

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Тульский государственный университет

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Контрольно-курсовая работа
по дисциплине «Электрические измерения»

№ варианта: 2
№ группового варианта: 1

30.04.2022г.

Разработал ст. гр. Б161202.№204449 _____ Рогожин Д.В.
подпись

Проверил: _____ Шибякин О.А.
подпись

Работа защищена _____
дата подпись оценка

Тула. 2022

Оглавление

Задание к работе.....	3
1 Введение.....	4
2 Краткие сведения об электроизмерительных приборах.....	6
3. Расчетная часть.....	17
4. Вывод.....	25
5. Список литературы.....	27

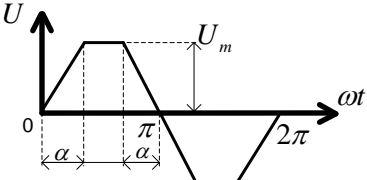
Задание к работе «ИЗМЕРЕНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИБОРАМИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ»

Определить результат измерения несинусоидального напряжения (таблица №1) следующими приборами:

1. Магнитоэлектрическим вольтметром
2. Выпрямительным вольтметром
3. Электромагнитным вольтметром
4. Электродинамическим вольтметром
5. Электростатическим вольтметром
6. Электронным вольтметром с амплитудным детектором при открытом и закрытом входе
7. Электронным вольтметром с детектором действующих значений при открытом и закрытом входе
8. Электронным вольтметром с детектором средневыпрямленных значений с открытым и закрытым входах
9. Электронным пиковым вольтметром с открытым и закрытым входам.

При выполнении результатов измерения необходимо привести схему соответствующего детектора с открытым и закрытым входами.

Форма и параметры несинусоидального напряжения

№ варианта	График $U = f(\omega t)$	U	U_{cp}	k_ϕ	k_a	k_u
2	 <p style="text-align: center;">$U_m = 100V$, примем $\alpha = \frac{\pi}{4}$</p>	$U_m \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}$	$U_m \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)$	$\frac{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$	$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}$	$\frac{2\sqrt{2} \sin \alpha}{\alpha \pi \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}$

1 Введение.

Электрические измерения это- измерение электрических величин, таких, как напряжение, сопротивление, сила тока, мощность. Измерения производятся с помощью различных средств - измерительных приборов, схем и специальных устройств. Тип измерительного прибора зависит от вида и размера (диапазона значений) измеряемой величины, а также от требуемой точности измерения. В электрических измерениях используются основные единицы системы СИ: вольт (В), ом (Ом), фарада (Ф), генри (Г), ампер (А) и секунда (с).

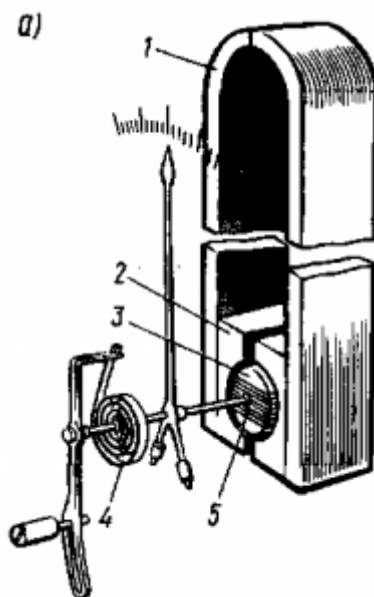
Электрическое измерение - это нахождение (экспериментальными методами) значения физической величины, выраженного в соответствующих единицах (например, 3 А, 4 В). Значения единиц электрических величин определяются международным соглашением в соответствии с законами физики и единицам механических величин. Поскольку "поддержание" единиц электрических величин, определяемых международными соглашениями, сопряжено с трудностями, их представляют "практическими" эталонами единиц электрических величин. Такие эталоны поддерживаются государственными метрологическими лабораториями разных стран. Например, в США юридическую ответственность за поддержание эталонов единиц электрических величин несет Национальный институт стандартов и технологий. Время от времени проводятся эксперименты по уточнению соответствия между значениями эталонов единиц электрических величин и определениями этих единиц. В 1990 государственные метрологические лаборатории промышленно развитых стран подписали соглашение о согласовании всех практических эталонов единиц электрических величин между собой и с международными определениями единиц этих величин. Электрические измерения проводятся в соответствии с государственными эталонами единиц напряжения и силы постоянного тока, сопротивления постоянному току, индуктивности и емкости. Такие эталоны представляют собой устройства, имеющие стабильные электрические характеристики, или установки, в которых на основе некоего физ

ического явления воспроизводится электрическая величина, вычисляемая по известным значениям фундаментальных физических констант. Эталоны ватт а и ватт- часа не поддерживаются, так как более целесообразно вычислять значения этих единиц по определяющим уравнениям, связывающим их с единицами других величин.

2 Краткие сведения об электроизмерительных приборах.

2.1 Устройство и принцип действия с магнитоэлектрической системой.

Магнитоэлектрический измерительный механизм (рис. 2.1,а) выполнен в виде постоянного магнита 1, снабженного полюсными наконечниками 2, между которыми укреплен стальной сердечник 3. В кольцеобразном воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и сердечником, помещена подвижная катушка 5, намотанная на алюминиевый каркас 6 (рис. 2.1,б). Катушка выполнена из очень тонкого провода и укреплена на оси, связанной со стрелкой спиральными пружинами 4 или растяжками. Через эти же пружины или растяжки осуществляется подвод тока к катушке.



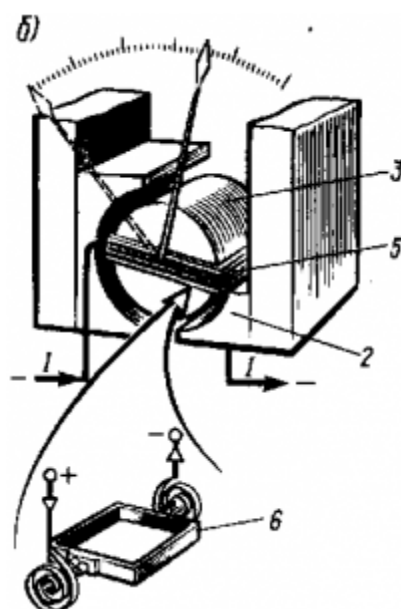


Рис. 2.1-Устройство магнитоэлектрического измерительного механизма

При прохождении тока I по катушке на каждый из ее проводников будет действовать электромагнитная сила. Суммарное действие всех электромагнитных сил создает вращающий момент M , стремящийся повернуть катушку и связанную с ней стрелку прибора на некоторый угол α . Так как индукция B магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, неизменна и не зависит от тока I , то

$$M = c_1 I \quad (1)$$

где c_1 — постоянная величина, зависящая от конструктивных параметров данного прибора (числа витков катушки, ее размеров, индукции B в воздушном зазоре).

Повороту подвижной части измерительного механизма препятствует противодействующий момент $M_{пр}$, создаваемый спиральными пружинами или растяжками. Этот момент пропорционален углу закручивания, т. е. углу поворота α подвижной части; при этом

$$M_{пр} = c_2 \alpha \quad (2)$$

где c_2 — постоянная величина, зависящая от жесткости спиральных пружин или растяжек. Поворот подвижной части измерительного механизма и стрелки будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент M , создаваемый током I , не уравнивается противодействующим моментом $M_{пр}$. В момент равновесия $M = M_{пр}$, откуда получим:

$$\alpha = (c_1/c_2) I = kI \quad (3)$$

Следовательно, угол поворота α подвижной части пропорционален измеряемому току I . Поэтому магнитоэлектрические приборы имеют равномерную шкалу.

Постоянная величина k называется *чувствительностью прибора*, она характеризуется углом поворота стрелки в градусах или в делениях шкалы, приходящимся на единицу изменения измеряемой величины.

Величина, обратная чувствительности, $c=1/k$ называется *постоянной прибора*, или *ценой деления*. Если умножить отсчет по шкале на цену деления прибора c , то можно определить значение измеряемой величины. Для устранения колебаний подвижной системы прибора при переходе стрелки из одного положения в другое электроизмерительные приборы снабжают воздушными или магнитно-индукционными демпферами.

Воздушный демпфер (рис. 2.2, а) выполнен в виде цилиндрической камеры, внутри которой перемещается крыло 1 в виде поршня, связанного с подвижной системой. При перемещении подвижной части происходит торможение движущегося в камере 2 крыла, и колебания подвижной части быстро затухают.

Магнитно-индукционный демпфер (рис. 2.2, б) выполнен в виде неподвижного постоянного магнита 3, который при повороте подвижной системы прибора индуцирует вихревые токи в металлическом (алюминиевом) секторе 4, установленном на оси прибора.

Взаимодействие этих токов с магнитом создает согласно правилу Ленца силу, тормозящую подвижную систему и обеспечивающую быстрое затухание колебаний стрелки. В магнитоэлектрических приборах роль демпфера выполняет алюминиевый каркас 6 катушки (см. рис. 2.1,б). При повороте подвижной части прибора изменяется магнитный поток, пронизывающий каркас катушки. Благодаря этому в каркасе индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем магнита создает тормозной момент, обеспечивающий быстрое успокоение подвижной части.

Для того чтобы любой электроизмерительный прибор обеспечил требуемую точность измерений, необходимо, чтобы отклонение подвижной системы прибора определялось только вращающим моментом, создаваемым катушкой, и противодействующим усилием пружины. Для устранения влияния силы тяжести, создающей погрешности при измерениях, подвижную систему прибора (рис. 2.3) уравнивают противовесами 5 (рис. 2.3, а), представляющими собой стержни с перемещающимися по ним грузиками. Для уменьшения влияния трения оси приборов снабжают тщательно отполированными стальными наконечниками 1, выполненными из материала

с высокой износостойкостью (закаленная сталь, вольфрамо-молибденовый сплав и пр.).

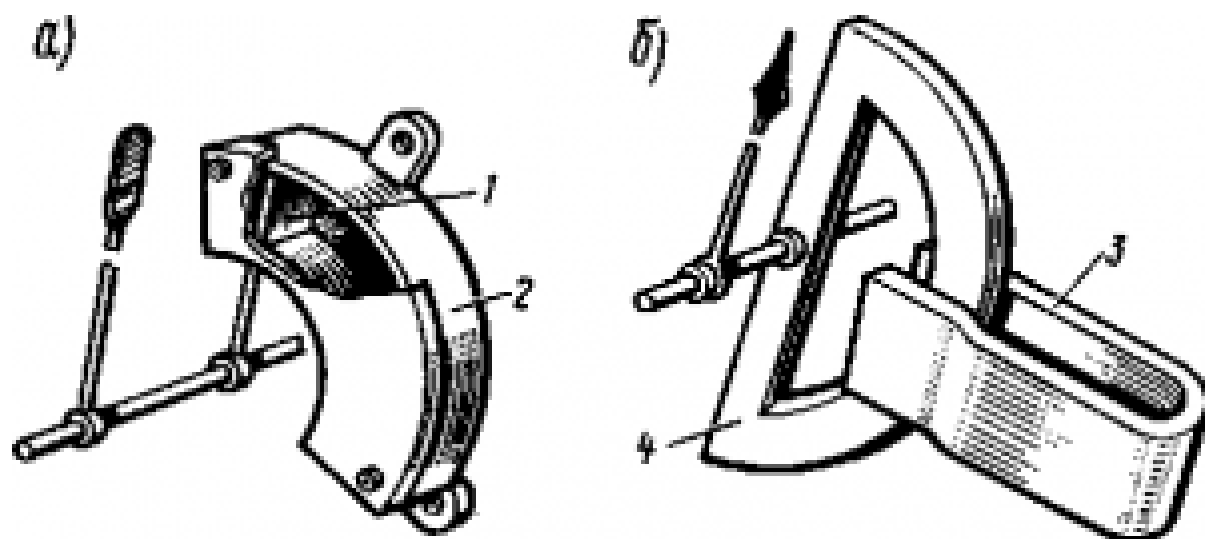


Рис. 2.2- Воздушный (а) и магнитно-индукционный (б) демпферы

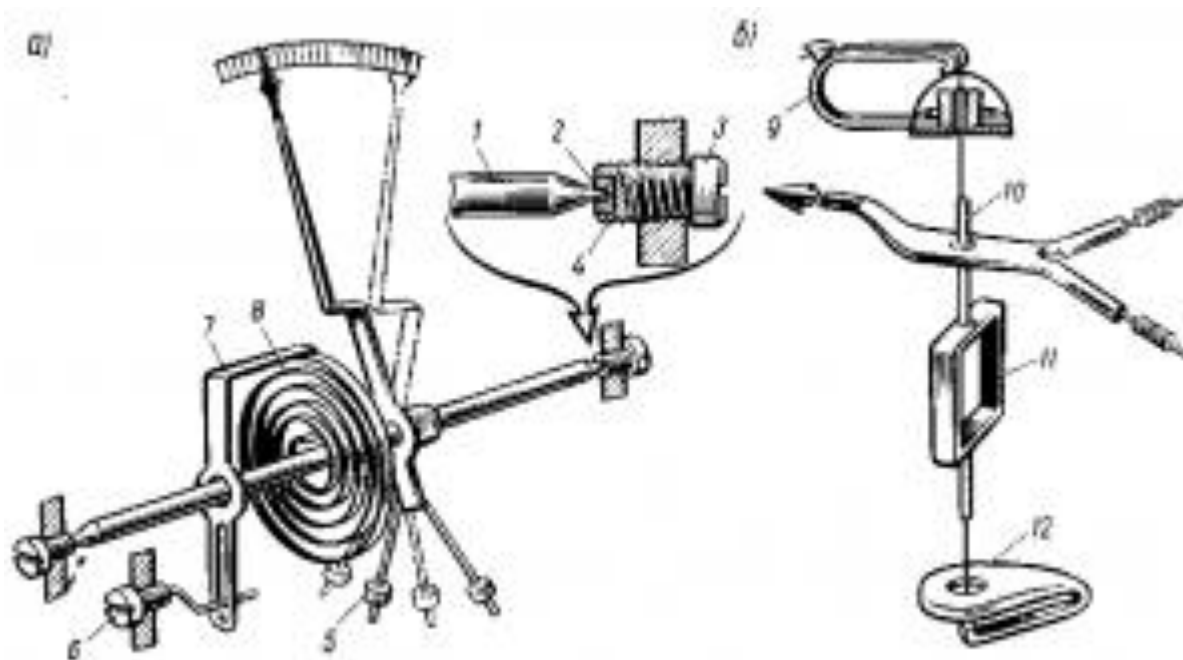


Рис. 2.3- Устройство подвижной части электроизмерительного прибора

Наконечники вращаются в подпятниках 4, выполняемых с вкладышами 2 из корунда, агата, рубина и т. п. Зазоры между наконечниками и подпятником регулируются стопорным винтом 3.

Электроизмерительные приборы обычно снабжают корректором — приспособлением, позволяющим устанавливать стрелку в нулевое положение. Корректор состоит из винта 6, выходящего из корпуса, и поводка 7, при помощи которых можно смещать на некоторое расстояние точку

закрепления спиральной пружины 8, создающей противодействующее усилие. В большинстве современных электроизмерительных приборов подвижная часть 11 подвешивается на двух растяжках 10 — упругих металлических лентах, которые служат для подвода тока к катушке прибора и одновременно создают противодействующий момент (рис. 2.3,б). Растяжки прикреплены к двум плоским пружинам 9 и 12, расположенным во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Кроме рассмотренного выше измерительного механизма с внешним (по отношению к катушке) постоянным П-образным магнитом, существуют механизмы с магнитами другой формы (цилиндрической, в виде призмы, а также с внутрирамочными неподвижными и подвижными магнитами).

2.2 Применение приборов с магнитоэлектрической системой.

Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения тока и напряжения в электрических цепях постоянного тока. В частности, на э.п.с. и тепловозах их используют в качестве амперметров и вольтметров. В амперметрах и вольтметрах катушка прибора имеет различное сопротивление и включается по различным схемам.

Для уменьшения проходящего по катушке тока и компенсации влияния температуры на показания прибора в вольтметрах последовательно с катушкой включают добавочный резистор, который обычно встраивается в корпус прибора. Сопротивление этого резистора значительно больше сопротивления катушки, и он выполнен из материала, электрическое сопротивление которого весьма мало зависит от температуры (константан, манганин и пр.). В амперметрах параллельно катушке прибора часто включают образцовый резистор, называемый шунтом.

Сопротивление шунта значительно меньше сопротивления катушки прибора, вследствие чего измеряемый ток в основном проходит по шунту. Шунты и добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения приборов.

Из принципа действия магнитоэлектрического прибора следует, что направление отклонения его стрелки зависит от направления тока I , проходящего по катушке. Следовательно, при включении этих приборов в цепь постоянного тока должна быть соблюдена правильная полярность, при которой стрелка отклоняется в требуемую сторону. Для переменного тока магнитоэлектрические приборы непригодны, так как при питании катушки переменным током среднее значение создаваемого ею вращающего момента равно нулю и стрелка прибора будет стоять на нуле, испытывая чуть заметные колебания.

Достоинством приборов магнитоэлектрической системы являются равномерность шкалы, высокая точность и независимость показаний от посторонних магнитных полей. К недостаткам их относятся непригодность для измерения переменного тока, необходимость соблюдения полярности при включении и чувствительность к перегрузкам (при перегрузке тонкая проволока катушки и спиральные пружины, подводящие к ней ток, могут сгореть).

2.3 Электронные вольтметры

Электронные вольтметры (ЭВ) бывают постоянного и переменного тока, универсальные.

Вольтметры подразделяются на группы:

- В1 – калибратор;
- В2 – постоянная тока;
- В3 – переменная;
- В4 – импульсный;
- В5 – фазочувствительный;
- В6 – селективный;
- В7 – универсальный;
- В8 – измеритель отношения и разности;
- В9 – преобразователи напряжения;

По принципу работы и устройства бывают: прямого преобразования и уравнивающего. Первые простые, но менее точные, вторые сложнее, но значительно точнее.

Электронные вольтметры классифицируют по следующим признакам:

- а) по способу измерения - приборы непосредственной оценки и сравнения;
- б) по назначению – приборы постоянного, переменного, импульсного напряжений, универсальные и селективные;

в) по характеру измеряемого напряжения – амплитудные (пиковые), действующего и среднего напряжений;

г) по частотному диапазону – низкочастотные и высокочастотные.

2.3.1 Электронные вольтметр постоянного тока

Состоят из входного устройства (ВУ), усилителя постоянного тока (УПТ), измерительного механизма (ИМ).

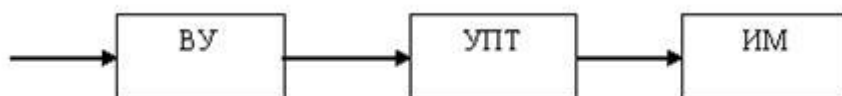


Рис. 2.4- Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока.

Измеряемое напряжение постоянного тока поступает на входное устройство, представляющее собой многопредельный высокоомный резисторный делитель напряжения. Сигнал с ВУ поступает на вход УПТ, который помимо функции усиления сигнала согласует высокое выходное сопротивление ВУ с малым сопротивлением рамки - делителя входного напряжения ИМ магнитоэлектрической системы. Входное сопротивление ЭВ составляет десятки мегаом, что снижает его влияние на объект измерения.

При измерении слабых сигналов начинается сказываться дрейф УПТ, поэтому в электронных микровольтметрах исключают УПТ, постоянный ток преобразуют с помощью модулятора в переменный и используют усилитель переменного напряжения.

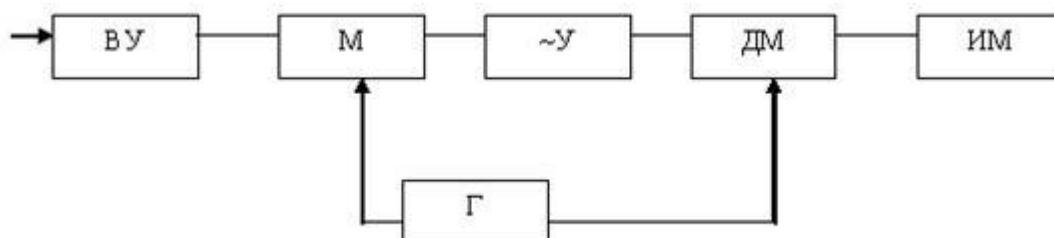


Рис. 2.5- Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока с модуляцией сигнала.

ВУ – входной делитель, предназначен для согласования с нагрузкой (с источником сигнала);

~У – усилитель переменного тока для измерения слабых сигналов;

УПТ – усилитель постоянного тока, характеризуется дрейфом нуля, что ограничивает измерение сверхмалых сигналов;

ИМ – устройство отображения;

М - ДМ – модулятор – демодулятор сигнала;

Г – генератор;

Недостатком усилителей переменного тока является зависимость показаний от частоты сигнала.

Диапазон измеряемых напряжений составляет от микровольт до тысячи вольт; классы точности – 1,5; 2,5, шкала линейная.

2.3.2. Электронные вольтметры переменного тока.

Используются для измерения переменного напряжения, изменяющегося в широком диапазоне по амплитуде и частоте (до гигагерц).

Структурная схема ЭВ может содержать выпрямитель (В), что позволяет существенно расширить частотный диапазон измеряемого сигнала.

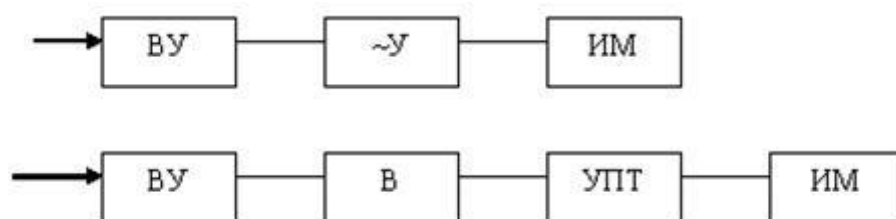


Рис. 2.6.- Структурные схемы электронных вольтметров переменного тока.

Элементная база современных ЭВ основана на использовании полупроводниковых устройств микроинтегрального исполнения.

2.3.3 Универсальные электронные вольтметры.

Предназначенные для измерения различных параметров электрической цепи постоянного (переменного) тока: U, I, R и др. Такие устройства содержат в себе ряд дополнительных блоков, преобразующих измеряемый параметр в напряжение, которое затем измеряется.

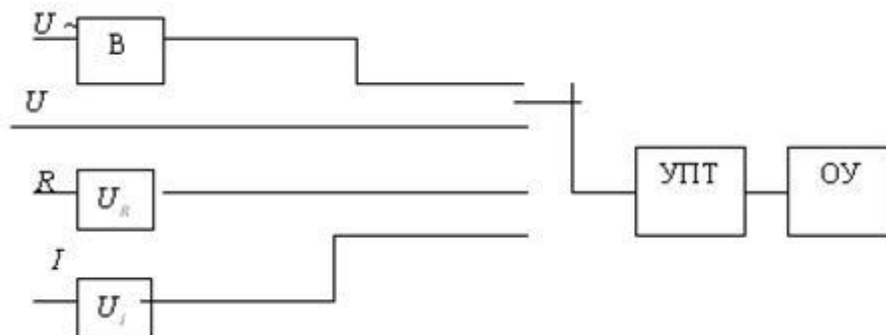
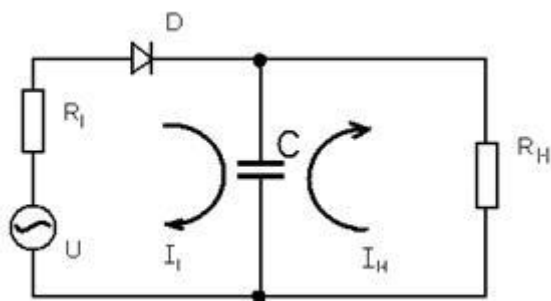


Рис. 2.7- Структурная схема универсального электронного вольтметра.

2.3.4 Импульсные вольтметры.

Используются для измерения импульсных сигналов (амплитуды максимального значения) различной формы с высокой скважностью ($\frac{T}{\tau} = 2 \div 500$, где T - период, τ - длительность сигнала).

Принцип их работы основан на заряде конденсатора от стабилизированного источника и поддержание измеряемого сигнала неизменным во времени на уровне, соответствующем максимальному его значению. Для этого используют усилители с ООС.



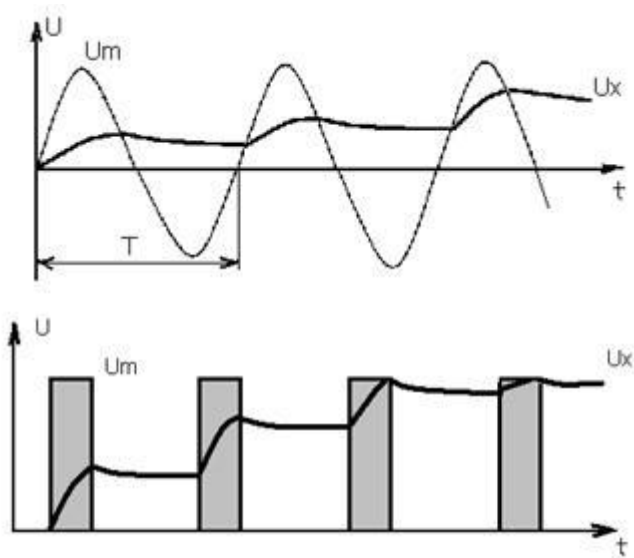


Рис. 2.8- Структурная схема импульсного электронного вольтметра и его временные диаграммы.

Диапазон измерений по частоте у приборов данного типа составляет 20 Гц...1 ГГц, по напряжению 100 мВ...1000 В, класс точности 4,0...10,0. Недостатком прибора является зависимость показаний от формы сигнала.

2.3.5. Селективные электронные вольтметры.

Предназначены для измерения действующих значений напряжений отдельной гармонической составляющих сигналов (периодических сигналов).

Принцип работы таких устройств основан на выделении отдельных гармоник из сигнала, например, с помощью перестраиваемого полосового фильтра или использования принципа гетеродина. Используются также безфильтровые методы спектрального анализа сигнала, в том числе, с использованием цифровой обработки сигналов.

Нужно учитывать, что идеальных фильтров и усилителей не существует, что приводит к искажению передаваемого сигнала, к погрешности его измерений.

Технологически удобно использовать не отдельные фильтры на каждую гармонику, а устройство, состоящее из смесителя сигналов (СМ), получаемых от фильтра полосовой частоты (УПЧ) и перестраиваемого

генератора (Г). Перемножая эти сигналы, можно выделить (для гармонических сигналов) сигналы с разностной и суммарной частотами.

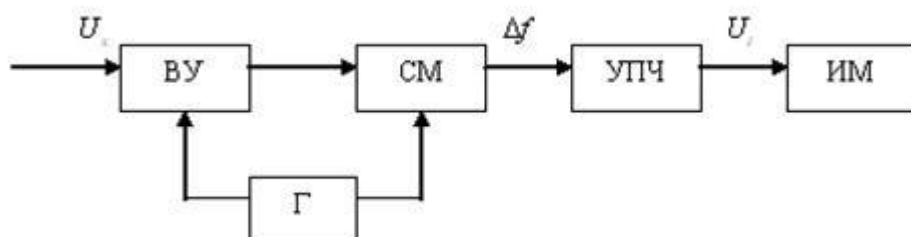


Рис. 2.9- Структурная схема селективного электронного вольтметра.

ИМ – измерительный механизм;

ВУ – входной усилитель;

СМ – смеситель частот;

УПЧ – усилитель промежуточной частоты.

При соблюдении условия $A \approx B$, получим суммарный сигнал на выходе смесителя в виде:

$$A \cdot \cos \omega_1 t + B \cdot \cos \omega_2 t = 2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \quad (4.1)$$

С помощью УПЧ выделяют и усиливают сигнал разностной частоты,

соответствующий огибающей биения колебаний $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$, затем его детектируют и измеряют.

Достоинства: используется один фильтр (полосовой) разностной частоты и один перестраиваемый генератор.

3. Расчетная часть.

3.1. Магнитоэлектрический вольтметр.

Принцип действия магнитоэлектрических приборов основан на взаимодействии поля постоянного магнита и проводников в виде рамки.

Приборы магнитоэлектрической системы реагируют на среднее значение за период (постоянную составляющую измеряемой величины)

$$I_0 = I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt; U_0 = U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt;$$

Для заданного сигнала среднее значение напряжения

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt;$$

Среднее выпрямленное значение напряжения

$$\begin{aligned} U_0 = U_{cp.v} &= \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |u(\omega t)| d\omega t = \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot 4 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\omega t) d\omega t = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{Um}{\alpha} \cdot \omega t d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} Um d\omega t \right] = \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \left[\frac{Um}{\alpha} \cdot \frac{(\omega t)^2}{2} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + [Um \cdot \omega t]_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \right\} = \frac{2Um}{\pi} \cdot \left\{ \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\alpha^2}{2} - 0 \right] + \left[\frac{\pi}{2} - \alpha \right] \right\} = \\ &= \frac{2Um}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) = Um \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \right) = 75 \text{ В}, \\ &\text{при } \alpha = \frac{\pi}{4}, \end{aligned}$$

Обычно всеми приборами (кроме магнитоэлектрических) пользуются для измерения действующих значений синусоидальных величин. Тогда показание магнитоэлектрического вольтметра, проградуированного для измерения постоянной составляющей измеряемой величины,

$$Uv = U_{cp} = 0.$$

У вольтметра с детекторным входом (выпрямительный вольтметр)

$$Uv = U_{cp.v} = 75 \text{ В}.$$

3.2. Выпрямительный вольтметр.

Для измерения напряжения (тока) в цепях повышенной частоты широко применяются выпрямительные приборы, состоящие из

выпрямительного преобразователя и измерительного механизма (рис. 1).

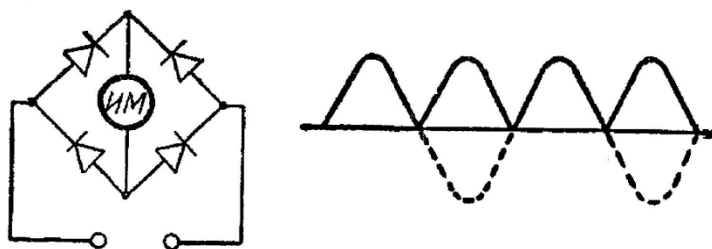


Рис.2.9- Схема двухполупериодного выпрямления

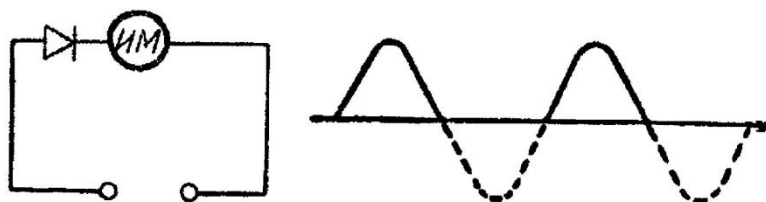


Рис.2.10- Схема однополупериодного выпрямления

Действие приборов основано на преобразовании с помощью диодов измеряемого переменного напряжения (тока) в пропорциональное последнему постоянное напряжение (ток), регистрируемое чувствительным магнитоэлектрическим прибором.

Измеряемый ток (напряжение) любой формы вызывает отклонение подвижной части выпрямительного прибора с магнитоэлектрическим измерителем, пропорциональное средневывпрямленному значению. Шкалу выпрямительных приборов всегда градуируют в среднеквадратических значениях напряжения (тока) синусоидальной формы, хотя момент вращения рамки *магнитоэлектрического* прибора пропорционален среднему значению выпрямленного напряжения.

То есть градуировка произведена для *коэффициента* формы кривой синусоидального тока.

Коэффициент формы кривой синусоидального тока

а) схема двухполупериодного выпрямления

$$K_{\Phi sin} = \frac{U_{ср. кв}}{U_{ср. в}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.111;$$

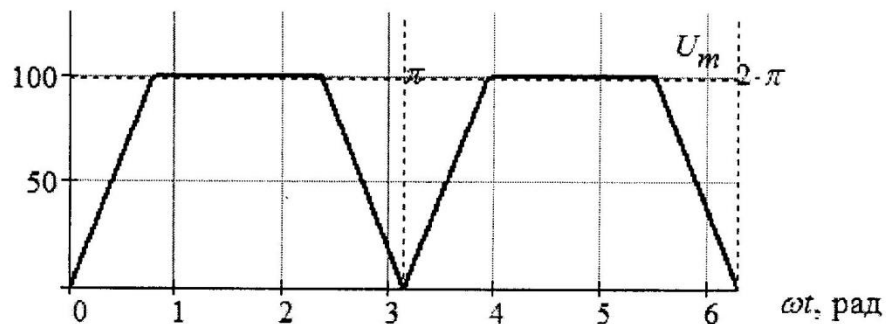
б) схема однополупериодного выпрямления

$$K_{\Phi sin} = \frac{U_{ср. кв}}{U_{ср. в}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \approx 2.222.$$

Коэффициент формы K_{Φ} рассматриваемого сигнала:

- вольтметр выпрямительный с открытым входом

$u(t)$, В

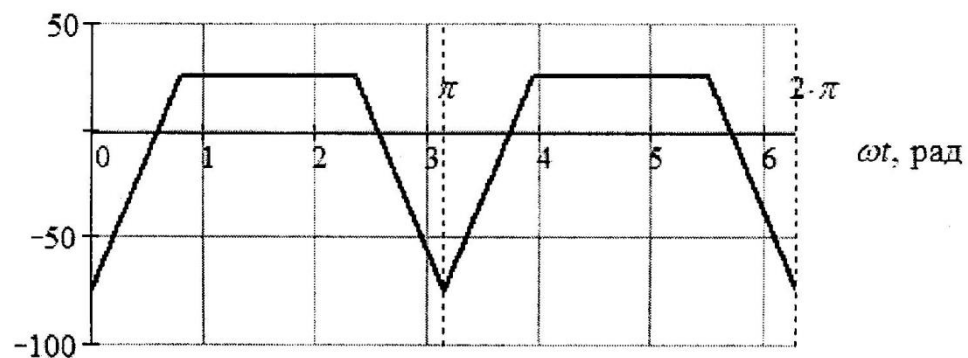


$$\begin{aligned}
 U_{\text{ср.кв}} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^2(\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot 4 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} u^2(\omega t) d\omega t} = \\
 &= \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left[\int_0^{\alpha} \left(\frac{U_m}{\alpha} \cdot \omega t \right)^2 d\omega t + \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} U_m^2 d\omega t \right]} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \left[\frac{U_m^2}{\alpha^2} \cdot \frac{(\omega t)^3}{3} \right]_0^{\alpha} + [U_m^2 \cdot (\omega t)]_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \right\}} = \\
 &= U_m \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{\alpha^3}{3} - 0 \right) + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right]} = U_m \cdot \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}} = \left\{ \alpha = \frac{\pi}{4} \right\} = 100 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{3}} \\
 &= 81.65 \text{ В.}
 \end{aligned}$$

$$K_{\Phi} = \frac{U_{\text{ср.кв}}}{U_{\text{ср}}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}{1 - \frac{\alpha}{\pi}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{3}}}{1 - \frac{1}{4}} = 1.08866.$$

- вольтметр выпрямительный с закрытым входом (без постоянной составляющей)

$u(t)$, В



$$\widetilde{K}_{\Phi} = \frac{\widetilde{U}_{\text{ср.кв}}}{\widetilde{U}_{\text{ср.в}}} = \frac{0.32275 \cdot U_m}{0.28125 \cdot U_m} = 1.1476,$$

где

$$\begin{aligned}
\tilde{U}_{\text{cp.kB}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u - U_0)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} [u(\omega t) - U_0]^2 d\omega t} = \\
&= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot 4 \cdot \int_0^{2\pi} [u(\omega t) - U_0]^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left[\int_0^\alpha \left(\frac{Um}{\alpha} \cdot \omega t - U_0 \right)^2 d\omega t + \int_\alpha^{\frac{\pi}{2}} (Um - U_0)^2 d\omega t \right]} = \\
&= Um \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left[\int_0^\alpha \left(\frac{1}{\alpha} \cdot \omega t - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right)^2 d\omega t + \int_\alpha^{\frac{\pi}{2}} \left(1 - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right)^2 d\omega t \right]} = \\
&= Um \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left[\int_0^\alpha \left(\frac{1}{\alpha^2} \cdot (\omega t)^2 - 2 \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \cdot \omega t + \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \right) d\omega t + \int_\alpha^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 d\omega t \right]} = \\
&= Um \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \left[\frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{(\omega t)^3}{3} - \frac{2}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \cdot \frac{(\omega t)^2}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \cdot \omega t \right]_0^\alpha + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \cdot \omega t \Big|_\alpha^{\frac{\pi}{2}} \right\}} = \\
&= Um \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \left[\frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{\alpha^3}{3} - \frac{2}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \cdot \frac{\alpha^2}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \cdot \alpha \right] + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right\}} = \\
&= Um \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{\alpha}{3} - \alpha + \frac{\alpha^2}{\pi} + \alpha - \frac{2\alpha^2}{\pi} + \frac{\alpha^3}{\pi^2} + \frac{\alpha^2}{2\pi} - \frac{\alpha^3}{\pi^2} \right)} = \\
&= Um \cdot \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{\alpha}{2\pi} \right)} = \left\{ \alpha = \frac{\pi}{4} \right\} = 25 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{8} \right)} = 100 \cdot 0.32275 = 32.28 \text{ B.} \\
\tilde{U}_{\text{cp.B}} &= \frac{1}{T} \int_0^T |\tilde{u}| dt = \frac{1}{T} \int_0^T |u - U_0| dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} |u(\omega t) - U_0| d\omega t = \\
&= \frac{1}{2\pi} \cdot 4 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} |u(\omega t) - U_0| d\omega t = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\int_0^\alpha \left| \frac{Um}{\alpha} \cdot \omega t - U_0 \right| d\omega t + \int_\alpha^{\frac{\pi}{2}} |Um - U_0| d\omega t \right] = \\
&= \frac{2Um}{\pi} \cdot \left[\int_0^\alpha \left| \frac{1}{\alpha} \cdot \omega t - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right| d\omega t + \int_\alpha^{\frac{\pi}{2}} \left| 1 - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right| d\omega t \right] = \\
&= \frac{2Um}{\pi} \cdot \left[\int_0^{\alpha(1-\frac{\alpha}{\pi})} \left| \frac{1}{\alpha} \cdot \omega t - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right| d\omega t + \int_{\alpha(1-\frac{\alpha}{\pi})}^\alpha \left| \frac{1}{\alpha} \cdot \omega t - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right| d\omega t + \int_\alpha^{\frac{\pi}{2}} \left| \frac{\alpha}{\pi} \right| d\omega t \right] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2Um}{\pi} \cdot \left[\int_0^{\alpha(1-\frac{\alpha}{\pi})} \left| -\frac{1}{\alpha} \cdot \omega t + \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right| d\omega t + \int_{\alpha(1-\frac{\alpha}{\pi})}^{\alpha} \left| \frac{1}{\alpha} \cdot \omega t - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right| d\omega t + \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \left| \frac{\alpha}{\pi} \right| d\omega t \right] = \\
&= \frac{2Um}{\pi} \cdot \left\{ \left[-\frac{(\omega t)^2}{2\alpha} + \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \omega t \right]_0^{\alpha(1-\frac{\alpha}{\pi})} + \left[\frac{(\omega t)^2}{2\alpha} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \omega t \right]_{\alpha(1-\frac{\alpha}{\pi})}^{\alpha} + \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right\} = \\
&= \frac{2Um}{\pi} \cdot \left\{ \left[-\frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right] + \right. \\
&\quad \left. + \left[\left(\frac{\alpha}{2} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \alpha \right) - \left(\frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2 - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \right) \right] + \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right\} = \\
&= Um \cdot \frac{2\alpha}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2 = \left\{ \alpha = \frac{\pi}{4} \right\} = 25 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4}\right)^2 = 100 \cdot 0.28125 = 28.13 \text{ В}.
\end{aligned}$$

Показание вольтметра с выпрямительной однополупериодной схемой:

- С открытым входом

$$U_{V \text{ откр}} = \frac{K_{\Phi} \sin}{K_{\Phi}} \cdot U_{\text{ср.кв}} = \frac{\frac{\pi}{\sqrt{2}}}{1.08866} \cdot 0.81650 \cdot Um = \frac{2.222}{1.08866} \cdot 0.81650 \cdot 100 = 166.65 \text{ В}$$

или (через значение коэффициента градуировки)

$$U_{V \text{ откр}} = C \cdot U_{\text{ср.в}} = 2.222 \cdot U_{\text{ср.в}} = 2.222 \cdot 75 = 166.65 \text{ В};$$

- с закрытым входом

$$U_{V \text{ закр}} = \frac{K_{\Phi} \sin}{\tilde{K}_{\Phi}} \cdot \tilde{U}_{\text{ср.кв}} = \frac{\frac{\pi}{\sqrt{2}}}{1.1476} \cdot 0.32275 \cdot Um = \frac{2.222}{1.1476} \cdot 0.32275 \cdot 100 = 62.49 \text{ В}$$

или (через значение коэффициента градуировки)

$$U_{V \text{ закр}} = C \cdot \tilde{U}_{\text{ср.в}} = 2.222 \cdot 0.28125 \cdot U_m = 2.222 \cdot 0.28125 \cdot 100 = 62.49 \text{ В}.$$

Показание вольтметра с выпрямительной двухполупериодной схемой:

- с открытым входом

$$U_{V \text{ откр}} = \frac{K_{\Phi} \sin}{K_{\Phi}} \cdot U_{\text{ср.кв}} = \frac{\frac{\pi}{2\sqrt{2}}}{1.08866} \cdot 0.81650 \cdot Um = \frac{1.111}{1.08866} \cdot 0.81650 \cdot 100 = 83.33 \text{ В}$$

или (через значение коэффициента градуировки)

$$U_{V \text{ откр}} = C \cdot U_{\text{ср.в}} = 1.111 \cdot U_{\text{ср.в}} = 1.111 \cdot 75 = 83.33 \text{ В}$$

- с закрытым входом

$$U_{V \text{ закр}} = \frac{K_{\Phi} \sin}{\tilde{K}_{\Phi}} \cdot \tilde{U}_{\text{ср.кв}} = \frac{\frac{\pi}{2\sqrt{2}}}{1.1476} \cdot 0.32275 \cdot Um = \frac{1.111}{1.1476} \cdot 0.32275 \cdot 100 = 31.25 \text{ В}$$

или (через значение коэффициента градуировки)

$$U_{V \text{ закр}} = C \cdot \tilde{U}_{\text{ср.в}} = 1.111 \cdot 0.28125 \cdot U_m = 1.111 \cdot 0.28125 \cdot 100 = 31.25 \text{ В}.$$

3.3 Электромагнитный вольтметр

Приборы электромагнитной системы реагируют на действующее значение (среднеквадратичное значение) измеряемой величины.

Обычно приборы электромагнитной системы проградуированы в действующих значениях синусоидальных величин.

Тогда показание вольтметра равно среднеквадратичному значению периодического несинусоидального сигнала

$$U_v = U_{\text{ср.кв}} = U_m \cdot \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}} = \left\{ \alpha = \frac{\pi}{4} \right\} = 100 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{3}} = 100 \cdot 0.8165 = 81.65 \text{ В.}$$

3.4 Электродинамический вольтметр

Вольтметр электродинамической системы откликается на среднеквадратическое напряжение и отградуирован в среднеквадратических значениях для гармонического сигнала.

Тогда показание вольтметра равно среднеквадратическому значению периодического несинусоидального сигнала

$$U_v = U_{\text{ср.кв}} = 81.65 \text{ В.}$$

3.5 Электростатический вольтметр

Электростатический вольтметр принципиально пригоден для измерения действующего значения переменного напряжения.

Тогда показание вольтметра равно среднеквадратичному значению периодического несинусоидального сигнала

$$U_v = U_{\text{ср.кв}} = 81.65 \text{ В.}$$

3.6 Электронный вольтметр с амплитудным детектором при открытом и закрытом входе

Действие вольтметра основано на преобразовании измеряемого переменного напряжения (тока) в пропорциональное последнему постоянное напряжение (ток), регистрируемое амплитудным (пиковым) детектором.

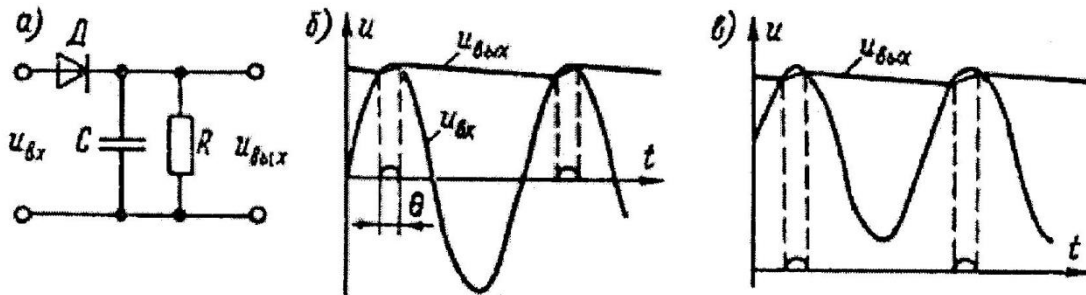


Рис.2.10-Схема (а) и временные диаграммы сигналов (б и в) преобразователя амплитудных значений (пикового детектора) с открытым входом.

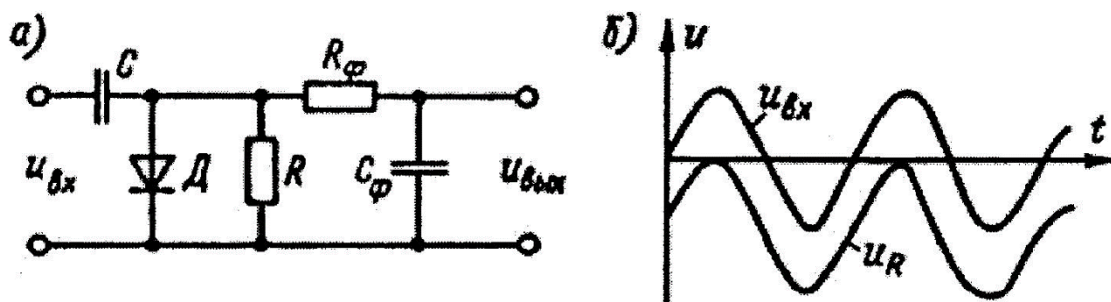


Рис.2.11-Схема (а) и временные диаграммы сигналов (б) преобразователя амплитудных значений с закрытым входом

Шкала электронного вольтметра с амплитудным детектором проградуирована в среднеквадратических значениях напряжения (тока) синусоидальной формы.

То есть градуировка произведена для коэффициента амплитуды кривой синусоидального тока.

Показание вольтметра с амплитудным детектором:

- с открытым входом

$$U_{V \text{ откр}} = \frac{U_m}{K_{a \sin}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{100}{1.414} = 70.7 \text{ В};$$

или (через значение коэффициента градуировки)

$$U_{V \text{ откр}} = C \cdot U_m = 0.707 \cdot 100 = 70.7 \text{ В};$$

- с закрытым входом

$$U_{V \text{ закр}} = \frac{\tilde{U}_m}{K_{a \sin}} = \frac{U_m - U_{cp}}{K_{a \sin}} = \frac{100 - 75}{1.414} = 17.7 \text{ В}$$

или (через значение коэффициента градуировки)

$$U_{V \text{ закр}} = C \cdot \tilde{U}_m = C \cdot (U_m - U_{cp}) = 0.707 \cdot 25 = 17.7 \text{ В},$$

где коэффициенты амплитуды гармонического (синусоидальной формы) сигнала

$$K_{a \sin} = \frac{U_m}{U_{cp.кв}} = \sqrt{2}.$$

3.7 Электронный вольтметр с детектором действующих значений при открытом и закрытом входе

Показания вольтметра с преобразователем среднеквадратического значения равны измеряемому действующему напряжению для любой формы измеряемого сигнала

$$U_{cp.кв} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi} \cdot U_m} = \left\{ \alpha = \frac{\pi}{4} \right\} = \sqrt{1 - \frac{1}{3}} \cdot 100 = 0.8165 \cdot 100 = 81.7 \text{ В}.$$

При закрытом входе показание такого вольтметра равно среднеквадратическому значению переменной составляющей сигнала

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{cp.кв} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u - U_0)^2 dt} = U_m \cdot \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{\alpha}{2\pi} \right)} = \\ &= \left\{ \alpha = \frac{\pi}{4} \right\} = 25 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{8} \right)} = 100 \cdot 0.32275 = 32.3 \text{ В}. \end{aligned}$$

3.8 Электронный вольтметр с детектором среднев्यпрямленных значений с открытым и закрытым входами

Показания вольтметра с детектором среднев्यпрямленных значений равны:

- с открытым входом

$$U_{V \text{ откр}} = U_{cp.в} \cdot K_{\phi \sin} = 75 \cdot 1.111 = 83.3 \text{ В};$$

- с закрытым входом

$$U_{V \text{ закр}} = \tilde{U}_{cp.в} \cdot K_{\phi \sin} = 28.13 \cdot 1.111 = 31.3 \text{ В}.$$

3.9 Электронный пиковый вольтметр с открытым и закрытым входами

Показания пикового вольтметра равны:

- с открытым входом

$$U_{v \text{ откр}} = U_m = 100 \text{ В.}$$

- с закрытым входом

$$U_{v \text{ закр}} = \widetilde{U}_m = U_m - U_{cp} = 100 - 75 = 25 \text{ В.}$$

4 Вывод

При несинусоидальной кривой тока или напряжения приборы различных систем будут вести себя по-разному и могут давать неодинаковые результаты измерения при одном и том же значении измеряемой величины.

Обычно всеми приборами (кроме магнитоэлектрических) пользуются для измерения действующих значений синусоидальных величин, и поэтому шкалы этих приборов градуируются в действующих значениях синусоидальных величин.

Так, в выпрямительных приборах шкалы градуируются на напряжение $U = 1.11U_{cp}$, в амплитудных электронных вольтметрах на $U = 0.707U_m$. Так как отношения U, U_{cp} и U_m при несинусоидальной форме кривой отличаются от значений коэффициентов 1.11 и $\sqrt{2}$ (для синусоиды), то выпрямительные и электронные приборы дают большую погрешность при измерении действующих значений несинусоидальной величины.

В работе найден результат измерения несинусоидального напряжения (таблица №1) следующими приборами:

1. Магнитоэлектрическим вольтметром
2. Выпрямительным вольтметром
3. Электромагнитным вольтметром
4. Электродинамическим вольтметром
5. Электростатическим вольтметром

6. Электронным вольтметром с амплитудным детектором при открытом и закрытом входе

7. Электронным вольтметром с детектором действующих значений при открытом и закрытом входе

8. Электронным вольтметром с детектором средневыпрямленных значений с открытым и закрытым входах

9. Электронным пиковым вольтметром с открытым и закрытым входам

Результаты расчетов представлены в таблице 2

Список литературы

1. Метрология и радиоизмерения. Учебник для ВУЗов. Под ред. В.И.Нефедова. СОЛОН, СПб, 2002 г., 415с.
2. В.А.Головин, Б.В.Сухинин, Е.И.Феофилов. Измерение в энергоснабжении. Учебное пособие Изд-во ТулГУ. 2009. -92с.