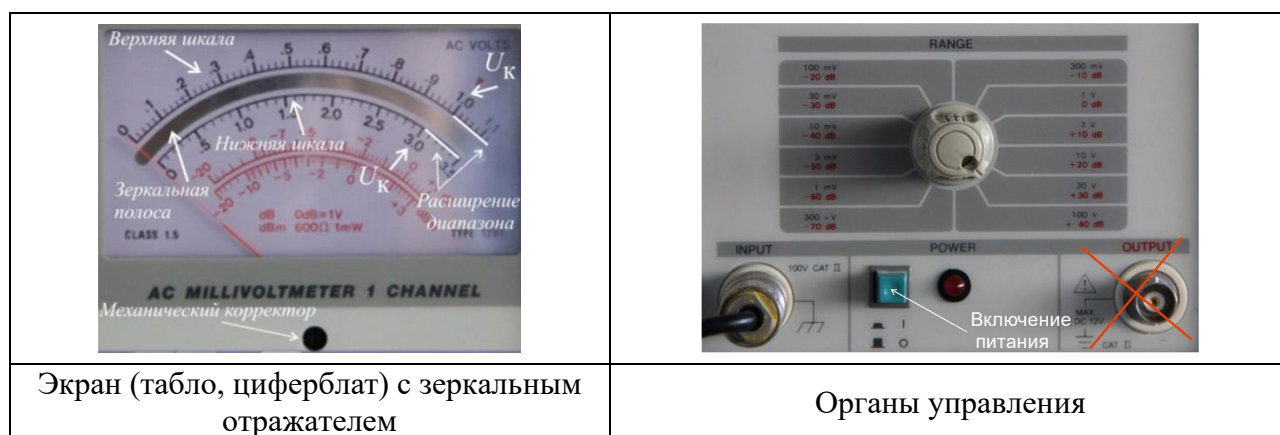
Особенности:

- не позволяет измерять напряжения постоянного тока;
- высокое входное сопротивление;
- большое число пределов измерений;
- широкий частотный диапазон;
- невысокая инструментальная точность измерений;
- питание от электрической сети 220 В / 50 Гц.

Область применения приборов – учебные и исследовательские лаборатории.

1.1.3 Милливольтметр электронный переносной многопредельный Gwinstek GVT-417B // Тайвань

Измеряемая величина	Актуальные характеристики	
	Измеряемая величина	СКЗ синусоидального напряжения;
Тип встроенного преобразователя переменного напряжения в постоянное	средневыпрямленного значения	
Пределы измерений, $U_k =$	300 мкВ; 1, 3, 10, 30, 100 мВ; 1, 3, 10, 30, 100 В	
Класс точности	1,5	
Диапазон нормальных значений температур, $\Delta\Theta_{\text{норм}}$, °C	не задан	
Диапазон рабочих значений температур, $\Delta\Theta_{\text{раб}}$, /°C	0...45	
Температурный коэффициент влияния k_Θ , В/°C	не задан	
Диапазон нормальных значений частот, $\Delta F_{\text{норм}}$, Гц	не задан	
Диапазон рабочих значений частот, $\Delta F_{\text{раб}}$, Гц	10...10 ⁶	
Входное сопротивление, R_V , кОм	1000±10%	
Входная ёмкость, C_V , макс, пФ	50	

Рисунок 1.4 – Графическое описание вольтметра *Gwinstek GVT-417B***Дополнительная техническая информация.**

Вольтметр содержит в структуре *преобразователь средневыпрямленного значения* и предназначен для измерений синусоидальных напряжений (см. приложение В). Использование для измерений *полигармонических напряжений* (ПГН) требует дополнительных обоснований.

Особенности в сравнении с ВЗ-38:

- шкала прибора имеет зеркальную полосу, повторяющую изгиб шкалы. Отражение стрелки в зеркале позволяет исключить *погрешность параллакса*, допускаемую субъектом при отсчёте результата;
- более высокая точность измерения;
- для вольтметра не установлен расширенный диапазон частот.

В настоящей работе используется как современная альтернатива вольтметрам ВЗ-38/39.

1.1.4 Мультиметр переносной Белвар В7-58/2 // Белоруссия

	Актуальные характеристики	
	Измеряемые величины	U, u, I, i, R
	Измеряемое напряжение переменного тока	СКЗ <i>полигармонического</i> напряжения
	Пределы измерений, U_K	200 мВ; 2, 20, 200, 700 В
	Класс точности во всём диапазоне раб. температур, c/d	0,6/0,1
	Коэффициент амплитуды, $k_{a.макс}$	3
	Диапазон <i>рабочих значений</i> частот, $\Delta F_{раб}$, Гц	20...100 000
	Диапазон <i>нормальных значений</i> температур, $\Delta \Theta_{норм}$, °C	+15...+25
	Диапазон <i>рабочих значений</i> температур, $\Delta \Theta_{раб}$, °C	+5...+40
	Температурный коэффициент влияния k_{Θ} , В/°C	$\Delta_{o.п.}/10$
	Входное сопротивление, R_V , кОм	10000±10%
	Входная ёмкость, C_V , макс, пФ	не задаётся
	Длина шкалы (максимальное отображаемое число)	1999

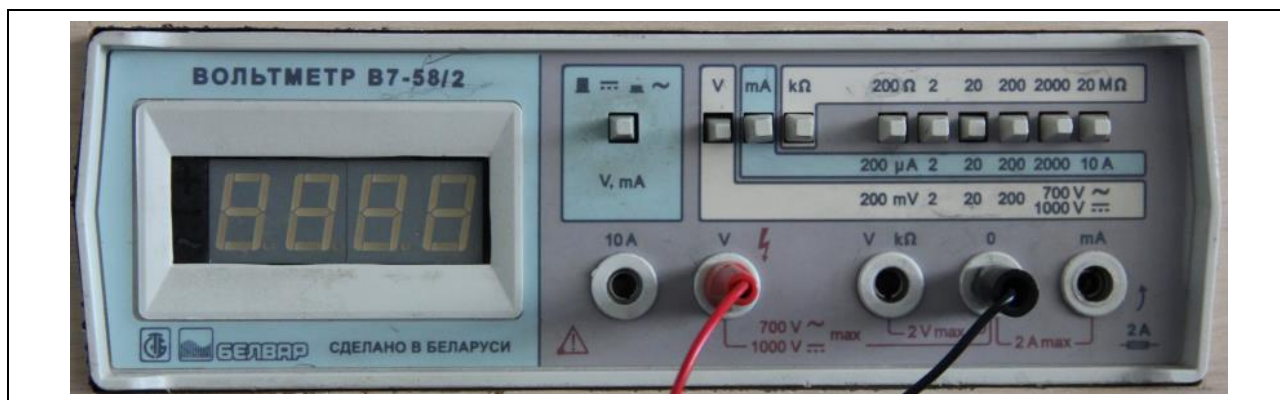


Рисунок 1.5 – Графическое описание мультиметра В7-58/2

Дополнительная техническая информация.

Цифровой многофункциональный прибор (мультиметр) с типовым набором функций: измерение U , u , I , i , R .

Мультиметр содержит в структуре преобразователь *среднеквадратического значения* (СКЗ) и предназначен для измерений как синусоидальных, так и полигармонических напряжений (см. приложение В). Последнее справедливо, если **актуальный спектр** измеряемого напряжения не выходит за пределы *рабочего диапазона частот*, а *коэффициент амплитуды* (k_a) не превышает допустимое (паспортное) значение.

Особенности мультиметра:

- позволяет измерять напряжение постоянного и переменного тока;
- допускает измерение ПГН;
- не предусмотрен *расширенный диапазон частот*;
- имеет отдельный вход (!) для напряжений ≥ 20 В;
- выбор пределов измерений – только ручной;
- высокая точность измерений.

На занятии прибор используется как **условно эталонное СИ**.

Примечание – **Эталонным** принято считать СИ, которое не менее чем в три раза измеряет точнее, что в настоящей работе выполняется не всегда. Будем считать этот мультиметр за неимением более точных «условно эталонным».

1.1.5 Мультиметр портативный Victor 205 // Китай (континентальный)

Актуальные характеристики		
Измеряемые величины		U , u , I , i , R , C , F
Измеряемое напряжение переменного тока		СКЗ <i>полигармонического</i> напряжения
Пределы измерений напряжений переменного тока, U_k , В		2, 200, 600
Характеристика точности (на пределе 200 В), δ/n		0,8% // $5 \cdot q$ *
Единица младшего разряда (квант) на пределе 200 В, q_{200} , мВ		10
Диапазон нормальных значений температур $\Delta\Theta_{\text{норм.}}$, °С		не задаётся
Диапазон рабочих значений температур, $\Delta\Theta_{\text{раб.}}$, °С		0...+40
Температурный коэффициент влияния, k_Θ , В/°С		не задаётся
Коэффициент амплитуды, $k_{a.\text{макс}}$		не задаётся
Диапазон рабочих значений частот, $\Delta f_{\text{раб.1}}$, Гц (синус, треугольник)		40...1000
Диапазон рабочих значений частот, $\Delta f_{\text{раб.2}}$, Гц (другие)		40...200

	формы)	
	Входное сопротивление, R_V , МОм	10
	Входная ёмкость, C_V , макс, пФ	не задаётся
	Длина шкалы (максимальное отображаемое число)	1999
	Тип используемых батарей	2×AAA
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>		
Дисплей с кнопками включения питания и удержания результата измерения		Переключатель диапазонов и выбора функции измерения. Входные гнезда

Рисунок 1.6 – Графическое описание мультиметра Victor 205

Примечание – Прибор цифровой, зарубежный, точностная характеристика, указанная в таблице-рисунке символически 0,8//5, в оригинальной технической документации выглядит так: **0,8 % of reading + 5 counts of least significant digit**. Или кратко: 0,8% $R+5d$. Или ещё более кратко: 0,8%+5. В переводе это означает: 0,8% от считанного с дисплея значения + 5 единиц младшего разряда (q , квантов). При расчётах эти сведения необходимо использовать так: $\Delta_{\Pi} = \pm (\Delta_{\Pi 1} + \Delta_{\Pi 2}) = \pm (0,8 \frac{U}{100} + 5 \cdot q)$. В том случае, если для прибора установлен нормальный диапазон температур – обычно так делают для высококачественных измерителей, следует использовать выражение $\Delta_{o,\Pi} = \pm (\Delta_{o,\Pi 1} + \Delta_{o,\Pi 2})$.

Выражение 0,8//5 мы применили как краткую запись, стилизованную под советские традиции.

Дополнительная техническая информация.

Цифровой многофункциональный прибор с расширенным набором функций: измеряется ёмкость конденсатора и частота сигнала (напряжение, ток).

Мультиметр содержит в структуре преобразователь СКЗ и предназначен для измерений как синусоидальных, так и ПГН (см. приложение В). Однако это справедливо, если **актуальный спектр** измеряемого напряжения не выходит за пределы *рабочего диапазона частот*, а *коэффициент амплитуды* (k_a) не превышает допустимое (паспортное) значение.

Особенности мультиметра:

- позволяет измерять напряжение постоянного и переменного тока;
- не установлен расширенный диапазон частот;
- не указано максимальное значение коэффициента амплитуды (k_a);
- малое число актуальных пределов для переменных (АС) сигналов;
- не указано значение входной ёмкости;
- высокая *категория защиты входов*: CAT III, 600 В;
- выбор пределов измерений – только ручной;
- питание батарейное с автоотключением.

1.2 Вспомогательное оборудование

1.2.1 Средства измерений (СИ)


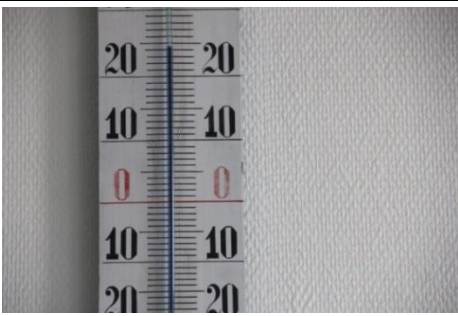




	
<p>Электронно-лучевой осциллограф С1-76</p>	<p>Настенный термометр</p>
 <p>Диапазон воспроизводимых сопротивлений 0...999999 Ом; кл. точности 0,2</p>	 <p>$R_{\text{ном}} = 1 \text{ Ом}$; кл. точности 0,01, $I_{\text{ном}} = 320 \text{ мА}$</p>
<p>Магазин сопротивлений Р33 // СССР, г. Краснодар «ЗИП»</p>	<p>Эталонный резистор с четырёхпроводным подключением Р321 // СССР, г. Краснодар «ЗИП»</p>
	
<p>Варианты используемых в работе микроамперметров</p>	<p>Микроамперметр М265М (необходимые характеристики – по фотографии)</p>

Рисунок 1.7 – Внешний вид вспомогательных СИ

Назначение представленных на рисунке 1.7 средств измерений:

- осциллограф используется для контроля формы измеряемого напряжения и измерений низкой точности параметров ПГН;
- термометр используется при расчёте *температурной составляющей инструментальных погрешностей*;
- многозначная мера электрического сопротивления – магазин сопротивлений – в работе используется для моделирования *добавочного сопротивления* к микроамперметру;
- однозначная мера электрического сопротивления Р331 используется в схемах косвенного измерения напряжения;

- микроамперметры используются для создания на их базе вольтметров постоянного или переменного тока.

1.2.2 Генератор синусоидального напряжения ГЗ-109

В работе используется как источник синусоидального напряжения с регулируемой частотой и напряжением. Частота регулируется в четырёх поддиапазонах. Требования к точности устанавливаемой частоты в работе не предъявляются.

Примечание – Важная неприятная **особенность** генератора, которую необходимо учитывать в экспериментах: при изменении частоты выходное напряжение может также меняться, поэтому после каждого изменения частоты требуется корректировать выходное напряжение.

Значение устанавливаемого на выходе напряжения контролируется в работе внешним эталонным СИ – мультиметром В7-58/2.



Рисунок 1.8 – Графическое описание генератора синусоидальных напряжений ГЗ-109

1.2.3 Полупроводниковые диоды

Используются в работе как объект измерений для мультиметров. Измеряется прямое падение напряжения.

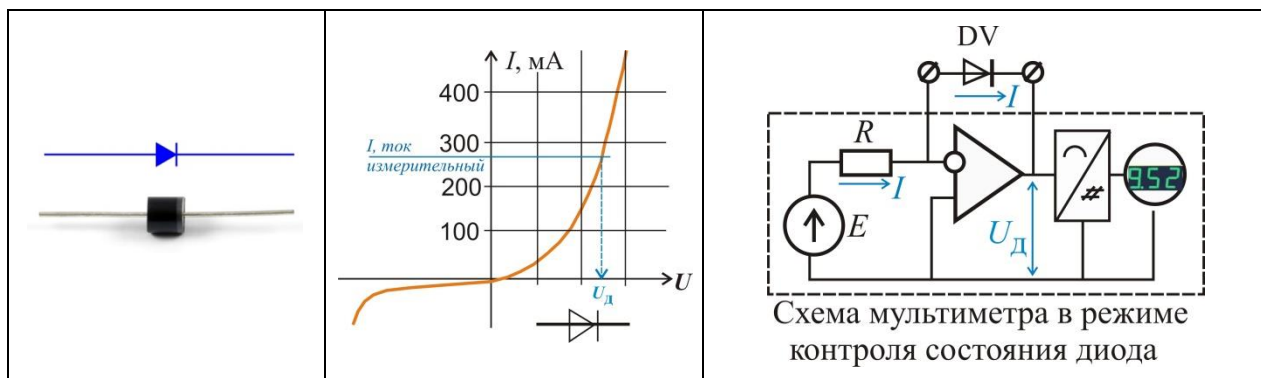


Рисунок 1.9 – Фотография, условно-графическое обозначение (УГО) и вольтамперная характеристика (ВАХ) диода, схема измерения U_d

1.3 Вспомогательные элементы стенда

1.3.1 Кросс-панели стенда

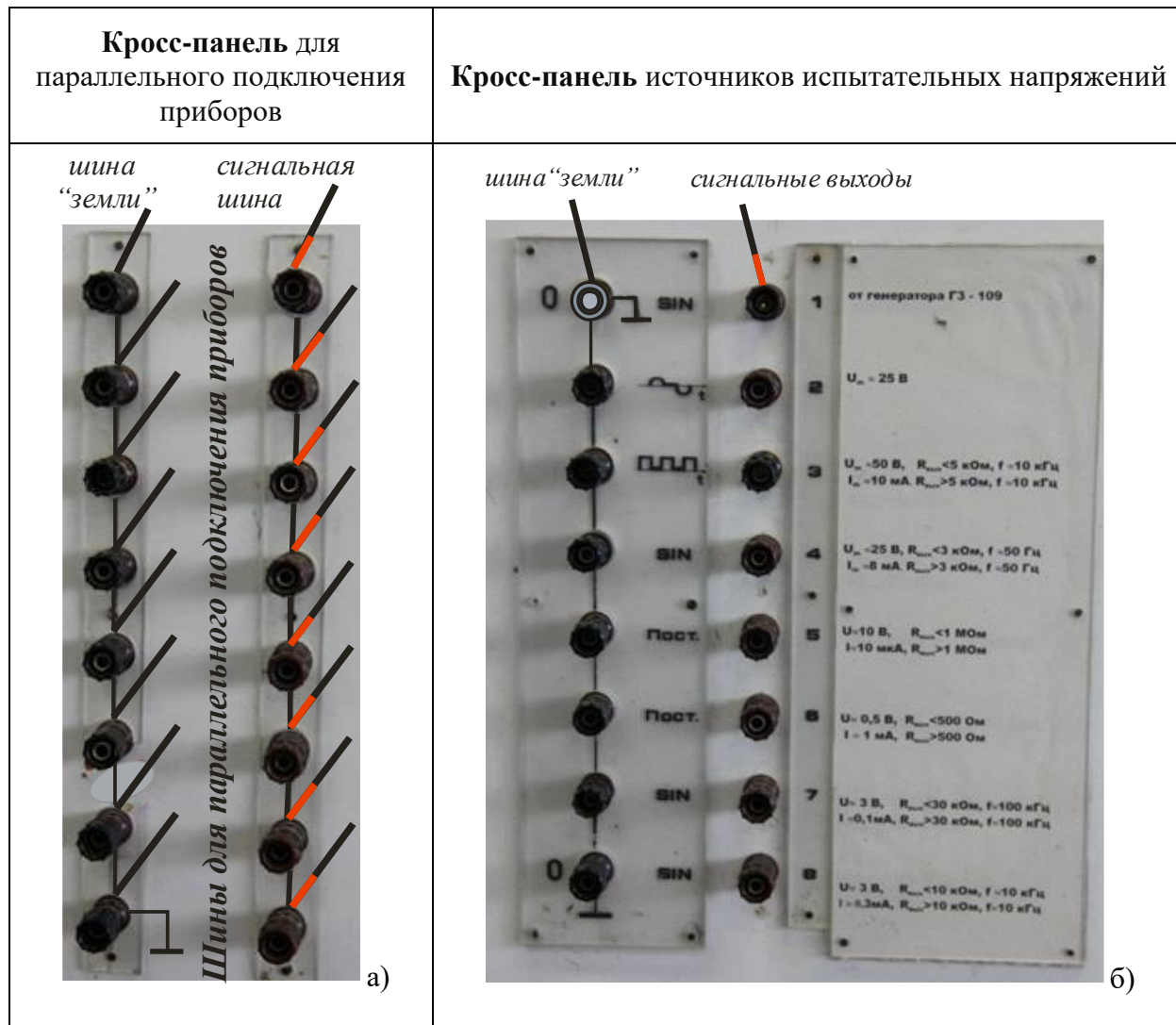


Рисунок 1.10 – Внешний вид кросс-панелей, расположенных на стенде

Подключение приборов к источнику сигнала (или шинам) осуществляется в соответствии с маркировкой: один из входов у приборов промаркирован как «земля» (\perp), другой – как *сигнальный вход*.

Примечание – Входы вольтметра Э390 равнозначные.

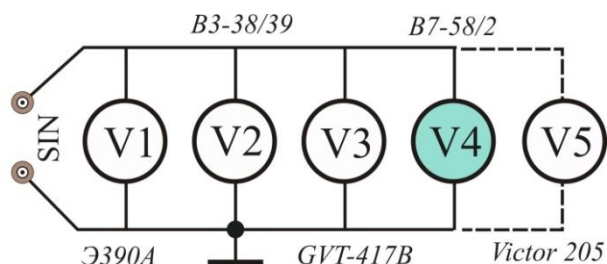


Рисунок 1.11 – Типовая схема подключения вольтметров к кросс-панели

1.3.2 Набор проводов

Для подключения приборов стенд комплектуется набором проводов (шнуров) разной длины: 5 проводов с чёрными маркерами концов (для подключений к «земле») и 5 проводов с красными маркерами концов (для подключений сигналов).

	
Комплект проводов для подключений приборов	Рекомендуемый способ подключения проводов к клеммам

Рисунок 1.12 – Набор проводов и рекомендуемый способ их подключения к клеммам

2 ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

2.1 Прямые измерения напряжений

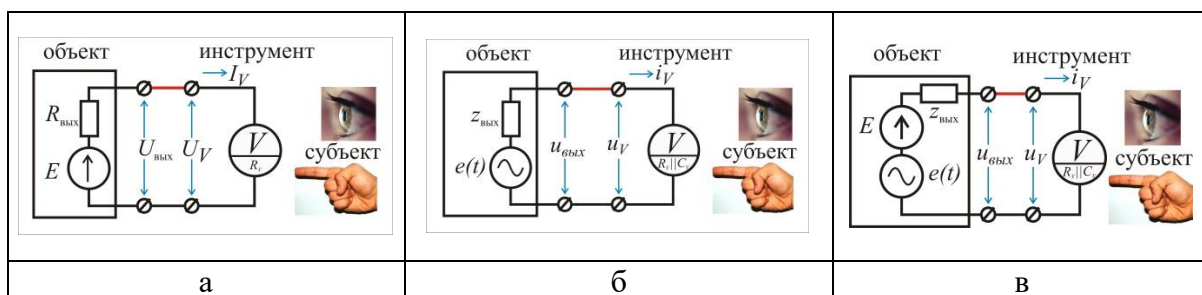


Рисунок 2.1 – Эквивалентные схемы для прямых измерений напряжений

На рисунке 2.1 представлены три варианта эквивалентных схем для *прямых измерений* напряжений:

- вариант измерения напряжений постоянного тока (рисунок 2.1а);
- вариант измерения напряжений переменного тока (рисунок 2.1б);
- вариант измерения напряжений переменного тока с постоянной составляющей (рисунок 2.1в).

На схемах указаны параметры объектов и приборов, которые используются для расчётов *погрешности взаимодействия* $\Delta_{вз}$.

При выборе вольтметра следует в первую очередь убедиться в способности прибора измерять напряжение соответствующего рода: напряжений постоянного и/или переменного тока.

Следует иметь в виду, что подавляющее большинство серийных приборов, способных измерять переменные напряжения, предназначены для измерений в цепях/сетях **только синусоидальных напряжений**.

Особенно тщательно необходимо выбирать прибор для измерений ПГН. Заявляемая производителями способность прибора измерять *«истинные» среднеквадратические значения («TrueRMS»)* ограничена шириной частотного диапазона прибора ($f_{\min} \dots f_{\max}$) и предельном значением коэффициента амплитуды (k_a).

2.2 Типовой алгоритм выбора вольтметра

Выбор вольтметра для проведения эксперимента рекомендуется выполнять в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) вид измеряемого напряжения: *DC, AC, AC или DC, AC+DC* (переменное напряжение с постоянной составляющей);
 - 2) форма отображения результата: аналоговая, цифровая, графическая;
 - 3) эксплуатационные варианты вольтметров:
 - лабораторного применения, для работы на выезде (полевые), для использования в жестких условиях окружающей среды и др.;
 - стендовые, носимые (портативные), переносные, щитовые (панельные, встраиваемые), устанавливаемые на *DIN*-рейку;
 - многофункциональные (авометры, мультиметры).
 - 4) форма измеряемого *AC*-напряжения: синусоидальная, ПГН;
 - 5) диапазоны измерений ΔU : ..., *милливольты, вольты*, ...;
 - 6) рабочий диапазон частот $\Delta F_{\text{раб}}$: $f_{\text{р.мин}} \dots f_{\text{р.макс}}$;
 - 7) нормальный диапазон частот $\Delta F_{\text{норм}}$: $f_{\text{н.мин}} \dots f_{\text{н.макс}}$
 - 8) предельное значение коэффициента амплитуды $k_{a.\text{макс}}$: 1,41...3,0...;
 - 9) точность. Будем различать:
 - низкая точность (приборы широкого применения): $\gamma > 1,0$;
 - высокая точность (приборы широкого применения): $\gamma = 0,5 \dots 1,0$;
 - высокая точность (исследовательские приборы): $\gamma < 0,5$
 - 10) количество измерительных каналов: одноканальные, многоканальные.
- Кроме того важно знать о вольтметрах дополнительно:
- наличие режима автовыбора предела (диапазона);
 - наличие функций регистрации (энергонезависимое хранение информации);
 - наличие функций удалённой передачи результатов измерений;
 - наличие и состав аксессуаров (дополнительных принадлежностей);
 - тип питания:
 - сетевое: *AC, DC*;
 - автономное: тип и количество батарей/аккумуляторов;
 - цена, масса, габаритные размеры, материал и цвет корпуса ...

Рекомендации.

В том случае, если у пользователя нет априорной информации об измеряемом переменном напряжении – форма, частота, диапазон изменений, динамика изменений – необходимо осуществлять предварительное изучение сигнала с помощью грубого измерителя – осциллографа. В противном случае показания вольтметра будет правильно считать всего лишь грубой *оценкой* измеряемых напряжений: *методические составляющие погрешности* результата могут существенно превышать *инструментальные*. В этой связи необходимо также предварительно оценивать выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ источника сигнала: *погрешность взаимодействия* $\delta_{\text{вз}}$ может достигать нескольких единиц...десятков процентов.

Предварительной оценкой точности цифрового вольтметра может служить **максимальное значение отображаемых результатов (длина шкалы)**: 999, 1999, 2999, (3200), 3999, 4999, 5999, 9999, ...: чем выше это значение, тем он точнее.

2.3 Косвенные измерения напряжений

Типовая пример *косвенного измерения* напряжения представлена на рисунке 2.2.

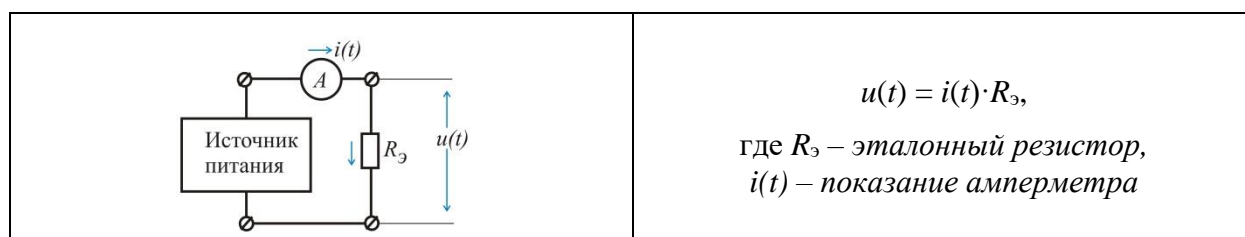


Рисунок 2.2 – Типовая схема для *косвенного измерения* напряжения

ЗАДАНИЯ

- 1 При подготовке к работе – ещё в домашних условиях – изучить описание лабораторной работы и все приложения к нему.
- 2 Ознакомиться со стендом визуально.
- 3 Изучить представленные на стенде вольтметры и др. вспомогательное оборудование: размещение на стенде, маркировки, назначение органов управления, особенности шкал, запомнить основные типовые характеристики.
- 4 Оценить экспериментально частотные характеристики вольтметра Э390А в диапазоне частот 40...100 Гц.
- 5 Экспериментально исследовать более детально поведение частотной характеристики мультиметра Victor 205 в области верхней границы его рабочего диапазона частот и затем аппроксимировать частотную характеристику прямыми отрезками, выделив *рабочий диапазон* частот, *переходный диапазон* частот, области частот метрологического игнорирования (рисунок 3.2б).
- Расчётным путём оценить погрешность формы $\Delta_{\text{ф.п.}}$, которую допустит мультиметр Victor 205 при измерении полигармонического сигнала. Форму сигнала задаёт преподаватель.
- 6 Экспериментально определить погрешности измерения милливольтметром ВЗ-38/39 в оцифрованных точках диапазона измерений 1...10 В. В качестве эталонного использовать мультиметр В7-58/2.

7 На зажимах **0-1**; ... , **0-10** (рисунок 1.10б), указанных преподавателем, измерить напряжение вольтметром, обеспечивающим наименьшую погрешность измерения. Записать результат измерения.

8 Измерить выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ источника сигнала. Объект задаёт преподаватель.

9 Измерить с помощью мультиметра *Victor 205* прямое падение напряжения на полупроводниковом диоде и **дать оценку** погрешности измерения.

10 Рассчитать добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$ к микроамперметру и проверить правильность расчёта экспериментально. Предел измерений напряжений U_k задаёт преподаватель.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Общие указания.

1) Полезно завести отдельную тетрадь, в которой вы заносите всю полезную (новую) для вас информацию по изучаемому курсу.

2) Необходимо помнить, что не существует идеальных приборов, поэтому при неправильном выборе исправный и точный прибор может дать показание, весьма далекое от действительного значения. Например:

- когда прибором измеряется сигнал такого вида, для которого он не предназначен;
- когда частота измеряемого сигнала находится за пределами рабочего частотного диапазона прибора;
- когда соотношение входного сопротивления прибора и выходного сопротивления источника сигнала таково, что подключение прибора существенно изменяет значение измеряемой величины на зажимах источника и т.п.;

3) При использовании *многопредельных приборов* обязательным является правильный выбор *пределов измерений*: он должен выбираться так, чтобы результат измерения находился как можно ближе к этому пределу.

Примечание – Прибор может быть выведен из строя, если на его вход подать напряжение, превышающее выбранный предел. Во избежание этого измерение необходимо начинать с **наибольшего** – менее чувствительного – предела и затем уменьшать его до тех пор, пока не будет выполнено заявленное требование.

4) Чем ближе частота полигармонического напряжения к граничной частоте прибора $f_{\text{макс}}$, тем больше измеряемое напряжение должно быть похоже на синусоидальное напряжение – в этом случае погрешность формы Δ_f (раздел 3.1.5) будет минимизирована. Полезно, таким образом, перед измерениями с помощью осциллографа изучить форму напряжения.

Указания по оформлению работы.

Выполнение работы сопровождается оформлением **протокола** (шаблон прилагается). Шаблон протокола распечатывается заранее и оформляется один на бригаду. По

окончании работы он подписывается преподавателем и **обязательно** предъявляться на защите. Протокол остаётся в распоряжении бригады.

Примечание – Некоторые из пунктов типового задания могут быть исключены по указанию преподавателя.

К защите работы оформляется **отчёт** (шаблон прилагается). Отчёт должен содержать **все пункты выполненных заданий**. Каждый пункт задания завершается выводами. **Шаблон** отчёта распечатывается, а заполняется вручную (!) каждым студентом бригады. Особое внимание при обработке результатов эксперимента необходимо обращать на оценку погрешностей полученных результатов, о метрологическом качестве выполненного эксперимента.

По завершении защиты отчёт сдаётся преподавателю.

Указания к выполнению пунктов задания.

Смотреть шаблоны протокола и отчёта.

Список вопросов для самоконтроля

- 1 Как называется лабораторная работа (ЛР)?
- 2 Какая цель выполнения работы?
- 3 Какие виды и типы СИ изучаются в работе?
- 4 Какими преимуществами и недостатками обладают изучаемые СИ?
- 5 Как устроены изучаемые СИ?
- 6 Перечислите актуальные характеристики изучаемых СИ.
- 7 Какими преимуществами обладают аналоговые СИ?
- 8 Какое назначение имеет в работе мультиметр В7-58/2?
- 9 Сравните характеристики представленных в работе мультиметров.
- 10 Какое назначение имеет зеркальная полоска в одном из электронном вольтметре?
- 11 По каким причинам в списке характеристик Э380А отсутствует рабочий диапазон частот?
- 12 Почему Э380А относят к разновидности *щитовых приборов*?
- 13 Что такое класс точности СИ? Пояснить примерами.
- 14 В чём особенность нормирования точностных характеристик современных цифровых приборов?
- 15 Показания каких электромеханических приборов пропорциональны постоянному или среднему значению сигнала?
- 16 Какая погрешность называется *основной*?
- 17 Как найти *основную погрешность*?
- 18 Какая погрешность называется *погрешностью взаимодействия*?
- 19 В каких случаях необходимо учитывать дополнительные погрешности? Привести пример.
- 20 Каков состав погрешности результата измерения?
- 21 Обосновать утверждение о том, что правильно измерять в конце шкалы прибора.

22 Попробуйте объяснить, по какой причине мультиметр В7-58/2 дороже мультиметра **Victor 205** в двадцать раз?

23 Рассчитать предел погрешности взаимодействия при измерении напряжения вольтметром с $R_V = 100$ кОм и выходном сопротивлении источника $R_{\text{вых}} = 2$ кОм, $U_V = 50$ В.

24 Используют вольтметр с *диапазоном измерений* 0 – 200 В, класс 0,5/0,2. Найти $\Delta_{\text{о.п}}$ и $\delta_{\text{о.п}}$ измерения $U = 100$ В?

25 Используют вольтметр с классом точности 0,5/0,2. Найти $\delta_{\text{о.п}}$ в конце шкалы?

26 Используют вольтметр с классом точности 0,5/0,2. Найти $\delta_{\text{о.п}}$ в середине шкалы?

27 Как рассчитать погрешность взаимодействия при измерении постоянных напряжений?

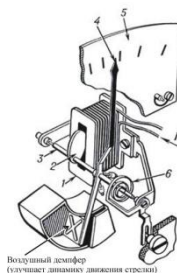
28 Что покажет вольтметр ВЗ-38, если на его вход подать напряжение типа меандр с амплитудой 1 В и частотой 1 кГц?

29 Запишите результат с использованием *дольных или кратных единиц* $4,7 \cdot 10^{-12}$ В

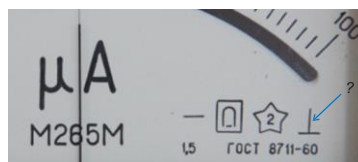
30 К какой группе (виду) погрешностей относится $\Delta_{\text{вз}}$?

31 В чём состоит ошибка в следующей записи результата измерения $(0,07 \pm 0,025)$ В;?

32 Что изображено на рисунке?



33 Что означают указанные на фотографии символы?



34 Типовые входные сопротивления цифровых вольтметров?

35 Частотная характеристика электронного вольтметра: 20 Гц...45 Гц...1 МГц...5 МГц. В каком случае в результате измерения следует учесть частотную погрешность $\Delta_{\text{ф.п}} = \Delta_{\text{о.п}}$?

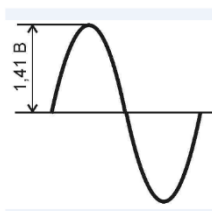
36 Основные преимущества *переносного электронного вольтметра ВЗ-38*?

37 Основные недостатки *портативного мультиметра Victor 205* как вольтметра?

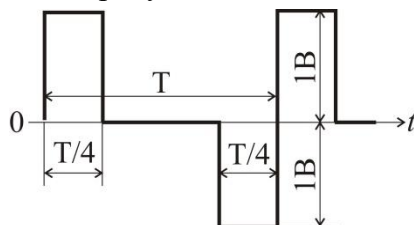
38 Известно о ВЗ-38: шкала проградуирована в СКЗ синусоидального напряжения и стрелка прибора поворачивается пропорционально ...?

39 *Инструментальная погрешность* может содержать следующие составляющие: ...

40 Что покажет вольтметр ВЗ-38, если его *инструментальной погрешностью* пренебречь (см. рисунок)?

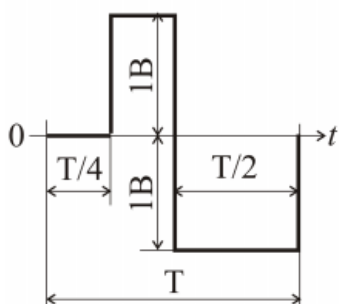


- 41 Какое значение покажет мультиметр В7-58/2, если на его вход подать напряжение, форма которого представлена на рисунке?



Инструментальной погрешностью пренебречь.

- 42 Какое значение покажет вольтметр В3-38, если на его вход подать напряжение, форма которого представлена на рисунке? Частота сигнала 10 кГц. Погрешностями $\Delta_{\text{инс}}$ и $\Delta_{\text{отс}}$ пренебречь.



Приложение А

РАСЧЁТ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ

А.1 Расчёт погрешностей прямых измерений

Принято различать **три группы** погрешностей результатов *прямых методов измерений* (рисунок А.1 и таблица А.1).

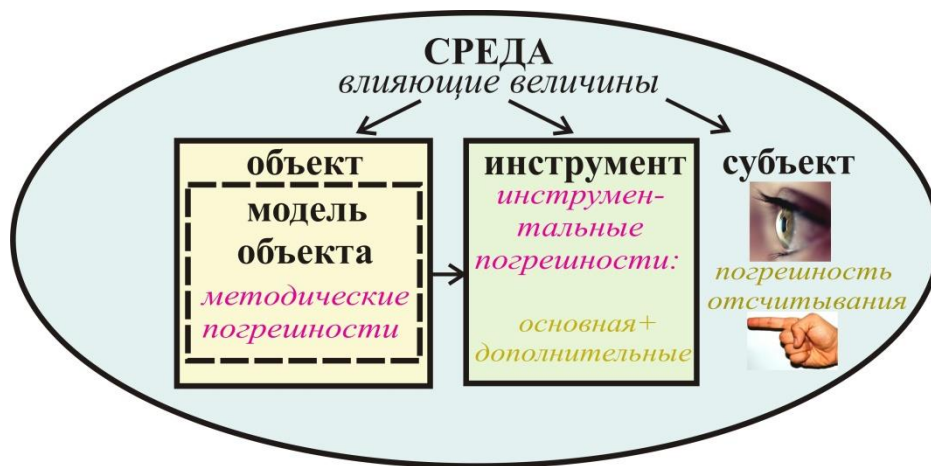
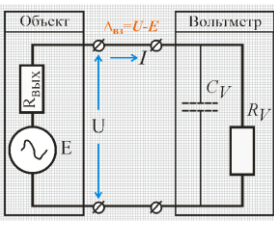


Рисунок А.1 – Структура источников погрешностей

Таблица А.1 – Виды погрешностей прямых методов измерений

1 ПОГРЕШНОСТИ, ДОПУСКАЕМЫЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ (СУБЪЕКТОМ)		<p>Погрешность отсчитывания предельная: $\Delta_{\text{отс.п}} \approx \Delta_{\text{окр.п}} \times q = \pm 0,125 \times q$, где: $\Delta_{\text{окр.п}}$ – предельное значение погрешности округления в делениях*, q – цена деления в вольтах/дел.</p> <p>Примечание – Рассмотрен пример, когда отсчёт по шкале проведён с округлением до четверти наименьшего деления</p>
2 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ: погрешности, вызванные метрологической неидеальностью прибора		<p>Основная предельная:</p> <ul style="list-style-type: none"> - для аналоговых вольтметров, имеющих кл.т. $[\gamma_{\text{о.п.}}] \rightarrow \Delta_{\text{о.п}} = \pm \gamma_{\text{о.п.}} \cdot U_{\text{к}} / 100\%$; - для цифровых отечественных вольтметров, имеющих кл.т. $c/d \rightarrow \delta_{\text{о.п}} = \pm [c + d(\frac{U_{\text{к}}}{U} - 1)]$, %; - для цифровых зарубежных приборов, имеющих кл.т. $\delta_{\text{о.п.}} // n \rightarrow \Delta_{\text{о.п}} = \pm [(\delta_{\text{о.п.}} \cdot \frac{U}{100\%} + n \cdot q)]$, где n – целое число, q – квант, единица младшего разряда (ЕМР). <p>Дополнительные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - температурная $\Delta_{\Theta} = k_{\Theta} \cdot \Delta\Theta$, где: k_{Θ} – температурный коэффициент влияния В/°С, $\Delta\Theta$ – разность между температурой среды $\Theta_{\text{ср}}$ и ближайшим значением диапазона нормальных значений температур (см. п.3.1.3.1); - другие дополнительные в расчётах игнорируются

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ: погрешности, обусловлены неточностью выбранной модели объекта. При этом измеряется <i>не совсем то, что требуется</i> субъекту.	Погрешность от формы Δ_f. Может возникать при измерении <i>полигармонических напряжений</i> (подробности см. приложение Г)
	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 1; padding-left: 10px;"> Погрешность взаимодействия: - при измерении постоянного напряжения: $\Delta_{вз} = -U \cdot R_{вых} / R_V$, где $R_{вых}$ – вых. сопротивление источника сигнала, R_V – вх. сопротивление вольтметра - при измерении переменного напряжения: $\Delta_{вз} \approx -U [(R_{вых}/R_V) + 0,5\omega^2 R_{вых}^2 C_V^2]$, где ω – круговая частота измеряемого напряжения; C_V – вх. (паразитная) ёмкость прибора*. Примечание – Для типовых расчётов $Z_{вых} \equiv R_{вых}$ </div> </div>
	Погрешность частотная: предельное значение $\Delta_{f,п} = \Delta_{o,п}$. Примечания 1 Частотная погрешность учитывается, если частота сигнала входит в <i>расширенный частотный диапазон прибора</i> ; 2 Не рассматривается, если расширенный диапазон частот не заявлен для прибора

Типовой состав предельного значения погрешности результата измерений, рассчитываемой *методом наихудшего случая* (МНС):

$$\Delta_{п} = \Delta_{отс.п} + \Delta_{инс.п} + \Delta_{м.п} = \Delta_{отс.п} + (\Delta_{o,п} + \Delta_{\phi,п} + 0) + (\Delta_{f,п} + \Delta_{вз,п} + \Delta_{\phi,п} + 0) \quad (A.1)$$

Напоминание – Важно помнить, что рассчитываемые значения составляющих $\Delta_{п}$ погрешностей должны иметь два или более значащих разряда, а окончательное значение $\Delta_{п}$ всегда округляется **до двух значащих разрядов**.

Примеры погрешностей результата, записанных правильно – с двумя значащими разрядами: 42 В, 4,2 В; 0,42 В; **0,042 В; 0,0042 В**; 42 мВ; 4,2 мВ; 10 В; 1,0 В; 0,10 В; **0,010 В; 0,0010 В**, 10 мВ; 1,0 мВ, ...

A.1.1 Расчёт предельного значения погрешности отсчитывания $\Delta_{отс.п}$

На рисунке А.1 в сильно увеличенном виде показано одно деление шкалы, т.е. расстояние между соседними метками на шкале. Рекомендуется мысленно разделить деление ещё на четыре равные части с таким расчётом, чтобы результат измерения можно было отсчитать с округлением до четверти деления, например, до: $0,25 \times q$, $0,50 \times q$ или $0,75 \times q$. Где q – цена деления шкалы.

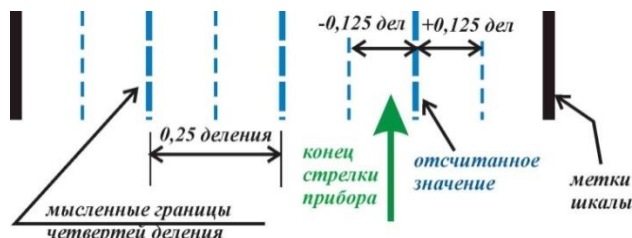


Рисунок А.1 – Иллюстрация процедуры считывания результата измерения по аналоговой шкале

При этом погрешность округления не превышает $\Delta_{отс,п} = \pm 0,125 \times q$. Например, для $q = 1,0$ В/дел погрешность отсчитывания $\Delta_{отс,п} = \pm 0,125 \text{ дел} \times 1,0 \text{ В/дел} = \pm 0,125 \text{ В}$ (промежуточное значение погрешности может содержать три значащие цифры!).

3.1.1 Расчёт предельного значения основной погрешности $\Delta_{o.п}$

Основная погрешность Δ_o – это погрешность, допускаемая прибором в *нормальных условиях эксплуатации*.

Рекомендация – В этих условиях проводится метрологическая настройка средств измерений (поверка/калибровка), назначаются метрологические характеристики.

Предельное значение $\Delta_{o.п}$ рассчитывается на основании известных метрологических характеристик прибора, обычно, классов точности.

3.1.1.1 Расчёт $\Delta_{o.п}$ для аналоговых приборов.

Пусть класс точности прибора 1,5 и конечное значение шкалы прибора $U_k=30$ В:

$$\gamma_{o.п} = \frac{\Delta_{o.п}}{U_k} 100\% = \pm 1,5\% \rightarrow$$

$$\Delta_{o.п} = \gamma_{o.п} U_k / 100 = 1,5 \cdot 30 / 100 = \pm 0,45 \text{ В}$$

3.1.1.2 Расчёт $\Delta_{o.п}$ для цифровых приборов, советского производства.

Пусть класс точности прибора (1,5/1,0), конечное значение шкалы прибора $U_k=30$ В и измеренное значение 24,51 В:

$$\delta_{o.п} \approx \frac{\Delta_{o.п}}{U} 100\% = \pm [1,5 + 1,0 \cdot (\frac{U_k}{U} - 1)], \%., \rightarrow$$

$$\Delta_{o.п} \approx \pm U \cdot [1,5 + 1,0 \cdot (\frac{U_k}{U} - 1)] / 100 \% = \pm 0,42 \text{ В}$$

3.1.1.3 Расчёт $\Delta_{o.п}$ для зарубежных цифровых приборов

Пусть известны: метрологическая характеристика вольтметра 0,4//2 и измеренное значение напряжения $U=34,71$ В.

Рассчитаем $\Delta_{o.п} = \pm (\Delta_{o.п1} + \Delta_{o.п2})$:

- 1) $0,4//2 \rightarrow 0,4\% // 2q$, тогда $\Delta_{o.п1} = (0,4 \times 34,71) / 100 = 0,004 \cdot 34,71 \text{ В} = 0,1388 \text{ В}$,
- 2) $\Delta_{o.п2} = 2 \times q = 2 \times 10 \text{ мВ} = 20 \text{ мВ} = 0,020 \text{ В}$.

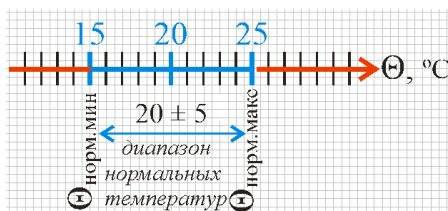
Тогда $\Delta_{o.п} = \pm (\Delta_{o.п1} + \Delta_{o.п2}) = 0,1388 + 0,020 = 0,1588 \text{ В} \approx \pm 0,16 \text{ В}$.

Примечание – Здесь символом q обозначена *единица младшего разряда (ЕМР)* цифрового прибора или *квант* измерительной шкалы (q).

3.1.2 Расчёт дополнительных погрешностей*

3.1.2.1 Расчёт температурной погрешности $\Delta_{\theta.п}$.

Пусть рассчитана $\Delta_{o.п} = \pm 0,16 \text{ В}$ и известны: температура окружающей среды $\Theta_{ср} = 28 \text{ }^\circ\text{С}$, температурный коэффициент влияния $k_\theta = 0,5 \cdot \Delta_{o.п} / 10$, а также диапазон нормальных температур для выбранного вольтметра $\Delta\Theta_{норм} = \Theta_{норм.мин} \dots \Theta_{норм.макс} = (20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{С}$: $\Delta_{доп.\theta.п} = k_\theta \times \Delta\Theta_{макс} = k_\theta |\Theta_{норм.макс} - \Theta_{ср.}| = 0,5 \Delta_{o.п} |28 - (20 + 5)| / 10 = 0,5 \cdot 0,16 \cdot 3 / 10 = \pm 0,024 \text{ В}$.



Примечание – Температурная погрешность рассчитывается в тех случаях, когда температура среды заметно отличается от нормальной: летом в жару, зимой на улице в холод. Влияние другие параметров среды учитывается в особых, обоснованных случаях.

3.1.2.2 Расчёт частотной погрешности $\Delta_{f.п.}$

В том случае, если частота измеряемого напряжения входит в *расширенный диапазон частот* вольтметра (см. рис. ниже), необходимо учесть *частотную погрешность*, которая типовым образом нормируется как $\Delta_{f.п.} = \Delta_{o.п.}$.

Примечание



Рисунок – Области частотной характеристики вольтметров

3.1.3 Расчёт предельного значения погрешности взаимодействия $\Delta_{вз.п.}$

Пусть измеряется напряжение переменного тока. Известно:

- $U = 25,00$ В. Отсчитано по шкале вольтметра;
- $R_{\text{вых.макс.}} \approx 10$ кОм. Значение получено в результате дополнительного эксперимента;
- $R_V = 1$ МОм. Известно из паспорта на вольтметр;
- $C_{V.\text{макс}} = 50$ пФ. Известно из паспорта на вольтметр;
- $\omega = 2\pi f = 2\pi 10^4$. Частота сигнала оценена с помощью осциллографа или частотомера.

Погрешность взаимодействия $\Delta_{вз.п.}$ имеет всегда отрицательный знак. Однако её можно *симметризовать* и, сделав это, – использовать в расчётах наравне с остальными погрешностями: $\Delta_{вз.сим.п.} = \pm |\Delta_{вз.п.}/2|$.

При этом в *измеренное значение* необходимо ввести (добавить) поправку, численно равную $\eta = |\Delta_{вз.п.}/2|$: $U_{\text{испр.}} = U + \eta$.

Типовое выражение для расчёта значения погрешности взаимодействия $\Delta_{вз.п.}$ при измерении **синусоидального напряжения** имеет следующий вид:

$$\Delta_{вз.п.} \approx -U \left(\frac{R_{\text{вых.макс.}}}{R_V} + 0,5 \cdot \omega^2 C_{V.\text{макс.}}^2 R_{\text{вых.макс.}}^2 \right)$$

Подставим известные значения и рассчитаем:

$$\Delta_{вз.п.} \approx -U \left(\frac{R_{\text{вых.макс.}}}{R_V} + 0,5 \cdot \omega^2 C_{V.\text{макс.}}^2 R_{\text{вых.макс.}}^2 \right) =$$

$$= 25 [(10 \cdot 10^3 / 1 \cdot 10^6) + 0,5 (2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 10^3)^2] \approx -0,26 \text{ В}$$

Окончательно имеем:

- значение погрешности взаимодействия:

$$\Delta_{\text{вз.сим.п.}} = \pm |\Delta_{\text{вз.п.}}/2| = \pm 0,13 \text{ В};$$

- скорректированное значение результата:

$$U_{\text{испр}} = U + \eta = 25,00 + 0,13 = 25,13 \text{ В.}$$

3.1.4 Расчёт предельного значения погрешности от формы полигармонического напряжения (ПГН) $\Delta_{\text{ф.п}}$

Эту погрешность можно оценить, если имеется априорная информация о форме исследуемого напряжения. В противном случае перед измерениями полезно изучить форму напряжения с помощью осциллографа.

На рисунке 3.2 представлен обобщённый пример измерения переменного напряжения с искажённой формой.

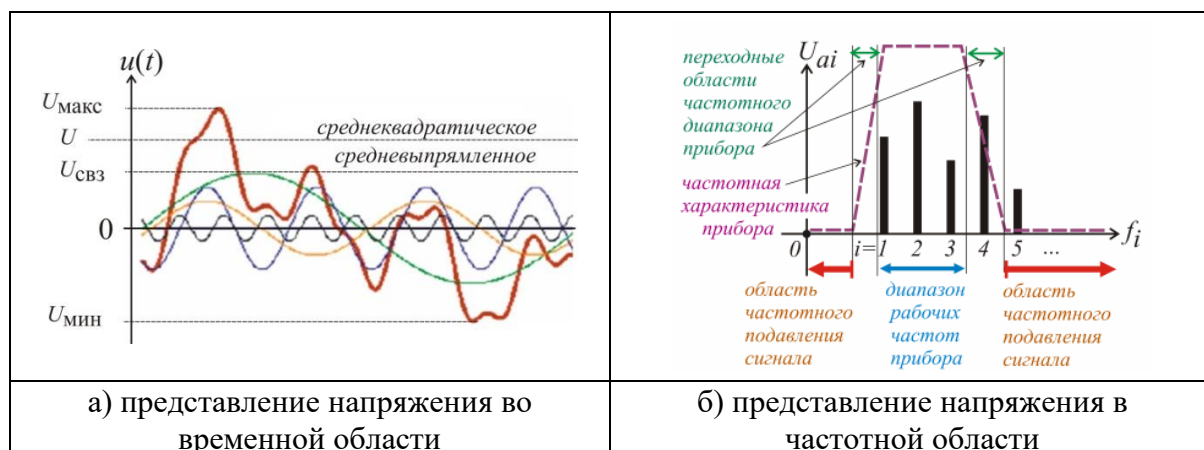


Рисунок 3.2 – Переменное напряжение с искажённой формой

Выбранный для эксперимента вольтметр будет допускать погрешность от формы $\Delta_{\text{ф}}$ по двум причинам:

- если *предельное* значение коэффициента амплитуды вольтметра меньше, чем у сигнала $k_{a.v} < k_{a.u}$;
- если *диапазон рабочих частот* вольтметра не включает некоторые старшие гармоники спектра исследуемого сигнала.

Примечание – Возможна ситуация, когда вклад в формирование исследуемого напряжения старшей или даже нескольких старших гармоник, выходящих за границу рабочего диапазона прибора, пренебрежимо мал и поэтому он игнорируется в расчётах.

В том случае, если степень искажения исследуемого напряжения не известна, то для представления погрешности результата необходимо провести дополнительные уточняющие исследования сигнала и принять решение:

- ограничится оценкой $\Delta_{\text{п}}$ без учёта $\Delta_{\text{ф}}$, но с указанием в протоколе этого факта;

- если установлено, что форма полигармонического напряжения имеет **детерминированный вид**, например, напряжение имеет прямоугольную форму, то оценку Δ_f можно провести расчётным путём;
- если установлено, что степень искажения сигнала велика, а оценить её нет возможности, то следует отказаться от оценки погрешности результата вовсе.

3.2 Расчёт погрешностей косвенных измерений

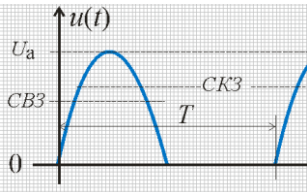
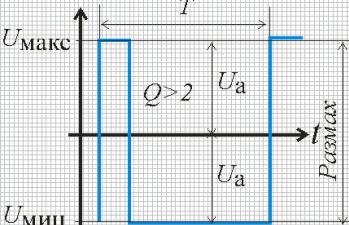
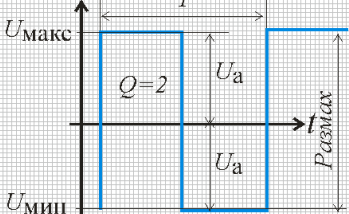
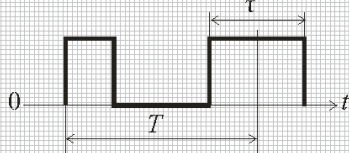
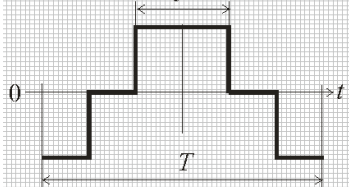
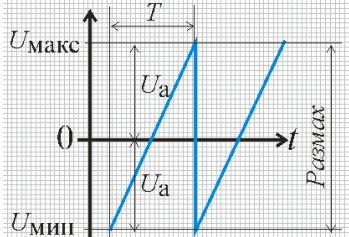
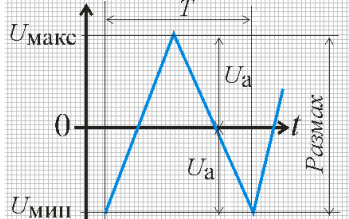
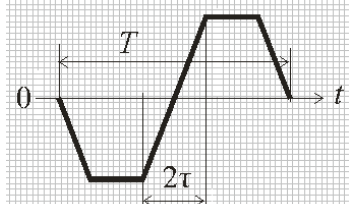
Расчёт погрешностей косвенных измерений изучить по материалам практических занятий.

Приложение Б. Справочные сведения

ТИПОВЫЕ ВИДЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Таблица Б.1 – Описания типовых переменных сигналов

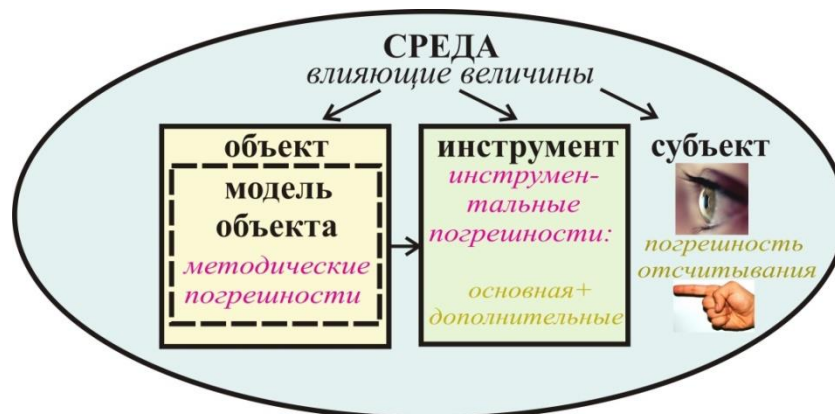
Вид напряжения	Графическое представление напряжений во временной области	Измеряемые параметры напряжения
1 Напряжения постоянного тока (DC)		<p>стабильное или меняющееся во времени напряжение постоянного тока, обозначаемое в тексте большой буквой U</p> <p>Примечание – U является «постоянным» только в момент измерения</p>
2 Напряжения переменного тока (AC; синусоидальное): $u(t) = U_a \cdot \sin \omega t$		<ul style="list-style-type: none"> - амплитудное значение U_a, - среднеквадратическое значение $U = U_a / \sqrt{2}$ - среднее выпрямленное значение $U_{СВЗ} = U / 1,1$ <p>Примечание – U является «постоянным» только в момент измерения</p>
3 Синусоидальное с постоянной составляющей: $u(t) = U_{сз} + U_a \cdot \sin \omega t$, где $U_{сз}$ – среднее значение напряжения		<ul style="list-style-type: none"> - амплитудное значение U_a; - среднее значение $U_{сз}$ (постоянная составляющая); - среднее выпрямленное значение $U_{СВЗ}$; - среднее квадратическое значение $U_{СКЗ} \equiv U = U_{сз} + U_a / \sqrt{2}$; - пиковое значение верхнее $U_{ПЗВ}$; - пиковое значение нижнее $U_{ПЗН}$; - размах напряжения ($U_{ПП} = U_{ПЗВ} - U_{ПЗН}$)
ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ		
4 Полигармоническое напряжение (ПГН): $u(t) = \sum u_i(t)$, где $i = 1, 2, \dots, n$ – номера гармонических составляющих		$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2},$ <p>где U_i – среднеквадратические значения i-х гармоник</p>
Полигармонические напряжения (ПГН) с детерминированной формой		
Вид напряжения	Графическое представление напряжений во временной области	Разложение в ряд Фурье
5 Пульсирующее: $u(t) = U_a \cdot \sin \omega t $		$k_a = 1,41$ $k_\phi = 1,11$ $f(t) = \frac{4V}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^{s+1}}{(2s)^2 - 1} \cos 2s\omega t \right]$ $s=1,2,3,4,\dots$

<p>6 Пульсирующее: $u(t) = U_a \cdot \sin \omega t$, при $t \in [0 \dots T/2]$; 0, при $t \in (T/2 \dots T)$</p>			$f(t) = \frac{2V}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1.3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega t - \dots \right)$ $k=1,2,4,6,\dots$
<p>7 Прямоугольное с произвольной скважностью $Q = (T/\Delta t) > 2$</p>			
<p>8 Меандр, $Q = 2$</p>		$k_a = 1$ $k_\phi = 1$	$\frac{4U_a}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin i\omega t}{i}$ <p>где $i=1, 3, 5, \dots$</p>
			$f(t) = \frac{4V}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \frac{k\omega t}{2} \cos k\omega t$ $k=1,2,3,4,5,\dots = \frac{2\pi}{T}$
			$f(t) = \frac{4V}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \frac{k\omega t}{2} \cos k\omega t$ $k=1,3,5,\dots$
<p>9 пилообразное: $u(t) = k \cdot t$, $t \in [0 \dots T]$, $k > 0$ – возрастающая «пила»</p>		$k_a = 1,73$ $k_\phi = 1,16$	$\frac{U_a}{\pi} \sum_i \frac{1}{i} \sin i\omega t$ <p>где $i = 1, 3, 5 \dots$</p>
<p>10 Треугольное симметричное: $u(t) = U_{сз} + k_1 \cdot t$, где $k_1 > 0$ при $t \in [0 \dots T/2]$; $k_2 < 0$ при $t \in [T/2 \dots T]$; $k_1 = k_2$</p>		$k_a = 1,73$ $k_\phi = 1,16$	$\frac{8U_a}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{\frac{j-1}{2}} \frac{\sin i\omega t}{j^2}$
<p>10 Трапецидальное</p>			$\frac{4U_a}{\omega \tau \pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin i\omega t}{i^2} \sin i\omega t$

Приложение В. Справочные сведения

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ,
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАБОТЕ

Типовая структура измерительного эксперимента



В.1 Термины

Среднеквадратическое (действующее) значение (СКЗ) напряжения

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Средневыпрямленное значение (СВЗ) напряжения

$$U_{\text{СВЗ}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

Коэффициент амплитуды $k_a = U_a / U$

$k_a = 1,41$ для синусоидального напряжения

Коэффициент формы $k_f = \frac{U}{U_{\text{СВЗ}}}$

$k_f = 1,11$ для синусоидального напряжения

...

В.2 Определения

Погрешность измерения физической величины определяется суммой инструментальных погрешностей используемого средства измерения (СИ), погрешностью отсчитывания (для аналоговых приборов) и методических погрешностей:

$$\Delta = \Delta_{\text{инс.}} + \Delta_{\text{отс.}} + \sum \Delta_{\text{м.}}$$

Расчет инструментальной погрешности производится на основании класса точности средства измерения.

Класс точности прибора – обобщённая метрологическая характеристика средств измерений, определяющая допускаемые пределы основной и дополнительных погрешностей, а также некоторые другие характеристики средств измерений.

Основная погрешность соответствует *нормальным условиям* измерений, которые устанавливаются в нормативных документах на *средства измерений* (СИ) конкретного типа и характеризуются совокупностью значений или областей значений *влияющих величин*.

Дополнительные погрешности нормируют для рабочих условий измерений, когда значения влияющих величин находятся в пределах установленных *рабочих областей*.

Предельное значение погрешности

Длина шкалы:

- для аналоговых приборов число делений шкалы a_k ;
- как характеристика цифрового прибора означает предельное целое число отображаемых дисплеем значений. Примеры: 199; 399; 2999; 4999; 59999; 999999, ...

Нормальные условия: параметры окружающей среды, при которых проводятся калибровка и/или поверка – метрологическая настройка – средств измерений. Эти параметры – диапазоны значений – задаются стандартами и записываются в паспорте на СИ.

Влияющая величина. Параметры окружающей среды Примеры: температура окружающего воздуха, атмосферное давление, влажность окружающего воздуха, электромагнитное поле, ...

Виды средств измерений: **меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные системы.**

Диапазоны частот вольтметров переменного тока:

- основной. В этом диапазоне справедливы нормированные метрологические характеристики;
- расширенные.
- рабочий диапазон = основной + расширенный.

Предел измерений = конечное значение диапазона измерений X_k

Диапазон измерений: $X_n \dots X_k$. Возможен вариант, когда $X_n = 0$.

Диапазон показаний. $0 \dots X_n \dots X_k$



Рисунок В.1 – Типовая система шкал аналогового прибора

В.3 Обозначения, используемые в тексте или применяемые на лицевых панелях приборов

U_k – конечное значение шкалы прибора;

$\Delta = U - U_{\text{и}} \approx U - U_{\text{д}}$ – абсолютная погрешность, где U – измеренное значение, $U_{\text{и}}$ – истинное значение измеряемого напряжения, $U_{\text{д}}$ – действительное значение измеряемого напряжения (значение, полученное с помощью эталонного измерителя)

$\delta \approx \frac{\Delta}{U}$ – относительная погрешность, форма 1;

$\delta \approx \frac{\Delta}{U} 100 \%$ – относительная погрешность, форма 2;

Δ_0 – основная абсолютная погрешность (получена в нормальных условиях);

$\Delta_{0.\text{п.}}$ – предельное значение основной абсолютной погрешности;

$\delta_{0.\text{п.}}$ – предельное значение основной относительной погрешности;

$\gamma = \frac{\Delta}{U_N}$ – приведённая погрешность, форма 1. Где U_N – нормирующее значение. Обычно $U_N = U_k$.

$\gamma = \frac{\Delta}{U_N} 100 \%$ – приведённая погрешность, форма 2;

γ_0 – основная приведённая погрешность;

$\gamma_{0.\text{п.}}$ – предельное значение основной приведённой погрешности;

k_Θ – температурный коэффициент влияния на показание вольтметра;

$\Delta_{\text{отс.п.}} = \Delta_{\text{пар.п.}} + \Delta_{\text{окр.п.}}$ – погрешность отсчитывания предельная, где $\Delta_{\text{пар.п.}}$ – погрешность параллакса предельная, $\Delta_{\text{окр.п.}}$ – погрешность округления предельная.

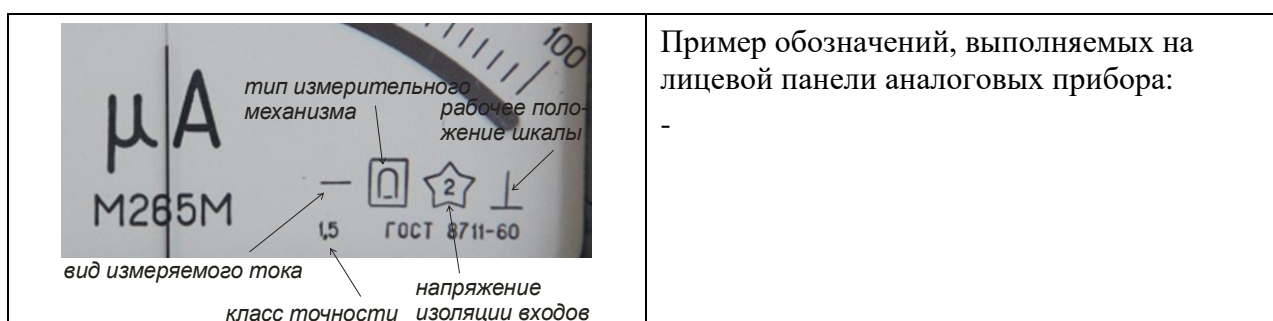
$\Delta_{\text{отс.п.}} \approx \Delta_{\text{окр.п.}}$ в том случае, если использован прибор с встроенным зеркальным отражателем или если отсчёт осуществляется посредством светового пятна.

$Q = (T/\Delta t) > 1$ – скажность импульсов. Где Δt – длительность импульса, T – период;

c/d – условная запись класса точности цифрового прибора советского производства, например: 1,0/0,5. Это означает: $\delta_{0.\text{п.}} = \pm [1,0 + 0,5 (\frac{U_k}{U} - 1)]$, %.

$\delta//n$ – условная запись класса точности современных цифровых приборов, например: 1,0//4. Это означает: $\Delta_{0.\text{п.}} = 0,01 \cdot U + 4 q^*$.

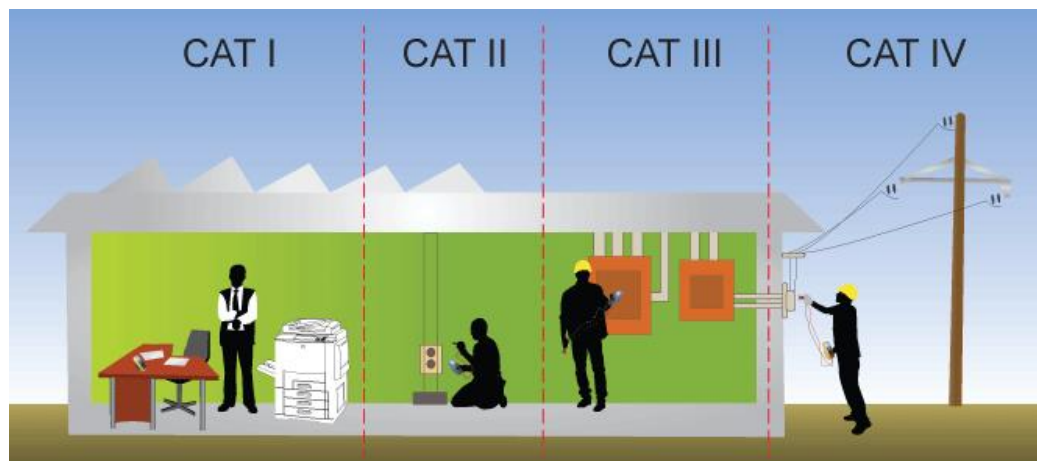
Примечание – Класс точности зарубежных цифровых приборов, часто, задаёт предельное значение абсолютной погрешности для всего рабочего диапазона эксплуатации прибора: диапазон температур, влажности, ..., частот.



https://www.kipis.ru/info/index.php?ELEMENT_ID=48599

Цифровые измерительные приборы в зависимости от особенностей применения должны производиться в соответствии с требованиями стандартов безопасности, как например, стандарта международной электротехнической безопасности IEC 61010 -1, а также национального и регионального стандартов. Например, CEN EN61010. В зависимости от требований по безопасности измерительное оборудование относится к определённым категориям:

- Категория I: производит измерения на цепях, которые не подключаются напрямую к сети
- Категория II: производит измерения на цепях, которые напрямую подключены к электросети
- Категория III: к данной категории относятся измерения, проводимые на оборудовании, имеющем непрерывное подключение к сети электропитания
- Категория IV: наивысшая измерительная категория, которая объединяет приборы, производящие измерения в зонах повышенного уровня тока повреждения



Таким образом, если в спецификации указана категория безопасности CAT III 1000V, то это означает, что прибор относится к категории III, и им можно проводить безопасные измерения в этих условиях до 1000 В.



В.4 Сокращения (аббревиатуры)

СКЗ (RMS) – среднеквадратическое значение.

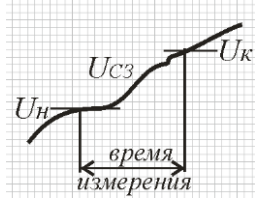
True RMS (TRMS) – обозначение, наносимое на лицевую панель вольтметров или используется в текстах. Означает, что данный вольтметр позволяет измерять СКЗ полигармонических напряжений.*


АС-вольтметры. Вольтметры, предназначенные для измерения переменных напряжений

Примечание – Буквальный перевод с английского: *истинный, настоящий, верный, подлинный, действительный, реальный*

Основные (часто используемые) обозначения и понятия метрологии в виде таблицы

	Обозначения , понятия	Описание																																																			
1.	$X \subset U, I, R, F, C, L, \dots$	Общее обозначение физической величины																																																			
2.	U	Так принято обозначать: напряжение постоянного тока или СКЗ переменного напряжения или измеренное напряжение																																																			
3.	X_i	Многократные измерения. i -е значение результата в серии из n последовательных измерений, где: $i = 1, 2, \dots, n$.																																																			
4.	$U_{\text{и}}, U_{\text{д}}$	Истинное и действительное значения напряжения																																																			
5.	$U_{\text{а}}$	Амплитудное значение синусоидального напряжения																																																			
6.	$U_{\text{макс}}, U_{\text{мин}}$	Максимальное и минимальное значения для напряжений вида DC или $AC+DC$, или полигармонического AC																																																			
		<table><tr><th>DC</th><th>AC</th><th>$AC+DC$</th></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>7.</td><td>$U_{\text{СЗ}}, U_{\text{СВЗ}}$</td><td>Среднее и средневывпрямленное значения напряжения</td></tr><tr><td>8.</td><td>$X_{\text{н}}, X_{\text{к}}$</td><td>Начальное и конечное значения шкалы прибора</td></tr><tr><td>9.</td><td>$X_{\text{э}}, X_{\text{ном}}$</td><td>Эталонное и номинальное значения физической величины</td></tr><tr><td>10.</td><td>$X_{\text{норм}}, \Delta X_{\text{норм}}$</td><td>Значение и диапазон значений величины, назначенные <i>нормальными</i>, например, $\Delta \Theta_{\text{норм}} = +(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ – <i>диапазон нормальных температур</i></td></tr><tr><td>11.</td><td>$X_{\text{испр.}}$</td><td>Исправленное значение измеренной величины. Получают после введения поправки: $X_{\text{испр}} = X + \eta$, где η – поправка, неотрицательное значение</td></tr><tr><td>12.</td><td>X_N</td><td>Нормирующее значение. В случае, если $X_{\text{н}}=0 \rightarrow X_N=X_{\text{к}}$</td></tr><tr><td>13.</td><td>a</td><td>Число делений, отсчитанное по аналоговой шкале</td></tr><tr><td>14.</td><td>$a_{\text{к}}$</td><td>Число делений аналоговой шкалы</td></tr><tr><td>15.</td><td>$R_{\text{вх}}, C_{\text{вх}}; Z_{\text{вх}}$</td><td>Входное сопротивление, входная ёмкость и входной импеданс СИ</td></tr><tr><td>16.</td><td>$R_{\text{вых}}, Z_{\text{вых}}, Y_{\text{вых}}$</td><td>Выходное сопротивление, импеданс и адмиттанс источника (электрического) сигнала</td></tr><tr><td>17.</td><td>$\Theta; t;$ $\Delta \Theta; \Delta t;$ T</td><td>Температура и время. Диапазон температур, интервал времени Период сигнала</td></tr><tr><td>18.</td><td>P</td><td>Вероятность; а также активная мощность и мощность</td></tr><tr><td>19.</td><td>Δ</td><td><i>Абсолютная погрешность</i> $= X - X_{\text{и}} \approx X - X_{\text{д}}$</td></tr><tr><td>20.</td><td>δ</td><td><i>Относительная погрешность</i> $= (X - X_{\text{и}})/X_{\text{и}} \approx (X - X_{\text{д}})/X_{\text{д}} \approx (X - X_{\text{д}})/X$</td></tr></table>	DC	AC	$AC+DC$							7.	$U_{\text{СЗ}}, U_{\text{СВЗ}}$	Среднее и средневывпрямленное значения напряжения	8.	$X_{\text{н}}, X_{\text{к}}$	Начальное и конечное значения шкалы прибора	9.	$X_{\text{э}}, X_{\text{ном}}$	Эталонное и номинальное значения физической величины	10.	$X_{\text{норм}}, \Delta X_{\text{норм}}$	Значение и диапазон значений величины, назначенные <i>нормальными</i> , например, $\Delta \Theta_{\text{норм}} = +(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ – <i>диапазон нормальных температур</i>	11.	$X_{\text{испр.}}$	Исправленное значение измеренной величины. Получают после введения поправки: $X_{\text{испр}} = X + \eta$, где η – поправка, неотрицательное значение	12.	X_N	Нормирующее значение. В случае, если $X_{\text{н}}=0 \rightarrow X_N=X_{\text{к}}$	13.	a	Число делений, отсчитанное по аналоговой шкале	14.	$a_{\text{к}}$	Число делений аналоговой шкалы	15.	$R_{\text{вх}}, C_{\text{вх}}; Z_{\text{вх}}$	Входное сопротивление, входная ёмкость и входной импеданс СИ	16.	$R_{\text{вых}}, Z_{\text{вых}}, Y_{\text{вых}}$	Выходное сопротивление, импеданс и адмиттанс источника (электрического) сигнала	17.	$\Theta; t;$ $\Delta \Theta; \Delta t;$ T	Температура и время. Диапазон температур, интервал времени Период сигнала	18.	P	Вероятность; а также активная мощность и мощность	19.	Δ	<i>Абсолютная погрешность</i> $= X - X_{\text{и}} \approx X - X_{\text{д}}$	20.	δ	<i>Относительная погрешность</i> $= (X - X_{\text{и}})/X_{\text{и}} \approx (X - X_{\text{д}})/X_{\text{д}} \approx (X - X_{\text{д}})/X$
		DC	AC	$AC+DC$																																																	
																																																					
																																																					
7.	$U_{\text{СЗ}}, U_{\text{СВЗ}}$	Среднее и средневывпрямленное значения напряжения																																																			
8.	$X_{\text{н}}, X_{\text{к}}$	Начальное и конечное значения шкалы прибора																																																			
9.	$X_{\text{э}}, X_{\text{ном}}$	Эталонное и номинальное значения физической величины																																																			
10.	$X_{\text{норм}}, \Delta X_{\text{норм}}$	Значение и диапазон значений величины, назначенные <i>нормальными</i> , например, $\Delta \Theta_{\text{норм}} = +(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ – <i>диапазон нормальных температур</i>																																																			
11.	$X_{\text{испр.}}$	Исправленное значение измеренной величины. Получают после введения поправки: $X_{\text{испр}} = X + \eta$, где η – поправка, неотрицательное значение																																																			
12.	X_N	Нормирующее значение. В случае, если $X_{\text{н}}=0 \rightarrow X_N=X_{\text{к}}$																																																			
13.	a	Число делений, отсчитанное по аналоговой шкале																																																			
14.	$a_{\text{к}}$	Число делений аналоговой шкалы																																																			
15.	$R_{\text{вх}}, C_{\text{вх}}; Z_{\text{вх}}$	Входное сопротивление, входная ёмкость и входной импеданс СИ																																																			
16.	$R_{\text{вых}}, Z_{\text{вых}}, Y_{\text{вых}}$	Выходное сопротивление, импеданс и адмиттанс источника (электрического) сигнала																																																			
17.	$\Theta; t;$ $\Delta \Theta; \Delta t;$ T	Температура и время. Диапазон температур, интервал времени Период сигнала																																																			
18.	P	Вероятность; а также активная мощность и мощность																																																			
19.	Δ	<i>Абсолютная погрешность</i> $= X - X_{\text{и}} \approx X - X_{\text{д}}$																																																			
20.	δ	<i>Относительная погрешность</i> $= (X - X_{\text{и}})/X_{\text{и}} \approx (X - X_{\text{д}})/X_{\text{д}} \approx (X - X_{\text{д}})/X$																																																			

21.	γ	Приведённая погрешность $= \Delta/X_N$. Обычно выражается в %: $\gamma = 100 \cdot \Delta/X_N$
22.	$\Delta_{\text{п}}; \delta_{\text{п}}; \gamma_{\text{п}}$	Предельные значения погрешностей
23.	$\Delta_{\text{гр}}; \delta_{\text{гр}}$	Граничные значения погрешностей измерения
24.	$\Delta_{\text{о}}; \delta_{\text{о}}; \gamma_{\text{о}}$	Основные погрешности: определены для нормальных условий
25.	$\Delta_{\text{о.п}}; \delta_{\text{о.п}}; \gamma_{\text{о.п}}$	Предельные значения основных погрешностей
26.	$\Delta_{\text{доп.п}}; \delta_{\text{доп.п}}$	Предельные значения дополнительных погрешностей
27.	$\Delta_{\text{доп}\Theta.\text{п}}; \delta_{\text{доп}\Theta.\text{п}}$	Предельные значения дополнительных температурных погрешности
28.	$\Delta_{\text{м}}; \delta_{\text{м}}; \Delta_{\text{м.п}}; \delta_{\text{м.п}};$	Методические погрешности (ПМ). Признак ПМ: <i>если измеряется не совсем та величина, которая требуется, это признак методической погрешности</i>
29.	$\Delta_{\text{вз}}; \delta_{\text{вз}} \Delta_{\text{вз.п}}; \delta_{\text{вз.п}}$	Погрешность взаимодействия (ПВ): составляющая погрешности результата измерения, вызванная взаимодействием СИ и Объекта измерений. ПВ – частный случай <i>методических погрешностей</i> измерения (ПМ).
30.	$\Delta_{\text{ф}}; \delta_{\text{ф}} \Delta_{\text{ф.п}}; \delta_{\text{ф.п}}$	Частотная погрешность (ПЧ): составляющая погрешности результата измерений, вызванная зависимостью показаний СИ от частоты сигнала. ПЧ – частный случай <i>методической погрешности</i> измерения.
31.	$\Delta_{\text{ф}}; \delta_{\text{ф}}; \Delta_{\text{ф.п}}; \delta_{\text{ф.п}};$	Погрешность от формы сигнала (напряжения; ПФ): составляющая погрешности результата измерений, вызванная зависимостью показаний СИ от формы исследуемого сигнала. ПФ – частный случай <i>методических погрешностей</i> измерения.
32.	$\Delta_{\text{дн}}; \delta_{\text{дн}}; \Delta_{\text{дн.п}}; \delta_{\text{дн.п}};$	Динамическая погрешность (ДП). Возникает всегда, когда измеряемая величина изменяется во время измерения. В зависимости от способа измерений прибор отображает либо начальное, либо конечное, либо среднее значение измеряемого сигнала $U_{\text{сз}}$ на интервале измерения.  ДП – одна из <i>методических погрешностей</i> .
33.	$\Delta_{\text{отс}}; \delta_{\text{отс}}; \Delta_{\text{отс.п}}; \delta_{\text{отс.п}}$	Погрешность, допускаемая субъектом при использовании аналоговых приборов – <i>погрешность отсчитывания</i>
34.	$\Delta_{\text{инс}}; \delta_{\text{инс}}; \Delta_{\text{инс.п}}; \delta_{\text{инс.п}}$	Инструментальные погрешности (ИП): $\Delta_{\text{инс}} = \Delta_{\text{о}} + \sum \Delta_{\text{доп}}$
35.	η	Поправка к результату измерения
36.	q	квант \equiv ЕМР (<i>единица младшего разряда</i>)
37.	c/d	Символическое обозначение класса точности цифрового прибора, изготовленного в СССР : $\delta_{\text{о.п}} = \pm [c + d(\frac{U_k}{U} - 1)]$, %. Пример: $1,0/0,5 \rightarrow \delta_{\text{о.п}} = \pm [1,0 + 0,5(\frac{U_k}{U} - 1)]$, %.
38.	Возможный пример краткого обозначения кл. точности СИ: $\delta_{\text{о.п.}}//n$	Символическое обозначение класса точности зарубежных цифровых приборов (вариант 1): $1,0/4^* \rightarrow 1\%/4q \rightarrow \Delta_{\text{о.п.}} = 0,01 \cdot U + 4q$. Примечание – Часто задаётся для всего диапазона рабочих условий эксплуатации: температурного, частотного, Тогда по формуле считается $\Delta_{\text{инс.п.}}$.

39.	Возможный пример краткого обозначения кл. точности СИ: $\delta_{о.п.}/\gamma_{о.п.}$	Символическое обозначение класса точности зарубежного цифрового прибора (вариант 2): $1,0/0,5^* \rightarrow 1\%/0,5\% \rightarrow \Delta_{о.п.} = 0,01 \cdot U + 0,005 U_k$ Примечание – Часто задаётся для всего диапазона рабочих условий эксплуатации: температурного, частотного, ... Тогда по формуле считается $\Delta_{инс.п.}$
40.	Формулы представления результата измерения	Метод МНС: $РИ = (ИЗ \pm \Delta_n) ЕИ; P=1$ где: РИ – результат измерений; ИЗ – измеренное значение; ЕИ – единица измерений; P (вероятность) = 1 – символ применённого метода расчёта МНС Метод статистического суммирования: $РИ = (ИЗ \pm \Delta_{гр}) ЕИ; P=?$ где (общепринято) P выбирается среди трёх значений: 0,99; 0,95 или 0,9
41.	Средства измерений (СИ)	Признаки СИ: - паспорт содержит метрологические характеристики; - включён в <i>Госреестр средств измерений РФ</i> ; - осуществлена текущая <i>поверка</i> ; - не подвергался недопустимым воздействиям (механическим, температурным, ...) при эксплуатации и хранении.
42.	Длина шкалы	Число делений шкалы a_k у аналогового прибора. Максимальное значение, отображаемое (цифровым) дисплеем прибора, например: 199; 399; 99999; ...
43.	Частотные характеристики вольтметров	 <p>$\Delta F_{\text{норм}} = F_{\text{норм.н}} \dots F_{\text{норм.в}}; \Delta F_{\text{раб}} = F_{\text{раб.н}} \dots F_{\text{раб.в}}; \Delta F_{\text{расш.н}}; \Delta F_{\text{расш.в.}}$</p>

Приложение Г.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ

Г.1 Измерение синусоидальных напряжений

Электронные вольтметры (ЭВ) переменного тока* создаются с применением преобразователей переменного напряжения в постоянный ток. Выходной ток преобразователей измеряется магнитоэлектрическим механизмом (МЭИМ; рисунок Г.1).

Напоминание – Электронными вольтметрами принято называть приборы с аналоговым отсчётом результата. В отличие от цифровых вольтметров (ЦВ), имеющих цифровое отсчётное устройство.

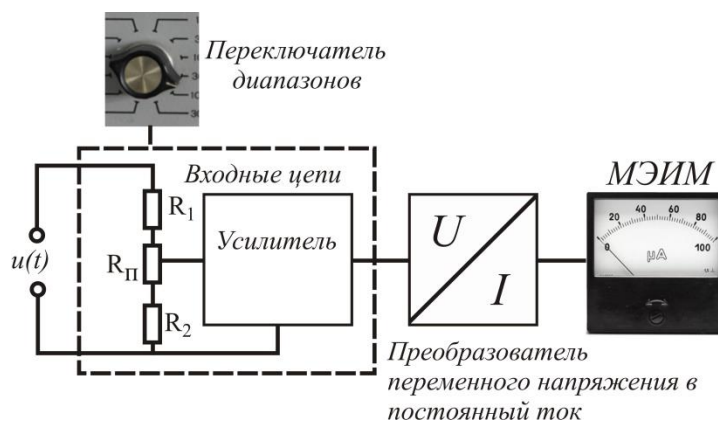


Рисунок Г.1 – Типовая структура ЭВ переменного тока

В серийно выпускаемых ЭВ используются три разновидности преобразователей:

- амплитудного значения (ПАЗ). Преобразует амплитудное значение переменного напряжения в постоянный ток $U_a \rightarrow I$;
- средневыврямленного значения (ПСВЗ). Преобразует средневыврямленное значение переменного напряжения в постоянный ток $U_{СВЗ} \rightarrow I$;
- среднеквадратического значения (ПСКЗ). Преобразует среднеквадратическое значение переменного напряжения в постоянный ток $U \rightarrow I$.

Значения U_a , $U_{СВЗ}$ и U (СКЗ) переменного напряжения связаны коэффициентами амплитуды $k_a = U_a/U$ и формы $k_\phi = U/U_{СВЗ}$. Для синусоидальных напряжений $k_a = \sqrt{2}$, $k_\phi = 1,11$. На рисунке Г.2 представлен график синусоидального напряжения с нормированной амплитудой $u(t) = 1 \cdot \sin \omega t$. На графике указаны значения всех трёх* параметров синусоиды: $U_a = 1$ В; $U = U_a/\sqrt{2} = 0,707$ В; $U_{СВЗ} = U/1,11 = 0,639$ В.

Примечания

1 Четвёртый параметр – частота – будем использовать в дальнейшем по мере необходимости. Значение начальной фазы ϕ в материале не актуально.

2 Обратите внимание, что СВЗ синусоиды чуть меньше СКЗ

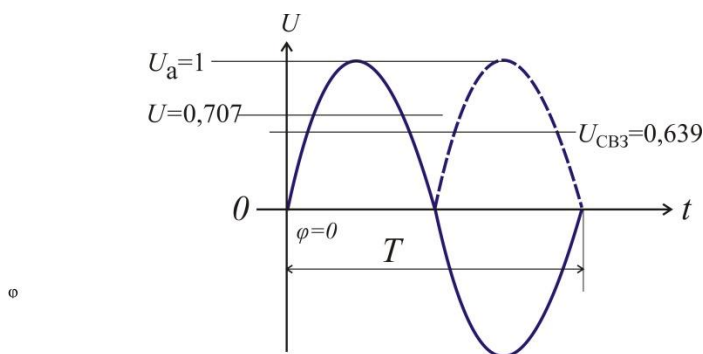


Рисунок Г.2 – Параметры синусоидального напряжения

Важно знать, что независимо от вида использованного преобразователя шкалы ЭВ *градуируются* однотипно: в **среднеквадратических значениях синусоидального напряжения**.

Дадим пояснение. На рисунке Г.3 показана схема, которая содержит *эталонный генератор* синусоидального напряжения и три подключённых к нему ЭВ, имеющих разные преобразователи. С помощью регулятора (см. рисунок) будем последовательно воспроизводить *эталонные значения синусоидальных напряжений*: 1 В, 2 В, ... 6 В. Это *среднеквадратические значения* синусоидальных напряжений – так принято *градуировать* шкалы генераторов.

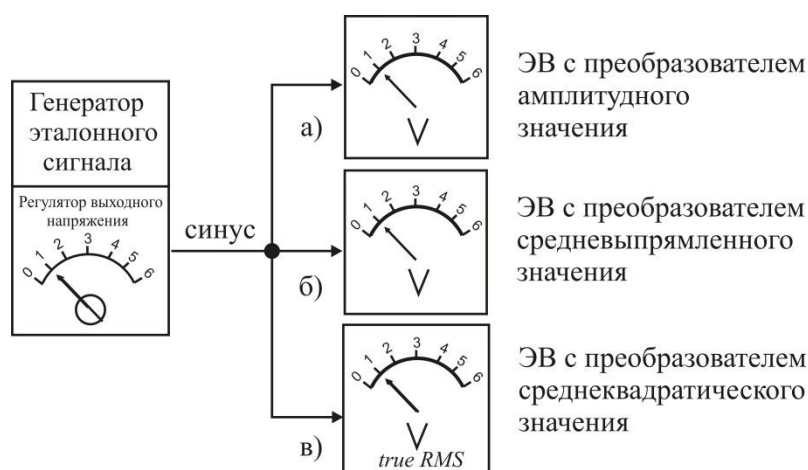


Рисунок Г.3 – Измерение синусоидальных напряжений ЭВ, имеющих разнотипные преобразователи

Стрелки вольтметров будут повторять* формируемые генератором значения напряжений. Другими словами, независимо от вида реализованного преобразователя, все вольтметры будут показывать всегда СКЗ поданного синусоидального напряжения: рассмотренные вольтметры могут использоваться для измерения **синусоидальных напряжений на равных основаниях**.

Примечания

1 Здесь в наших рассуждениях погрешности измерений $\Delta_{\text{инс.}} = \Delta_0 + \sum \Delta_{\text{доп.}i}$ и $\Delta_{\text{отс.}}$ не принимаются в расчёт

2 Вольтметры, имеющие в структуре ПСКЗ, зарубежом принято маркировать как вольтметры *True RMS* или *TRMS* – «вольтметры, измеряющие истинное среднеквадратическое значение напряжения». Здесь «**истинное**» – не зависящее от формы сигнала.

Примечание – Рассчитывая погрешность результата измерений **синусоидальных напряжений**, не следует забывать о ещё одной разновидности погрешности – частотной Δf . Эта погрешность учитывается, но только в тех случаях, когда наряду с рабочим диапазоном частот $\Delta F_{\text{раб}}$ для измерителя назначаются *расширенные частотные диапазоны* $\Delta F_{\text{расш}}$. Если частота сигнала соответствует расширенному диапазону, то обычно погрешность $\Delta f_{\text{п}} = \Delta_{\text{о.п.}}$.

Г.2 Измерения полигармонических напряжений

Полигармоническое напряжение (ПГН) имеют две формы графического описания: временная (а) и спектральная (б). См. рисунок Г.4.

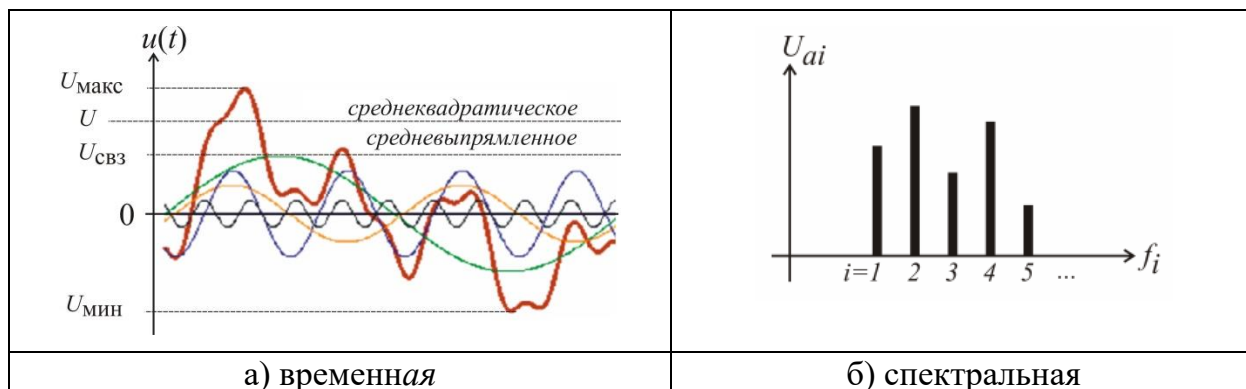


Рисунок Г.4 – Формы графического описания ПГН

Частотная форма для наших случаев более наглядная.



Рисунок Г.5 – Иллюстрация влияния частотного диапазона вольтметра на точность измерений ПГН

Если мы будем измерять ПГН – прямоугольные, треугольные, искажённые синусоиды и т.п. – то показания рассмотренных выше трёх вольтметров **будут уже расходиться, т.к.** коэффициенты k_a и k_f для искажённого сигнала изменят свои значения. Другими словами связь между АЗ, СВЗ и СКЗ сигнала изменится.

Разберём проблемы измерения ПГН в типовых ситуациях.

Г2.1 Форма и частота измеряемого напряжения неизвестны

В этом случае показания вольтметров нельзя считать *измеренными значениями*. Дело в том, что большинство серийно выпущенных и до сих пор выпускаемых вольтметров предназначено для измерений только синусоидальных напряжений и в ограниченном частотном диапазоне. В этой ситуации утруждать себя расчётом погрешности результата

не имеет никакого смысла: считанное значение может ввести в заблуждение, стать грубой оценкой результата! Запомним, что **форма и частота искажённого сигнала** могут существенно влиять на показания вольтметров. Меру искажения обозначим как Δ_ϕ – *погрешность от формы сигнала*.

Даже в том случае, если был применён *TRMS*-вольтметр, имеют место две причины, которые не позволяют надеяться на отсутствии в отсчитанном значении погрешности формы Δ_ϕ . Рассмотрим эти сомнения на примерах.

Г.2.2 Влияние частоты ПГН на результаты измерения

Рассмотрим несколько примеров, в которых исследуемое напряжение – меандр. Форма сигнала выбрана по двум причинам: проще проводить расчёты, форма сигнала наиболее сильно отличается от гармонической.

О меандре мы знаем следующее (рисунок Г.6):

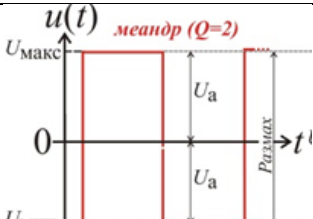
Измеряемое напряжение меандр: $Q = T/\Delta t_{\text{и}} = 2$		$k_a = 1;$ $k_\phi = 1;$ Пусть $U_a = 2 \text{ В}$	разложение в ряд: $u(t) = \frac{4U_a}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\sin j\omega t}{j},$ где $j=1, 3, 5, \dots$
--	---	---	--

Рисунок Г.6 – Характеристики меандра

Пример 1. С помощью трёх электронных вольтметров измеряем напряжение типа меандр. Частота меандра f равна *граничному значению* диапазона рабочих частот вольтметров $f_{\text{гр.}}$.

Какие результаты мы отсчитаем по шкалам приборов, если пренебречь погрешностями $\Delta_{\text{инс.}}$ и $\Delta_{\text{отс.}}$?

Решение примера представлено в табличной форме (рисунок Г.7):

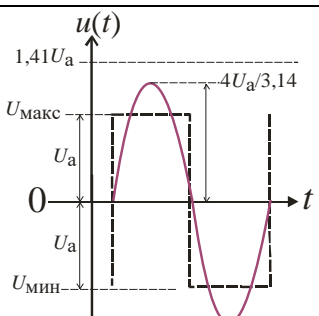
Вольтметр с ПАЗ	$U_k = 2 \text{ В (СКЗ)} = U_a; f = f_{\text{гр.}}$ На частоте $f = f_{\text{гр.}}$ вольтметр		Показание прибора: 1,81 В
Вольтметр с ПСВЗ	воспринимает меандр как синусоиду с амплитудой $U_{a1} = 4U_a/\pi$: все гармоники кроме первой подавлены (см. формулу разложения меандра).		Показание прибора: 1,81 В
Вольтметр с ПСКЗ (TrueRMS)	Обозначено: U_{a1} – амплитуда первой гармоники в разложении меандра		Показание прибора: 1,81 В

Рисунок Г.7 – Решение примера 1

Все вольтметры покажут одно и то же значение: независимо от вида встроенного преобразователя переменного напряжения показания будут равны $U = U_I = 4U_a/\pi\sqrt{2} = 1,81 \text{ В}$. Разница $U - U_d = (1,81 - 2,00) \text{ В} = -0,19 \text{ В} = \Delta_{\phi 1}$ – погрешность от формы напряжения. Относительная погрешность от формы $\delta_\phi = -0,19 \cdot 100\% / 2,0 = -9,5 \%$.

Примечания

1 Далее по тексту мы введём ещё одну разновидность погрешности от формы $\Delta_{\phi 2}$

2 Следует обратить внимание, что ошибку допустил в том числе и *TRMS*-вольтметр. Он, как и остальные, «не заметил» отсечённые гармоники.

Пример 2. С помощью трёх электронных вольтметров измеряем напряжение типа меандр. Частота меандра f в три раза меньше *граничного значения* полосы частот вольтметров $f_{гр.}$.

Какие результаты мы отсчитаем по шкалам приборов, если пренебречь погрешностями $\Delta_{инс.}$ и $\Delta_{отс.}$?

Актуальные характеристики меандра и его усечённого разложения (рисунок Г.8):

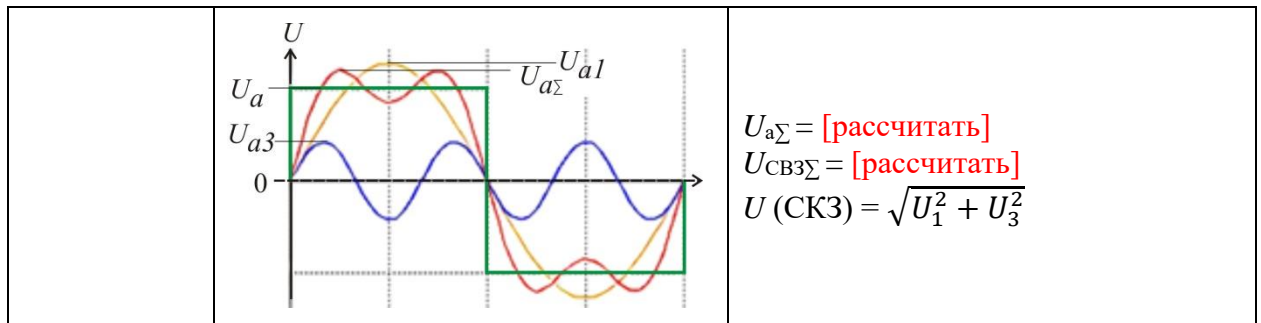


Рисунок Г.8 – Графическое описание условий примера 2

Первый вольтметр реагирует на амплитуду *воспринимаемого** сигнала, его использование позволяет измерить только амплитуду $U_{a\Sigma} = U \cdot k_a = U \sqrt{2} = \dots$ Где U – показание прибора.

Примечания

1 Вольтметры в силу ограниченного частотного диапазона воспринимают сигнал усечённо – как сумму двух гармоник

2 Если форма сигнала субъекту не известна, а сделанный отсчёт U он воспринимает как СКЗ этого сигнала – что справедливо для синусоидального напряжения, то разница $U - U_d = U - U_a$ (для нашего примера) представляет фактически грубую ошибку – *промах*. Проведённое измерение в таком случае следует признать некорректным.

Второй вольтметр реагирует на СВЗ *воспринимаемого** сигнала, поэтому, как было показано в начале подраздела, с его помощью можно измерить только СВЗ сигнала: $U_{св3} = U / k_\phi = U / 1,11 = \dots$ Где U – показание прибора.

Примечания – См. замечания для первого вольтметра

Третий вольтметр, имеющий ПСКЗ, отобразит СКЗ *воспринимаемого* напряжения.

СКЗ напряжения можно рассчитать, если известен спектр сигнала. Для рассматриваемого случая имеем:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2} = 1,91 \text{ В}$$

В формулу подставлены значения для 1-й и 3-й гармоник:

$$U_1 = 4U_a / \pi \sqrt{2} = 1,807 \text{ В}; U_1^2 = 3,27 \text{ В}^2;$$

$$U_3 = 4U_a / 3\pi \sqrt{2} = 0,602 \text{ В}; U_3^2 = 0,36 \text{ В}^2.$$

Погрешность $\Delta_{\phi 1}$ в сравнении с первым примером уменьшилась до значения $(-0,09) \text{ В}$, а в относительном виде $\delta_{\phi 1} = -0,09 \text{ В} \cdot 100\% / 2,0 \text{ В} = -4,5\%$.

Пример 3. С помощью трёх электронных вольтметров измеряем напряжение типа меандр. Частота меандра f **во много раз меньше** *граничного значения* полосы частот вольтметров $f_{гр.}$.

«Во много раз меньше» означает, что вольтметр **воспринимает** форму сигнала без искажений – именно как меандр.

Рассуждения и расчёты, которые мы должны провести аналогичным образом, должны подтвердить уже установленный факт, что при измерении ПГН первый вольтметр позволит нам измерить U_a , второй – $U_{СВЗ}$, третий – U («истинное» СКЗ).

Для первого вольтметра (ПАЗ) имеем: U (измеренное значение) = $U_a = k_a \times U_{отс}$, где $k_a = 1,41$ – коэффициент амплитуды синусоиды;

Для второго вольтметра (ПСВЗ) имеем: U (измеренное значение) = $U_{СВЗ} = U_{отс} / k_\phi$, где $k_\phi = 1,11$ – коэффициент формы для синусоиды;

Для третьего вольтметра (ПСКЗ) имеем: U (измеренное значение) = $U_{отс}$. Рассчитаем U , $\Delta_{\phi 1}$ и $\delta_{\phi 1}$ в предположении, что $9 \cdot f = f_{гр.}$:

$$U \approx \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_9^2} = 1,966 \text{ В}$$

$$U_1 = 4U_a / \pi \sqrt{2} = 1,807 \text{ В}; U_1^2 = 3,270 \text{ В}^2;$$

$$U_3 = 4U_a / 3\pi \sqrt{2} = 0,602 \text{ В}; U_3^2 = 0,360 \text{ В}^2;$$

$$U_5 = 4U_a / 5\pi \sqrt{2} = 0,361 \text{ В}; U_5^2 = 0,130 \text{ В}^2;$$

$$U_7 = 4U_a / 7\pi \sqrt{2} = 0,258 \text{ В}; U_7^2 = 0,067 \text{ В}^2;$$

$$U_9 = 4U_a / 9\pi \sqrt{2} = 0,201 \text{ В}; U_9^2 = 0,040 \text{ В}^2;$$

$$\Delta_{\phi 1} = (1,966 - 2,000) \text{ В} = -0,034 \text{ В}, \delta_{\phi 1} = -1,7 \%$$

...

Вывод: последующий расчёт показывает, что при учёте гармоник уже с U_{15} *методическая погрешность* от формы сигнала $\Delta_{\phi 1}$ будет меньше $|-1\%|$.

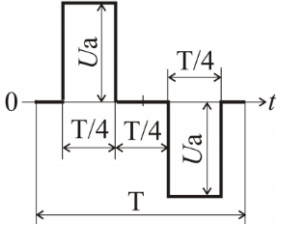
Примечание – Следует обратить внимание, что в нашем случае погрешность от формы, как и погрешность взаимодействия имеет отрицательный знак! Всегда ли?..

Г.2.3 Влияние коэффициента амплитуды ПГН k_a на результат измерения

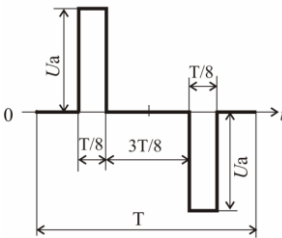
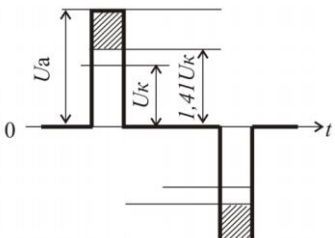
В рассмотренных примерах коэффициент $k_a < 1,41$, где $k_a = 1,41$ параметр синусоидального напряжения. Убедились, что погрешность $\Delta_{\phi 1}$ возрастает по мере приближения f к $f_{гр}$ частотного диапазона вольтметра.

Рассмотрим примеры напряжений, для которых $k_a > 1,41$. По-прежнему, рассматривать будем класс напряжений прямоугольной формы – для простоты расчётов. Частота всех рассмотренных сигналов $f < f_{гр}$.

№	Форма напряжения	Параметры напряжений
---	------------------	----------------------

1		$U_a = 2 \text{ В},$ $U = \sqrt{2} = 1,414 \text{ В}$ $U_{CB3} = 1,00 \text{ В}$ $U_{C3} = 0 \text{ В, среднее значение}$ $k_a = U_a/U = 2/1,414 = 1,41 \text{ В}$ $k_\Phi = U/U_{CB3} = 1,414/1,00 \approx 1,41 \text{ В}$	$U_a = 4 \text{ В},$ $U = \sqrt{8} = 2,828 \text{ В}$ $U_{CB3} = 2,00 \text{ В}$ $U_{C3} = 0 \text{ В, среднее значение}$ $k_a = U_a/U = 4/2,83 = 1,41 \text{ В}$ $k_\Phi = U/U_{CB3} = 2,83/2,00 \approx 1,41 \text{ В}$
---	---	--	--

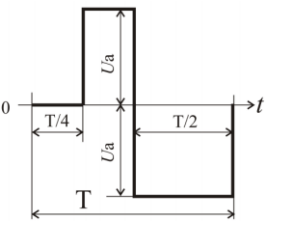
Пояснения к примеру №1. Этот пример интересен тем, что ПГН имеет $k_a=1,41$. Как для синусоиды.

№	Форма напряжения	Параметры напряжения	
2		$U_a = 2 \text{ В},$ $U = \sqrt{1} = 1,00 \text{ В}$ $U_{CB3} = 0,50 \text{ В}$ $U_{C3} = 0 \text{ В, среднее значение}$ $k_a = U_a/U = 2/1,0 = 2,0 \text{ В}$ $k_\Phi = U/U_{CB3} = 1,0/0,50 \approx 2,0 \text{ В}$	

Пояснения к примеру №2.

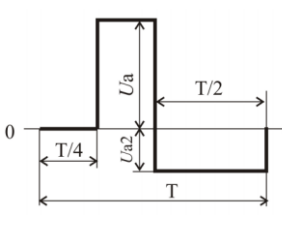
Значение U_a не должна превышать $k_{a, \max} \times U_k$ на выбранном диапазоне. В противном случае прибор покажет перегрузку и субъект вынужденно выберет более грубый предел. Вольтметр с другим принципом действия может не заметить превышения предела и «срежет» часть вершины напряжения (на рисунке справа заштрихованная область).

В первом случае точность измерения снизится, т.к. измерение будет осуществляться в начале выбранного более грубого диапазона. Во втором случае возникнет погрешность Δ_Φ , которую необходимо учитывать в расчётах.

3		$U_a = 2 \text{ В},$ $U = \sqrt{3} = 1,732 \text{ В}$ $U_{CB3} = 1,50 \text{ В}$ $U_{C3} = -0,5 \text{ В, среднее значение}$ $k_a = U_a/U = 2/1,732 = 1,51 \text{ В}$ $k_\Phi = U/U_{CB3} = 1,732/1,50 \approx 1,55 \text{ В}$	
---	---	---	--

Пояснения к примеру №3. $U_{C3} \neq 0$ означает, что сигнал имеет постоянную составляющую, которая будет «отрезана» (не учтена) АС-вольтметром при измерениях.

Примечание – Это касается большинства вольтметров, но в продаже встречаются вольтметры, которые способны измерять сумму составляющих: переменную (АС) и постоянную (DC).

4		$U_a = 2 \text{ В}; U_{a2} = U_a/2 = 1,0 \text{ В};$ $U = \sqrt{1,5} = 1,22 \text{ В};$ $U_{CB3} = 1,0 \text{ В};$ $U_{C3} = 0 \text{ В, среднее значение}$ $k_a = U_a/U = 2 / 1,22 = 1,639 \text{ В};$ $k_\Phi = U/U_{CB3} = 1,22/1 \approx 1,22 \text{ В}$	$k_a > 1,41$: больше, чем у синусоиды.
---	---	---	---

Пояснения к примеру №4. Если выбран диапазон $U_k=2$, то вольтметр либо «срежет» часть импульса U_a , и это приведёт к погрешности, либо покажет перегрузку по входу («зашкалит»).

Во втором случае необходимо будет переключить предел на более высокий, например, 5 В. Измерение будет осуществляться ближе к началу шкалы и точность результата понизится.

Общий вывод: при измерении ПГН возможна ситуация, когда $k_a > 1,41$. Это может приводить к «незамеченной» перегрузке вольтметра, а значит к ошибке, которую здесь мы также обозначим как $\Delta_{\phi 2}$.

Современные *TRMS*-вольтметры допускают измерение ПГН с типовым значением $k_{a, \max} = 3$, в ряде случаев – ещё больше.

Обобщая две причины возникновения погрешности от формы сигнала обозначим $\Delta_{\phi} = \Delta_{\phi 1} + \Delta_{\phi 2}$.

...

В том случае, когда коэффициент амплитуды измеряемого напряжения $k_{a,u} > k_{a,v}$, может возникнуть вторая составляющая погрешности $\Delta_{\phi 2} < 0$. Поясним на примере (рисунок В.1).

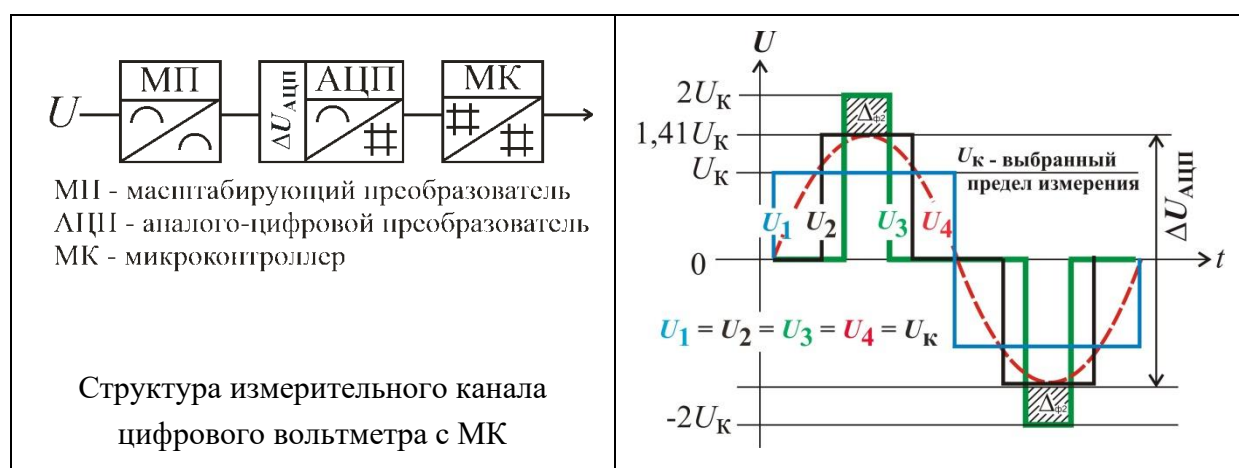


Рисунок В.1 – Иллюстрация погрешности формы от коэффициента амплитуды напряжения

На совмещённых рисунках представлена ситуация, когда на вход вольтметра подаются последовательно три ПГН, СКЗ которых равны выбранному пределу измерения вольтметра U_K . Варианты ПГН смоделированы прямоугольными сигналами. Амплитуда первого – меандра – равна значению выбранного предела вольтметра U_K , амплитуда второго равна амплитуде гармоники ($1,41 \cdot U_K$), СКЗ* которой соответствует рассматриваемому диапазону измерений. В этих двух случаях погрешности от формы возникают только тогда, если существенная часть гармоник будет отсечена измерительным каналом – частота прямоугольного сигнала находится слишком близко к граничной частоте РДЧ.

Примечание – Проверка и калибровка вольтметров осуществляется на гармоническом сигнале, при этом разметка шкалы осуществляется в СКЗ этого сигнала

Встроенный в измерительный канал вольтметра АЦП имеет динамический диапазон преобразования $\Delta U_{\text{АЦП}} = (-1,41 \cdot U_K \dots 1,41 \cdot U_K)$, а амплитуда третьего ПГН-сигнала превышает эти возможности АЦП и преобразователь оцифровывает всего три значения: $-1,41 \cdot U_K$, 0 и $1,41 \cdot U_K$.

Если амплитуда сигнала превышает динамический диапазон АЦП ($\Delta U_{\text{АЦП}}$), но при этом СКЗ сигнала находится в пределах выбранного диапазона измерения U_K – как в

нашем случае, то вольтметр может «не заметить» такое превышение и допустит тем самым ещё одну ошибку – погрешность, которую обозначим как $\Delta_{\phi 2} < 0$.

Более совершенные вольтметры, такое превышение фиксируют и отображают на дисплее отметку о перегрузке. В этом случае субъект выбирает* более грубый диапазон и уменьшает тем самым точность измерения за счёт инструментальной погрешности. К примеру, измеряемое напряжение имеет $U=1$ В (СКЗ) при амплитуде 2 В и вместо диапазона $U_{к1}=1$ В вынужденно выбран следующий более грубый, например, $U_{к2}=2$ В.

Примечание – Некоторые вольтметры имеют режим автоматического выбора диапазона измерения.

Приложение Д.

УСТРОЙСТВО ВОЛЬТМЕТРОВ

1 ВОЛЬТМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ГРУППЫ

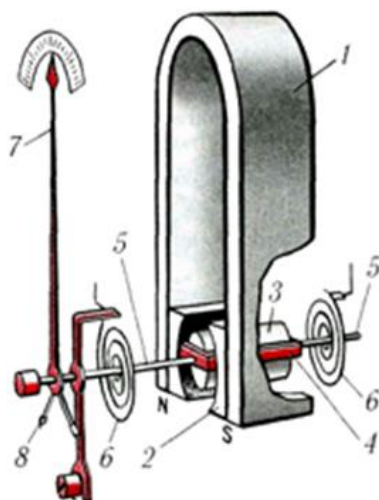
В настоящее время актуально использование двух разновидностей вольтметров электромеханической группы:

- на базе магнитоэлектрического измерительного механизма (МЭИМ);
- на базе электромагнитного измерительного механизма (ЭМИМ).

1.1 Магнитоэлектрические вольтметры

...

Устройство МЭИМ



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, сравняется с противодействующим моментом: $M_{вр} = M_{пр}$.

Рисунок Д.1 – Устройство МЭИМ

Магнитоэлектрический вольтметр создаётся на базе МЭИМ путём подключения дополнительного резистора $R_{доб}$ с целью повышения входного сопротивления $R_{вх}$.

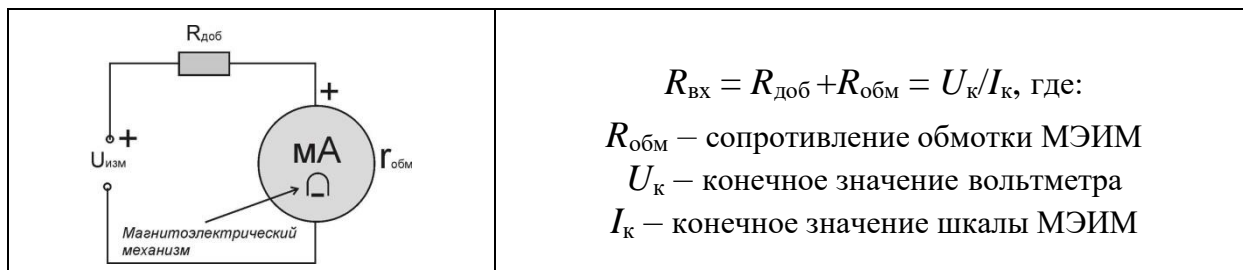
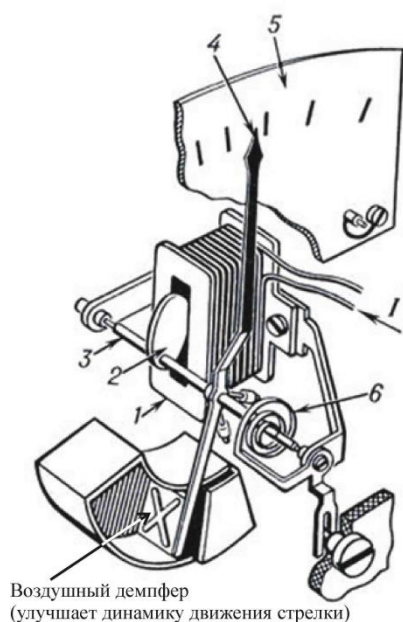


Рисунок Д.2 – Структура вольтметра постоянного тока на базе МЭИМ

Такие измерители способны измерять только постоянные напряжения. Характеризуются высокой точностью и чувствительностью. Находят широкое применение в различного рода электронных приборах.

1.2 Электромагнитные вольтметры

Устройство ЭМИМ.



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 намагничённого *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 Д.3 – Устройство ЭМИМ

Электромагнитный вольтметр создаётся на базе ЭМИМ аналогично МЭИМ-вольтметру – путём подключения дополнительного резистора $R_{\text{доп}}$.

Такие вольтметры способны измерять как переменные, так и постоянные напряжения.

В настоящее время находят широкое применение на предприятиях электроэнергетики, в электротранспорте и др.

2ВОЛЬТМЕТРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ ГРУППЫ

МЭИМ не способен непосредственно измерять *переменный* ток, однако по ряду причин их также приспособляют для измерения *переменных* сигналов. Для этого их снабжают *преобразователями переменного тока в постоянный ток*. На рисунке Д.4 показана функциональная схема такого *выпрямительного амперметра (ВА)*, в качестве преобразователя в котором использован *выпрямительный мост*.

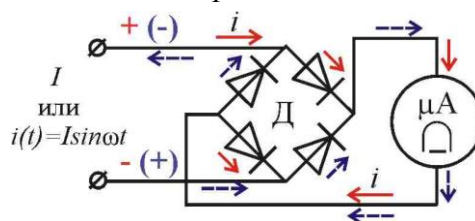


Рисунок Д.4 – Схема выпрямительного амперметра

Выпрямительный вольтметр создаётся на базе выпрямительного амперметра описанным выше способом – путём подключения дополнительного резистора $R_{\text{доп}}$.

Такой вольтметр способен измерять как переменные, так и постоянные напряжения.

3ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

3.1 Электронные вольтметры (ЭВ) 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 **ЭВ 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 Д.5).

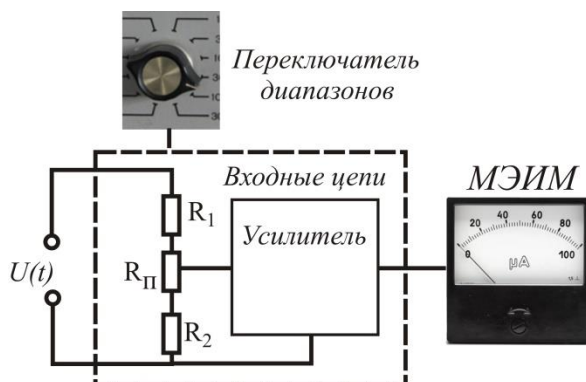


Рисунок Д.5 – Структура электронного вольтметра постоянного тока

Делитель напряжения обеспечивает высокое входное сопротивление электронного вольтметра (обычно 1 МОм). Коэффициенты деления и усиления можно дискретно регулировать вручную. За счет высокого коэффициента усиления усилителя ЭВ обеспечивает пользователю высокую *чувствительность* (другими словами, можно измерять, в том числе, сравнительно малые напряжения) по сравнению с *электромеханическими*.

3.2 В структуру ЭВ, предназначенного для измерения переменных напряжений, добавлен *преобразователь переменного напряжения в постоянный ток*.

В серийных ЭВ применяют три разновидности преобразователей:

- амплитудного значения (ПАЗ; $U_a \rightarrow I$);
- средневывпрямленного значения (ПСВЗ; $U_{СВЗ} \rightarrow I$);
- среднеквадратического значения (ПСКЗ; $U \rightarrow I$).

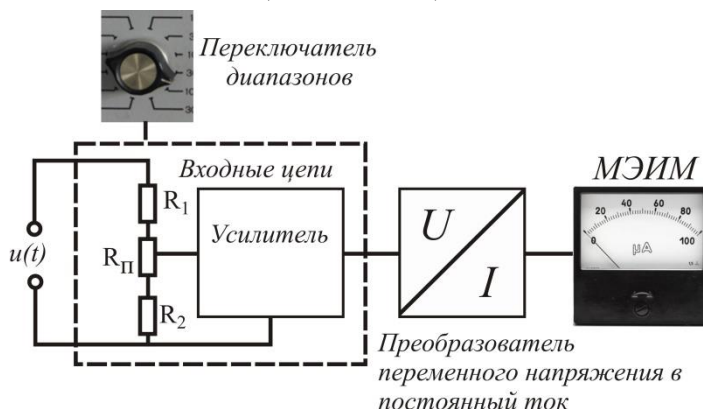


Рисунок Д.6 – Типовая структура ЭВ переменного тока

Примечание – Не следует считать, что аналоговые приборы устарели. Они имеют свои преимущества в сравнении с цифровыми. На рисунке Д.7 представлен фрагмент внутреннего устройства пилотской кабины (кокпит) современного самолёта. Широко представлены аналоговые формы отображения информации.



Рисунок Д.7 – Приборное оборудование пилотской кабины **современного** авиалайнера

Дело в том, что в сложной, например, аварийной обстановке человек лучше ориентируется по приборам, которые наглядно демонстрируют динамику (изменение) контролируемых величин. Цифровые на это не способны – мельтешение цифр человек не воспринимает вообще.

4ЦИФРОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Цифровые вольтметры (ЦВ) – современный и наиболее развиваемый класс вольтметров. Это электронные вольтметры, которые привлекают способом отображения результатов измерения. Для отображения используются т.н. *цифровые дисплеи*, состоящие из нескольких десятичных цифр – декад.

4.1Простейшие ЦВ

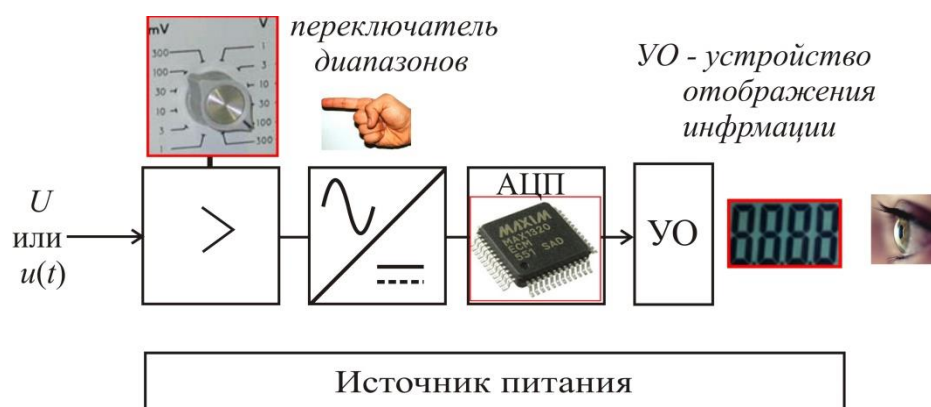


Рисунок Д.8 – Типовая структура функционально простого ЦВ

4.2 Функционально сложные ЦВ

На рисунке Д.9 представлена типовая структура современного микропроцессорного вольтметра.

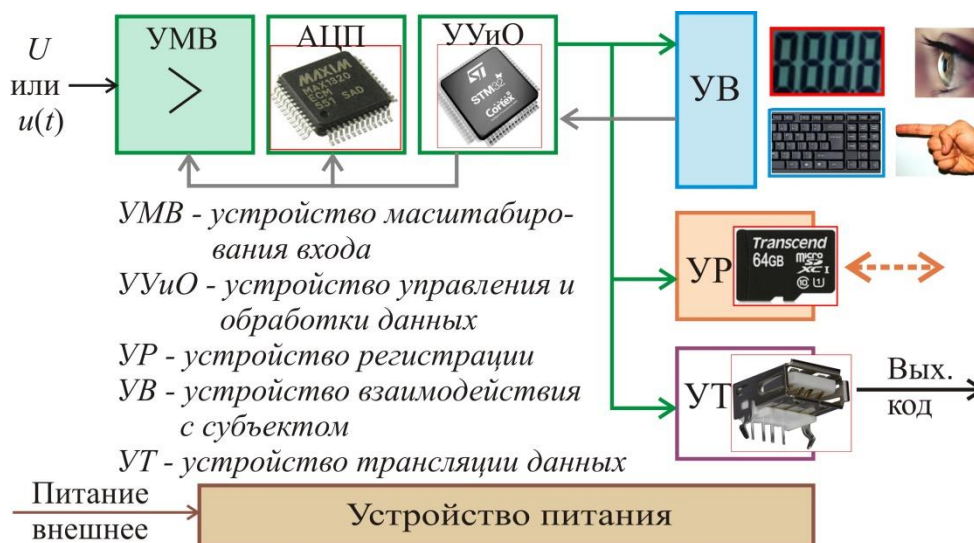


Рисунок Д.9 – Типовая структура функционально сложного ЦВ

Здесь показано, что сложные вольтметры имеют в общем случае три возможности утилизации получаемых результатов измерений: отображение, регистрация, трансляция удалённому субъекту.

5 ГРАФИЧЕСКИЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Новый вид современных ЦВ имеет графический дисплей, с помощью которого отображаются не только параметры измеряемого напряжения, но и демонстрируется форма и/или поведение сигнала во времени (рисунок Д.10).

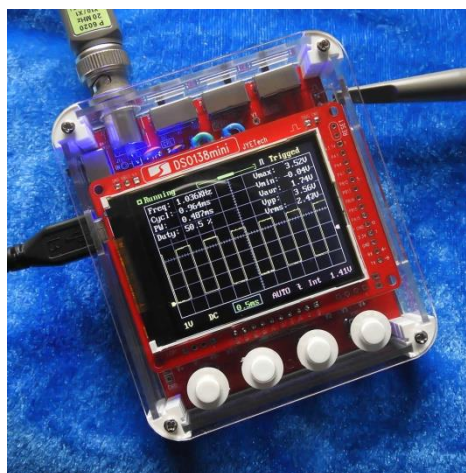


Рисунок Д.10 – Вольтметр с графическим дисплеем

Такой прибор заменяет фактически три прибора: вольтметр, осциллограф, частотомер. Именно такие приборы позволяют эффективно оценивать погрешность Δf при измерениях ПГН.