

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

### Тема: ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Цель работы:** Определение эксплуатационных характеристик измерительных приборов электромеханических систем

#### Порядок выполнения практической работы

1. Ознакомиться с теоретическим материалом.
2. Выполнить индивидуальные задания и оформить отчет в соответствии с едиными требованиями к оформлению текстовых и графических документов.

#### Указания к выполнению заданий

В заданиях каждый студент после ознакомления с теоретическим материалом должен решить задачи в соответствии с номером своего варианта (таблица 1).

Номер варианта индивидуального задания соответствует порядковому номеру студента в списке группы.

Отчёт по практической работе должен содержать решения задач (образец оформления решения задачи приведен в Приложении 4).

Отчёт оформляют на листе формата А4 (по возможности с использованием оформления ПЭВМ).

Таблица 1

#### Задачи к индивидуальным заданиям

Вариант	Номер задач
1	2
1	1,26
2	14,39
3	2,27
4	15,40
5	3,28
6	16,41
7	4,29
8	17,42
9	5,30
10	18,43
11	6,31
12	19,44
13	7,32
14	1,20
15	8,33

1	2
16	2,9
17	21,34
18	3,10
19	22,35
20	4,11
21	23,36
22	5,12
23	24,37
24	6,13
25	25,38

### 1. Основные определения и формулы

Измерительный прибор представляет собой совокупность преобразовательных элементов, образующих измерительную цепь (ИЦ) и измерительного механизма (ИМ).

ИЦ служит для преобразования измеряемой электрической величины в ток или напряжение, непосредственно воздействующие на ИМ. В ИМ происходит преобразование электромагнитной энергии в механическую энергию перемещения подвижной части ИМ.

При измерении электрической величины на подвижную часть ИМ действует вращающий момент

$$M_{вр} = dW_{эл. магн.}/d\alpha, (1)$$

где  $W_{эл. магн}$  – энергия электромагнитного поля в ИМ, Дж;

$\alpha$  – угол поворота подвижной части ИМ, дел.

Противодействующий момент  $M_{пр}$  в большинстве случаев создается закручиванием (раскручиванием) спиральных пружин, растяжек или подвеса и равен:

$$M_{пр} = \alpha\omega_{y\partial}, (2)$$

где  $\omega_{y\partial}$  – удельный противодействующий момент, Н м/° или Н м/рад.

Под действием этих моментов подвижная часть ИМ отклоняется на угол  $\alpha$  до достижения статического равновесия, определяемого условием:

$$M_{вр} = -M_{пр}, (3)$$

Уравнение шкалы (градуировочная характеристика) ИМ:

$$\alpha = F(x), (4)$$

где  $x$  – значение тока или напряжения, подводимого к ИМ.

Производная от перемещения указателя по измеряемой величине называется абсолютной чувствительностью прибора

$$S = d\alpha/dx. (5)$$

Чувствительность прибора имеет размерность, зависящую от характера измеряемой величины, т.е. чувствительность к току (к напряжению).

Если уравнение шкалы (4) является уравнением первой степени, то  $S$  не зависит от  $\alpha$  и одинакова по всей длине шкалы. В этом случае шкала имеет равномерную градуировку и  $S$  можно представить из отношения

$$S = \alpha_{\text{ном}}/x_{\text{ном}}, (6)$$

где  $\alpha_{\text{ном}}$  – полное (номинальное количество делений шкалы;

$x_{\text{ном}}$  – номинальное значение измеряемой электрической величины (предел измерения).

Для нелинейных уравнение шкалы чувствительность находят как производную этой функции по измеряемой величине

$$S = d\alpha/dx = F'(x)$$

Практически чувствительность удобно определять пользуясь конечными, но достаточно малыми значениями изменений  $\Delta\alpha$  и  $\Delta x$ . Тогда  $S$  равна:

$$S = \Delta\alpha/\Delta x. (7)$$

Размерность чувствительности зависит от характера измеряемой величины, т.е. чувствительность по току

$$S_I = \Delta\alpha/\Delta I, \frac{\text{дел}}{\text{А}} (8)$$

чувствительность по напряжению

$$S_U = \Delta\alpha/\Delta U, \frac{\text{дел}}{\text{В}} (9)$$

или чувствительность по мощности

$$S_P = \Delta\alpha/\Delta P, \frac{\text{дел}}{\text{Вт}} (10)$$

где  $\Delta U = \Delta I R_{\text{им}}$  – изменение падения напряжения на зажимах ИМ;

$\Delta P = \Delta I^2 R_{\text{им}}$  – изменение мощности, подводимой к ИМ;

$R_{\text{им}}$  – сопротивление катушки ИМ.

Постоянная прибора (цена деления) равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкал

$$C = 1/S = \frac{\Delta x}{\Delta\alpha}. (11)$$

Если шкала прибора равномерная, то значение измеряемой величины  $x$  можно вычислить пользуясь значением  $C$

$$x = C \alpha. (12)$$

Для ваттметров, градуированных в условных делениях без указания их значений в ваттах, постоянная  $C_P$  определяется:

$$C_P = \frac{U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}}}{\alpha_{\text{НОМ}}}, \quad (13)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$ ,  $I_{\text{НОМ}}$  – пределы измерения ваттметра по напряжению и току;

$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$  – номинальное значение  $\cos\varphi$ , на которое рассчитан ваттметр.

Приведенные определения чувствительности и постоянной не распространяются на интегрирующие приборы, например счетчик электрической энергии. Номинальная постоянная  $C_W$  счетчика – величина обратная его передаточному числу  $A$ :

$$C_W = \frac{1}{A}, \text{ кВт.ч/об} \quad (14)$$

где  $A$  – количество оборотов диска, соответствующее 1кВт.ч регистрируемой энергии

При включении измерительного прибора в цепь прибор потребляет от этой цепи энергию, темп потребления которой определяется мощностью измерительной цепи прибора. Например, мощность измерительной цепи амперметра

$$P_A = I_A^2 R_A, \text{ Вт} \quad (15)$$

где  $I_A$  – ток в последовательной цепи, А;

$R_A$  – сопротивление этой цепи, Ом.

для вольтметров

$$P_V = \frac{U_V^2}{R_V}, \text{ Вт} \quad (16)$$

где  $U_V$  – напряжение на зажимах параллельной цепи. В;

$R_V$  – сопротивление этой цепи, Ом.

Двухобмоточные приборы (ваттметры, счетчики электрической энергии) имеют раздельные собственные мощности измерительных цепей токовой цепи (последовательной) и цепи напряжения (параллельной).

Погрешность измерительных приборов (инструментальная) является важной метрологической характеристикой, которая определяет область их применения.

Основная погрешность обусловлена свойствами и качеством изготовления приборов, определяется в нормальных условиях работы последних и учитывается при их градуировке.

Для количественной оценки основной погрешности задается одно из её значений: абсолютная, относительная или приведенная.

Основная абсолютная погрешность  $\Delta x$  вычисляется по формуле:

$$\Delta x \cong x_{\text{рез}} - x_{\text{дейст}}. \quad (17)$$

где  $x_{\text{рез}}$  – результат измерения прибором;

$x_{\text{дейст}}$  – действительное значение измеряемой величины.

Абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком, называется поправкой  $C$

$$C = -\Delta x \quad (18)$$

или

$$X_{\text{испр}} = X_{\text{рез}} \pm C. \quad (19)$$

Относительная погрешность  $\delta$  определяется как отношение

$$\delta = \pm \frac{\Delta x}{x_{\text{рез}}} 100, \%$$

Приведенная погрешность  $\gamma$  выражается в процентах от конечного (номинального) значения рабочей части шкалы измерительного прибора  $x_H$ :

$$\gamma = \pm \frac{\Delta x}{x_H} 100, \% \quad (20)$$

Для приборов, имеющих нулевую отметку в начале шкалы,  $x_H$  равно номинальному значению измеряемой величины (диапазону измерений). Если прибор имеет двухстороннюю шкалу, то в качестве  $x_H$  принимается сумма пределов измерений по обе стороны от нуля. Для безнулевых шкал – разности конечного и начального значений шкалы, а для шкал с гиперболическим, логарифмическим, степенным характером изменения делений – длина шкалы.

Округлением  $\gamma$  до ближайшего большего стандартного значения получают класс точности Кл прибора. Точность электроизмерительных приборов определяется классом точности. ГОСТ 8.401-80 ГСИ устанавливает восемь классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Максимально допустимую (нормированную) абсолютную погрешность измерений можно найти, зная класс точности прибора

$$\Delta x_{\text{ном}} = \pm \text{Кл} \frac{x_H}{100}, \quad (21)$$

откуда относительная погрешность измерений прибора равна

$$\delta = \pm \text{Кл} \frac{x_H}{x_{\text{рез}}} 100, \% \quad (22)$$

## 1.2. Приборы магнитоэлектрической системы

Магнитоэлектрический образует плоской катушкой, которая может вращаться в равномерном радиально-симметричном магнитном поле постоянного магнита (рис. 1).

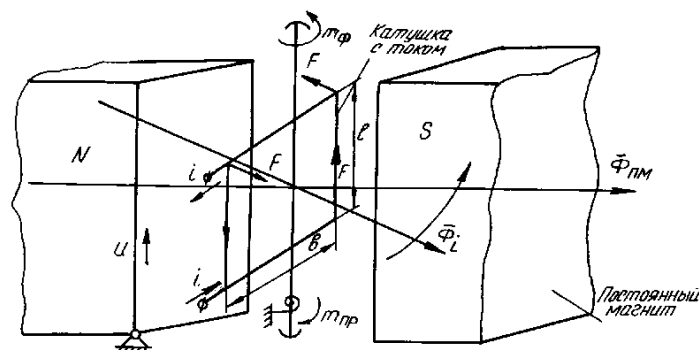


Рис. 1. К объяснению принципа действия прибора магнитоэлектрической системы

При подаче напряжения  $u$  на подвижную катушку по последней начинает протекать ток  $i$  и создается магнитное поле  $\Phi_i$ , направление которого определяется правилом «правого винта». Это поле взаимодействует с неподвижным магнитным полем, образованным постоянным магнитом  $\bar{\Phi}_{н.м.}$ . В результате взаимодействия двух магнитных полей подвижная часть прибора стремится занять такое положение, чтобы результирующее магнитное поле было максимально

$$\bar{\Phi}_{рез} = \bar{\Phi}_{н.м.} + \bar{\Phi}_i \Rightarrow \max. \quad (23)$$

Так как подвижная часть измерительного механизма инерционна, то она будет реагировать (откликаться) на среднее значение вращающего момента:

$$M_{вр.ср} = wBSi = \Phi wi = \psi i, \quad (24)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;  
 $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  
 $i$  – ток, протекающий по катушке, А  
 $w$  – число витков катушки;  
 $S$  – площадь катушки, м<sup>2</sup>;  
 $\psi$  – потокосцепление, Вб.

Противодействующий момент создается пружинами

$$M_{пр} = \alpha \omega_{y\partial}. \quad (25)$$

В момент равновесия вращающий момент уравнивается противодействующим, и выражение для градуировочной характеристики выглядит следующим образом:

$$\alpha \omega_{y\partial} = \psi i. \quad (26)$$

Градуировочная характеристика прибора имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{1}{\omega_{y\partial}} \Psi i = S_i i, \quad (27)$$

где  $S_i = \frac{1}{\omega_{y\partial}} \Psi$  – чувствительность прибора.

Так как подвижная часть механизма реагирует на среднее значение вращающего момента, которое для периодически изменяющихся сигналов  $i = I_m \sin \omega t$ , среднее значение которого за период  $T$  равно нулю, поворота подвижной рамки не произойдет, т.к.

$$M_{вр.ср} = \psi i = \psi \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = 0. \quad (28)$$

Поэтому магнитоэлектрические приборы используются в цепях постоянного тока. Для использования магнитоэлектрических приборов в цепях периодически изменяющихся сигналов применяются различного типа преобразователи.

### 1.2.1. Магнитоэлектрические приборы с выпрямительными преобразователями

**Полезная информация:** Магнитоэлектрические приборы с выпрямительными преобразователями – это приборы, в которых магнитоэлектрический измерительный механизм сочетается с полупроводниковыми выпрямителями.

Выпрямительные преобразователи используют для преобразования переменного

напряжения  $u(t) = U_m \sin \omega t$  (тока  $i(t) = I_m \sin \omega t$ ) в постоянное напряжение (ток).

Напряжение (ток) на выходе выпрямителя могут быть пропорциональными одной из трех величин измеряемого сигнала:

- среднему по модулю (средневыпрямленному  $U_{\text{ср.в}}$ ) значению

$$U_{\text{ср.в}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt;$$

- действующему (среднеквадратическому) значению

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

- амплитудному (пиковому) значению  $U_m$ .

Соотношения между указанными величинами называются

- коэффициент формы кривой

$$K_\phi = \frac{U}{U_{\text{ср.в}}};$$

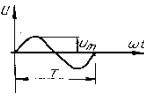
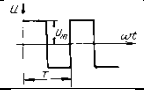
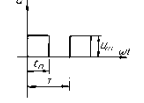
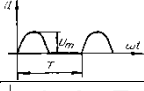
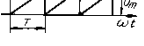
- коэффициент амплитуды

$$K_a = \frac{U_m}{U}.$$

Если форма входного сигнала (напряжения, тока) известна, то известны и указанные соотношения (см. табл. 1).

Таблица 1

Формы гармонических сигналов

Форма сигнала	Среднее значение, $U_{\text{ср}}$	Средневыпрямленное значение, $U_{\text{ср.в}}$	Действующее значение, $U$	Коэффиц. Формы, $K_\phi$
	0	$U_{\text{ср.в}} = 2U_m/\pi = 0,637 U_m$	$U = U_m/\sqrt{2} = 0,707 U_m$	1,11
	0	$U_{\text{ср.в}} = U = U_m$	$U = U_{\text{ср.в}} = U_m$	1
	$U_{\text{ср.в}}$	$U_{\text{ср.в}} = D \cdot 1/D^2 \cdot U_m;$ $D = T/t_n$	$U = \sqrt{D - 1/D^2} \cdot U_m$	$U/U_{\text{ср.в}}$
	$U_{\text{ср.в}}$	$U_{\text{ср.в}} = U_m/\pi = 0,319 U_m$	$U = 0,5 U_m$	1,567
	$U_{\text{ср.в}}$	$U_{\text{ср.в}} = 0,5 U_m$	$U = U_m/\sqrt{3} = 0,578 U_m$	1,15

В реальных условиях форма исследуемого сигнала может в значительной степени отличаться от синусоиды. Следовательно, несоответствие реального коэффициента формы принимаемому при градуировке шкалы прибора  $K_\phi = 1,11$  приводит к возникновению дополнительных погрешностей.

### 1.2.1.1. Выпрямительные преобразователи среднего по модулю (средневыпрямленного) значения

Принципиальная схема однополупериодного выпрямления приведена на рис.2, а на

рис. 3 – временные диаграммы, поясняющие работу этой схемы.

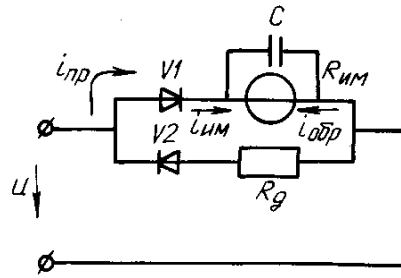


Рис. 2. Схема магнитоэлектрического прибора с однополупериодным выпрямлением

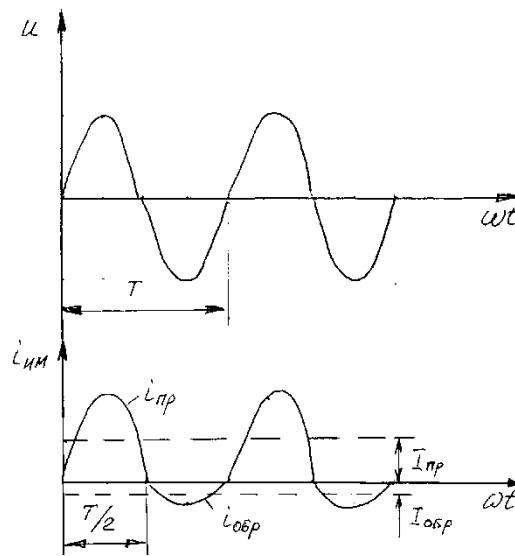


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие однополупериодное выпрямление

При положительной полуволне приложенного напряжения ток, протекающий через измерительный механизм ( $i_{пр}$ ), определяется сопротивлением измерительного механизма  $R_{изм}$ , сопротивление выпрямителя  $V1$  в прямом направлении равно нулю.

При отрицательной полуволне приложенного напряжения ток, протекающий через измерительный механизм ( $i_{обр}$ ), определяется сопротивлением выпрямителя  $V1$  в обратном направлении, равном бесконечности.

Среднее (средневыпрямленное) значение тока через измерительный механизм за период ( $T$ )

$$I_{cp}(I_{cp.в}) = I_{пр} \quad I_{обр} = I_{пр} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{T} \int_0^{\pi} \sin \omega t dt =$$

$$= \frac{1}{T} \frac{I_m}{\omega} \left| -\cos \omega t \right|_0^{\pi} = \left( 1 - (-1) \right) \frac{T}{2\pi} \frac{I_m}{T} = \frac{I_m}{\pi} = 0,319 I_m. \quad (29)$$

Тогда среднее значение вращающего момента за период ( $T$ )

$$M_{cp} = \psi I_{cp.в}. \quad (30)$$

Противодействующий момент, создаваемый пружинами,



$$M_{np} = \alpha \omega_{y\partial}. \quad (31)$$

В момент равновесия вращающий момент уравновешивается противодействующим, и выражение для градуировочной характеристики выглядит следующим образом:

$$\alpha = (1/\omega_{y\partial}) \psi I_{cp.v} = S_I I_{cp.v}, \quad (32)$$

где  $S_I = (1/\omega_{уд}) \psi$  - чувствительность по току.

Шкалы приборов градуируются в действующих значениях измеряемого параметра, которые связаны со средневыпрямленным коэффициентом формы

$$K_\phi = I/I_{cp.v}. \quad (33)$$

Тогда

$$\alpha = S_I \frac{1}{K_\phi} I. \quad (34)$$

Поэтому при использовании магнитоэлектрического механизма с выпрямительным преобразователем необходимо учитывать коэффициент формы, который зависит от формы исследуемого сигнала. При изготовлении шкал приборов на заводе-изготовителе коэффициент формы для синусоидального сигнала принимают равным 1.11.

В реальных условиях форма исследуемого сигнала может в значительной степени отличаться от синусоиды. Следовательно, несоответствие реального коэффициента формы принимаемому при градуировке шкалы прибора ( $K_\phi=1,11$ ) приводит к возникновению дополнительных погрешностей.

Другим параметром, влияющим на величину дополнительных погрешностей измерений приборами выпрямительной системы, является коэффициент выпрямления:

$$K_\theta = I_{np}/I_{обр} = R_{обр}/R_{np}. \quad (35)$$

В реальных условиях коэффициент выпрямления не равен бесконечности, т.к. в обратном направлении протекает незначительный ток, и как следствие этого, средневыпрямленный ток

$$I_{cp.v.} = (I_{np} - I_{обр}) = I_{np} (1 - I_{обр}/I_{np}) = I_{np} (1 - 1/K_\theta). \quad (36)$$

В свою очередь, коэффициент выпрямления  $K_\theta$  зависит от температуры окружающей среды, частоты и амплитуды исследуемого сигнала.

При увеличении температуры окружающей среды сопротивление выпрямителя в обратном направлении  $R_{обр}$  растет медленнее, чем в прямом  $R_{np}$ . Следовательно, коэффициент выпрямления будет уменьшаться. Отсюда, угол поворота подвижной части прибора будет меньше:

$$\alpha = S_I I_{np} (1 - 1/K_\theta) = S_I I_{np} (1 - R_{np}/R_{обр}). \quad (37)$$

При увеличении частоты исследуемого сигнала вследствие увеличения обратного тока  $I_{обр}$ , протекающего через выпрямитель, уменьшится коэффициент выпрямления, и, как следствие, этот угол поворота подвижной части тоже уменьшится:

$$\alpha = S_I I_{np} (1 - I_{обр}/I_{np}). \quad (38)$$

Вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики выпрямителя с ростом

амплитуды измеряемого напряжения коэффициент выпрямления увеличивается. Отсюда угол поворота подвижной части тоже будет увеличиваться.

Достоинство выпрямительных приборов является их высокая чувствительность.

К недостаткам следует отнести влияние температуры окружающей среды, частоты исследуемого сигнала и амплитуды измеряемого напряжения на угол поворота подвижной части прибора.

При использовании приборов в цепях с несинусоидальной формой сигнала появляются дополнительные погрешности, вызванные отличием реального коэффициента формы от принятого при градуировке шкалы прибора на заводе-изготовителе.

Схемы магнитоэлектрических механизмов с выпрямительными преобразователями могут выполняться с «открытым» и «закрытым» входами

При «открытом» входе (рис. 4а) по входной цепи преобразователя наряду с переменной составляющей сигнала может протекать и постоянная составляющая, если такую составляющую содержит входное напряжение  $u(t)$ .

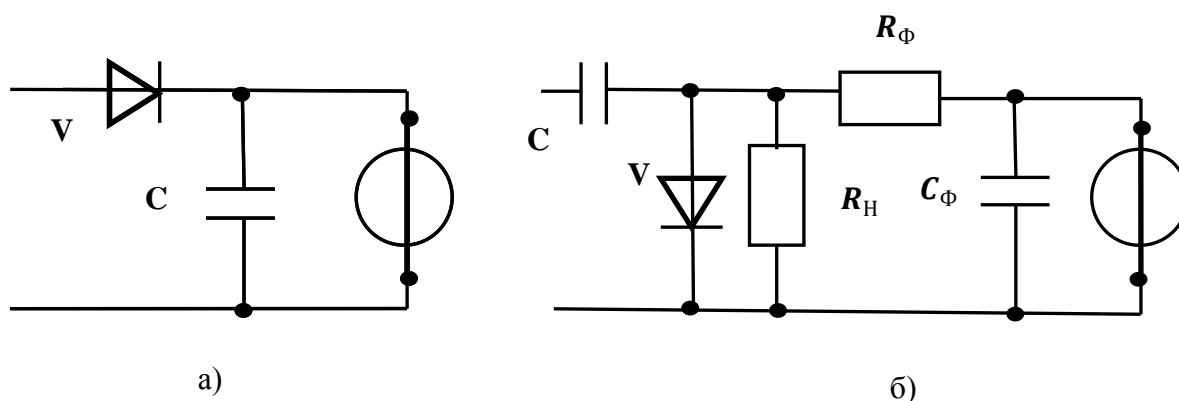


Рис. 4. Выпрямительные преобразователи с «открытым» (а) и «закрытым» (б) входом

«Закрытый» вход (рис. 4б) выпрямителя характеризуется тем, что содержит разделительный конденсатор, который отделяет постоянную составляющую входного напряжения. Вследствие этого выходной сигнал зависит только от переменной составляющей входного напряжения  $u(t)$ .

При сопротивлении выпрямителя в прямом направлении  $R_{пр} = 0$ , а в обратном  $R_{об} = \infty$ , выходной ток в течение периода пропорционален среднему по модулю (средневыпрямленному) значению напряжения

$$I_{ср.в} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|u(t)|}{R_H} dt = \frac{1}{2R_H T} \int_0^T |u(t)| dt = \frac{1}{2R_H T} U_{ср.в}. \quad (39)$$

Учитывая, что диод имеет конечные отличающиеся между собой проводимости в прямом и обратном направлениях, среднее по модулю (средневыпрямленное) значение тока равно:

$$I_{ср.в} = \frac{1}{2} (G_1 - G_2) U_{ср.в.}, \quad (40)$$

где  $G_1 = \frac{1}{R_H + R_{пр}}$  – проводимость в прямом направлении, См;

$G_2 = \frac{1}{R_H + R_{об}}$  – проводимость в обратном направлении, См;

$R_H$  – сопротивление нагрузки выпрямителя, Ом.

Коэффициент преобразования выпрямителя:

$$K = \frac{I_{\text{ср.в.}}}{U_{\text{ср.в.}}} = \frac{1}{2} (G_1 - G_2), \text{ См (41)}$$

Приведенная схема выпрямителя (рис. 4а) является однополупериодной, когда ток в нагрузке протекает только в течение одного полупериода. В двухполупериодных схемах среднее значение выходного тока и, соответственно, коэффициент преобразования увеличиваются в два раза:

$$I_{\text{ср.в.}} = (G_1 - G_2) U_{\text{ср.в.}}, \text{ (42)}$$

где  $G_1 = \frac{1}{R_H + 2R_{\text{пр}}}$  – проводимость в прямом направлении, См;

$G_2 = \frac{1}{R_H + 2R_{\text{об}}}$  – проводимость в обратном направлении, См.

Если измеряемое переменное напряжение имеет постоянную составляющую  $u(t) = U_0 + U_m \sin \omega t$ , то при однополупериодном выпрямлении:

$$I_{\text{ср.в.}} = \frac{1}{R_H} \left[ \left( \frac{\alpha}{\pi} \pm \frac{1}{2} \right) U_0 + \frac{1}{2} U_{\text{ср.в.}} \cos \alpha \right], \text{ (43)}$$

где  $\alpha = \arcsin \frac{U_0}{U_m}$ , рад.

В выражении (52) знак «+» ставится, если полярность напряжения  $U_0$  совпадает с полярностью проводимости диода, а знак «-» – при полярности  $U_0$ , противоположной полярности проводимости диода.

При двухполупериодном выпрямлении

$$I_{\text{ср.в.}} = \frac{1}{R_H} \left[ \left( \frac{2\alpha}{\pi} \pm \frac{1}{2} \right) U_0 + \frac{1}{2} U_{\text{ср.в.}} \cos \alpha \right]. \text{ (44)}$$

### 1.2.1.2. Выпрямители действующего значения (среднеквадратичные выпрямители)

Выпрямители действующего значения (квадратичные выпрямители) содержат элемент с квадратичной вольт-амперной характеристикой, описываемой уравнением:

$$i = bu^2, \text{ (45)}$$

где  $b$  – коэффициент пропорциональности.

В качестве такого элемента используются полупроводниковые диоды, работающие в начале вольт-амперной характеристики при малых входных напряжениях.

При подаче на вход периодического сигнала  $u = U_m \sin \omega t$  среднее значение тока:

$$\begin{aligned} I_{\text{ср}} &= \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T bu^2(t) dt = \frac{b}{2T} \int_0^T U_m^2 \sin^2 \omega t dt = \\ &= \frac{b U_m^2}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t \Big|_0^T = \frac{b}{2} U^2. \text{ (46)} \end{aligned}$$

Среднее значение выходного напряжения пропорционально действующему значению

$$U_{\text{ср}} = I_{\text{ср}} R = \frac{bR}{2} U^2. \text{ (47)}$$

Широкое распространение для измерений действующих значений напряжения получили вольтметры с синтезированной нелинейностью квадратичного вида (рис. 5), у которых градуировочная характеристика имеет следующий вид:

$$\alpha = S_u U^2. (48)$$

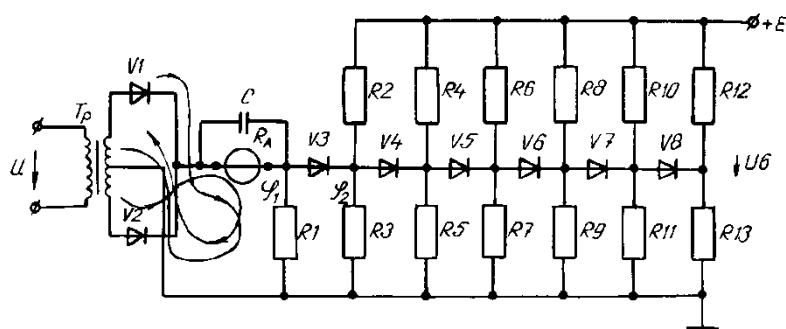


Рис. 5. Квадратичный детектор с диодными цепочками

Цепочка выпрямителей  $V_3$ – $V_8$  позволяет получить вольт-амперные характеристики вида

$$I_{R_A} = KU^2. (49)$$

На все диоды  $V_3, V_4, \dots, V_8$  поданы возрастающие запирающие напряжения  $U_1 < U_2 < \dots < U_n$ , образуемые делителями  $R_2 - R_3, R_4 - R_5$  и т.д. Измеряемое напряжение  $U$  поступает на схему двухполупериодного выпрямления. Выпрямители  $V_3$ – $V_8$  «заперты», причем уровень запирающего напряжения повышается с номером выпрямителя.

При входном напряжении  $U < U_1$  все диоды «заперты», и ток  $I_{R_A}$  протекает через  $R_A$  и  $R_1$ . Чувствительность схемы определяется углом наклона первого отрезка вольт-амперной характеристики (рис. 6).

Когда падение напряжения на резисторе  $R_1$  достигает значения  $U_1$ , открывается выпрямитель  $V_3$  и параллельно  $R_1$  подключается делитель  $R_2 - R_3$ , имеющий проводимость  $G_1 = \frac{R_A + R_3}{R_A R_3}$ . При этом сопротивление току, протекающему через измерительный механизм прибора, уменьшается, чувствительность схемы (рис. 6б) и т.д. Таким образом, полученная результирующая вольт-амперная характеристика (рис. 6г) имеет вид квадратичной зависимости, т.е. ток, протекающий через измерительный механизм, пропорционален квадрату приложенного напряжения.

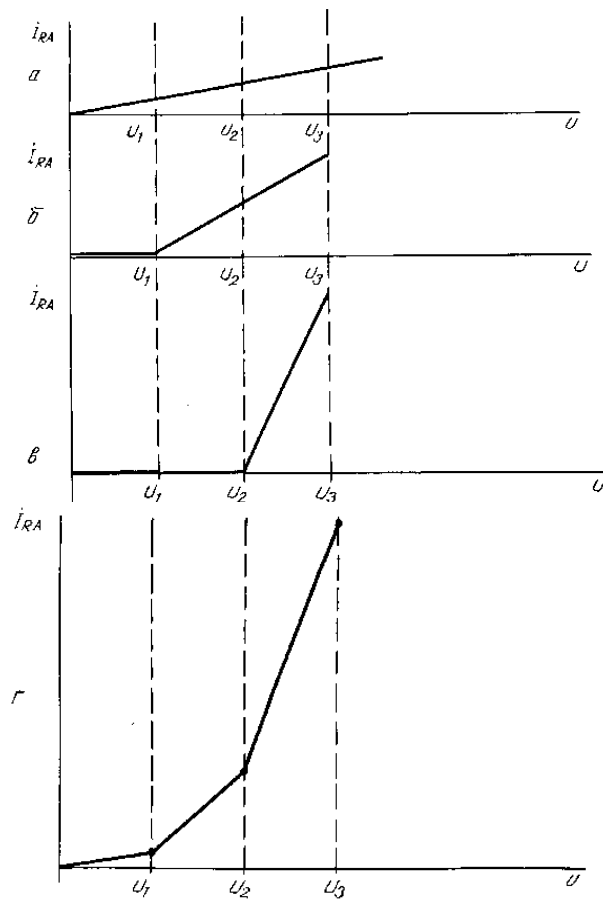


Рис. 6. Синтезированная вольт-амперная характеристика квадратичного детектора с диодными цепочками

### 1.2.1.3. Выпрямительные преобразователи амплитудного значения (пиковые преобразователи)

Выпрямительные преобразователи амплитудного значения содержат кроме диода еще и запоминающий элемент – конденсатор (рис. 7а,б).

Конденсатор в процессе работы выпрямителя заряжается до амплитудного значения  $U_m$  выпрямляемого напряжения.

В схеме с открытым входом (рис. 7а) напряжение на нагрузке  $R_A$  равно напряжению на конденсаторе  $U_C$ , среднее значение которого:

$$U_{C \text{ ср}} = I_{RA} R_A = U_m. \quad (50)$$

Действительное напряжение на нагрузке тем ближе к значению  $U_m$ , чем меньше постоянная времени заряда конденсатора  $\tau_3 = C R_3$  и больше постоянная времени разряда  $\tau_p = C R_p$  (где  $R_3$  и  $R_p$  – сопротивления цепи заряда и разряда соответственно). Чтобы  $U_{C \text{ ср}} = U_m$ , необходимо выполнить условие  $R_3 \rightarrow 0$ ;  $R_p \rightarrow \infty$ ;  $T/\tau_p \rightarrow 0$ .

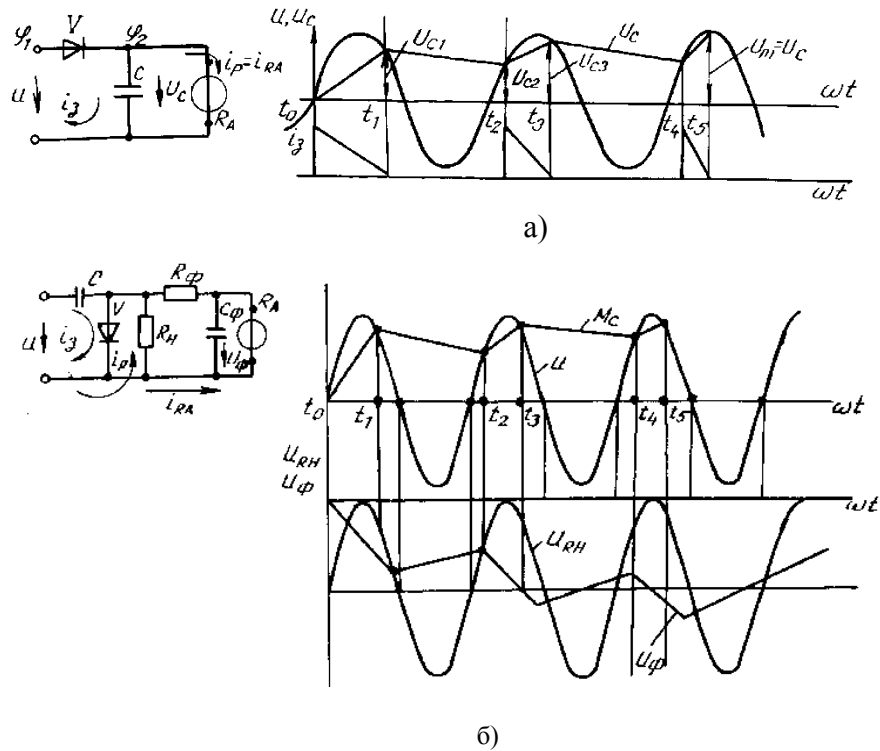


Рис. 7. Пиковый преобразователь  
а) с открытым ходом и б) закрытым входом

При наличии постоянной составляющей исследуемого сигнала

$$U = U_o + U_m \sin \omega t, \quad (51)$$

конденсатор, включенный параллельно измерительному механизму, зарядится до напряжения

$$U_c = U_o + U_m, \quad (52)$$

поэтому данный пиковый преобразователь получил название с «открытым» входом.

Для того, чтобы измерять амплитудные значения исследуемых сигналов, отфильтровывая постоянные составляющие, применяют пиковые преобразователи с «закрытым» входом.

Если шкалы пиковых приборов проградуированы в действующих значениях напряжения, которое связано с амплитудным через коэффициент амплитуды

$$K_a = I_m / I, \quad (53)$$

то угол поворота измерительного механизма будет зависеть от фактического значения коэффициента амплитуды исследуемого сигнала.

На заводе-изготовителе при градуировке пиковых приборов используется сигнал в форме синусоиды, у которого  $K_a = 1,41$ . Если форма исследуемого сигнала не синусоидальная, появляется дополнительная погрешность, которую следует учитывать.

### 1.3. Приборы электромагнитной системы

Электромагнитный прибор состоит из катушки и подвижной части, представляющей из себя пластину, изготовленную из магнитомягкого материала, находящегося в магнитном поле, создаваемом катушкой, по которой протекает исследуемый ток (рис. 8).

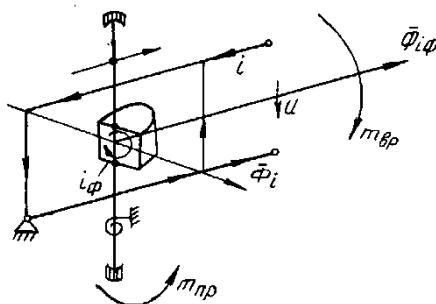


Рис. 8. К объяснению принципа действия прибора электромагнитной системы

При подведении напряжения  $u$  по катушке протекает ток  $i$  и создается магнитный поток  $\bar{\Phi}_i$ . Так как катушка неподвижна, магнитный поток  $\bar{\Phi}_i$  строго ориентирован в пространстве. Под воздействием этого магнитного потока в пластине, будет индуцироваться ЭДС, а следовательно и токи Фуко  $i_\phi$ , ориентированные в направлении, противоположном токам, индуцировавшим ЭДС в пластине. Токи Фуко  $i_\phi$  в свою очередь создают магнитный поток  $\bar{\Phi}_{i\phi}$ , ориентированный в пространстве согласно правилу «буравчика». Таким образом, два магнитных потока  $\bar{\Phi}_i$  и  $\bar{\Phi}_{i\phi}$ , взаимодействуют между собой, вызывая появление вращающего момента, мгновенное значение которого пропорционально приращению энергии электромагнитного поля катушки с током и обратно пропорционально углу поворота подвижной части электромагнитного механизма:

$$m_{\text{вр}} = dW_{\text{эл. магн.}}/d\alpha, \quad (54)$$

В свою очередь энергия электромагнитного поля катушки с током

$$W_{\text{эл. магн.}} = 1/2 \cdot Li^2. \quad (55)$$

Следовательно,

$$m_{\text{вр}} = 1/2 i^2 (dL/d\alpha), \quad (56)$$

где  $L$ — индуктивность неподвижной катушки. Гн

Так как подвижная часть механизма инерционна, то она реагирует на среднее значение вращающего момента, которое для постоянных ( $i=I$ ) и периодически изменяющихся сигналов ( $i=I_m \sin \omega t$ ) одинаково:

$$M_{\text{вр. ср.}} = \frac{1}{T} \int_0^T m_{\text{вр}} dt = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (57)$$

Противодействующий момент в приборах электромагнитной системы создается пружинами

$$M_{np} = \alpha \omega_{y\partial}. \quad (58)$$

В момент равновесия

$$M_{вр.ср} = -M_{np}, \quad (59)$$

тогда уравнение шкалы будет иметь вид

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{1}{\omega_{y\partial}} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = S_I I^2, \quad (60)$$

где  $S_I = \frac{1}{2} \frac{1}{\omega_{y\partial}} \frac{dL}{d\alpha}$  - чувствительность по току,

Электромагнитный механизм пригоден для измерения как постоянных, так и переменных токов.

Из анализа уравнения шкалы следует, что эта зависимость квадратичная. Для получения линейной шкалы за счет формы сердечника добиваются, чтобы  $dL/d\alpha$  была обратно пропорциональна действующему значению тока, протекающему по катушке. Обычно в электромагнитных приборах форма сердечника подбирается таким образом, чтобы шкала прибора была равномерной, начиная от 20- 25 % верхнего предела диапазона измерения.

До 20-25 % верхнего предела диапазона измерения шкала не градуируется, следовательно, не пригодна для измерения.

Из уравнения шкалы прибора следует, что при изменении направления тока в катушке угол отклонения однозначен, т.е. электромагнитные приборы пригодны для работы в цепях постоянного и переменного токов.

При работе в цепях постоянного тока наблюдается разница в показаниях при увеличении и уменьшении измеряемого тока из-за явления гистерезиса.

В цепях переменного тока при увеличении частоты исследуемого сигнала магнитное поле катушки ( $\Phi_i$ ) ослабевает, отчего показания занижаются.

#### 1.4. Приборы электродинамической системы

Электродинамические приборы состоят из двух катушек, одна из которых неподвижна, а другая подвижна (рис. 9).

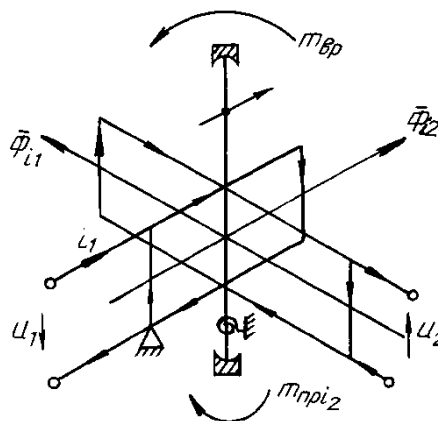


Рис. 9. К объяснению принципа действия прибора электродинамической системы



При подаче напряжения  $u_1$  на неподвижную катушку по ей протекает ток  $i_1$  и создается неподвижный магнитный поток  $\overline{\Phi}_{i_1}$ . При протекании тока  $i_2$  по подвижной катушке создается магнитный поток  $\overline{\Phi}_{i_2}$ . Взаимодействие магнитных полей. Образованных магнитными потоками  $\overline{\Phi}_{i_1}$  и  $\overline{\Phi}_{i_2}$  вызывает вращающий момент, величина которого пропорциональна производной от электромагнитной энергии двух контуров с токами по углу поворота подвижной части электродинамического прибора, т.е.

$$m_{\text{вр.}} = \frac{dW_{\text{эл.магн.}}}{d\alpha}. \quad (61)$$

В свою очередь энергия электромагнитного поля двух контуров с током

$$W_{\text{эл.магн.}} = \frac{1}{2}L_1i_1 + \frac{1}{2}L_2i_2 + M_{12}i_1i_2, \quad (62)$$

где  $i_1, i_2$  – мгновенные значения токов в катушках измерительного механизма, А;  
 $M_{12}$  – взаимная индуктивность между катушками измерительного механизма, Гн.

Там как индуктивности контуров  $L_1, L_2$  и токи, протекающие по ним  $i_1$  и  $i_2$ , не являются функцией угла поворота  $\alpha$ , то вращающий момент равен:

$$m_{\text{вр.}} = i_1i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}, \quad (63)$$

Противодействующий момент в электродинамических приборах, созданный пружинами,

$$M_{\text{пр}} = \alpha\omega_{\text{y}\partial}. \quad (64)$$

Уравнение шкалы прибора будет иметь следующий вид:

$$\alpha = \frac{1}{\omega_{\text{y}\partial}} i_1i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = S_I i_1i_2, \quad (65)$$

где  $S_I = \frac{1}{\omega_{\text{y}\partial}} \frac{dM_{12}}{d\alpha}$  - чувствительность по току.

Так как подвижная часть прибора инерционна, то измерительный механизм реагирует на среднее значение вращающегося момента, который для цепей постоянного тока равен

$$M_{\text{вр.ср.}} = I_1I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}, \quad \text{Н м} \quad (66)$$

а для цепей переменного тока

$$M_{\text{вр.ср.}} = I_1I_2 \frac{dM}{d\alpha} \cos \varphi, \quad \text{Н м} \quad (67)$$

где  $I_1, I_2$  – действующие значения токов в катушках измерительного механизма, А;

$\varphi$  – угол сдвига фаз между токами  $I_{1m}, I_{2m}$ , рад.

Уравнение шкалы прибора для цепей постоянного тока имеет вид

$$\alpha = \frac{1}{\omega_{y\delta}} I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = S_1 I_1 I_2, \quad (68)$$

а для цепей переменного тока

$$\alpha = \frac{1}{\omega_{y\delta}} I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cos \varphi = S_1 I_1 I_2 \cos \varphi, \quad (69)$$

где  $S_1$  – чувствительность по току.

### 1.5. Приборы электростатической системы

Электростатический ИМ состоит из двух групп взаимно изолированных металлических пластин, способных поворачиваться относительно друг друга.

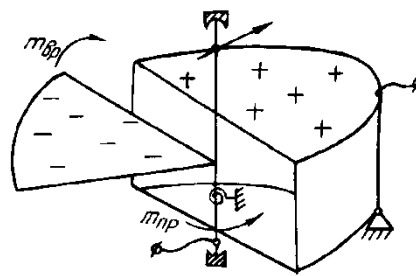


Рис. 10. К объяснению принципа действия прибора электростатической системы

Перемещение подвижной части прибора происходит под действием энергии электрического поля двух противоположно заряженных пластин. При этом перемещение сопровождается измерением емкости системы за счет измерения активной площади пластин.

Вращающий момент, действующий на подвижную систему ИМ,

$$m_{вр} = \frac{dW_{эл}}{d\alpha}. \quad (70)$$

В свою очередь энергия электрического поля двух противоположно заряженных пластин выражается следующей зависимостью:

$$W_{эл} = \frac{1}{2} C u^2. \quad (71)$$

где  $C$  – емкость электростатического ИМ, Ф;

$u$  – мгновенное значение измеряемого напряжения, В.

Вращающий момент, действующий на подвижную систему ИМ,

$$m_{вр} = \frac{1}{2} u^2 \frac{dC}{d\alpha}, \quad \text{Н м.} \quad (72)$$

Вследствие инерционности подвижной части прибора она реагирует на среднее значение вращающего момента, которое для цепей постоянного и переменного токов

$$M_{\text{сп.сп}} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}, \text{ Н м. (73)}$$

Противодействующий момент, создаваемый пружиной,

$$M_{\text{пр}} = \alpha \omega_{\text{уд}}. \text{ (74)}$$

Уравнение шкалы прибора имеет квадратичный характер:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{1}{\omega_{\text{уд}}} \frac{dC}{d\alpha} U^2. \text{ (75)}$$

Для получения равномерно (линейной) шкалы за счет формы и взаимного расположения электродов измерительного механизма, получают производную от емкости по углу поворота ( $dC/d\alpha$ ), обратно пропорционального напряжению.

Достоинствами приборов электростатической системы являются: независимость показаний от температуры окружающей среды, частоты и формы исследуемого сигнала; малая потребляемая энергия; использование в цепях постоянного и переменного токов.

К недостаткам следует отнести малый вращающий момент, что вызывает большие погрешности при измерении малых напряжений.

### 1.6. Приборы индукционной системы

Принцип действия индукционного механизма основан на взаимодействии переменных магнитных полей с индуцированными ими токами (рис. 11).

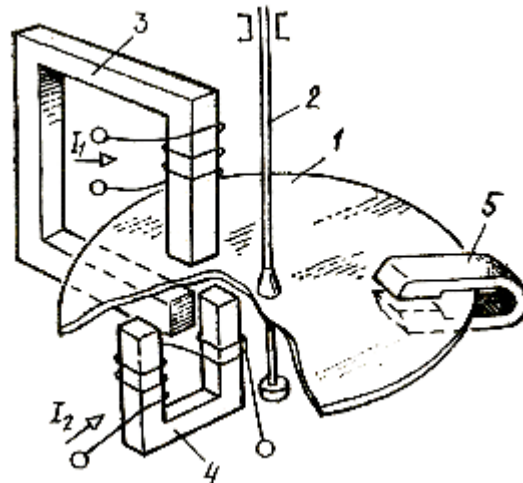


Рис. 11. К объяснению принципа действия прибора индукционной системы

Неподвижная часть механизма представлена двумя магнитопроводами 3 и 4 из ферромагнитного материала с намотанными на них катушками напряжения и токовой. Подвижная часть (диск) 1 изготавливается из токопроводящего материала.

При подведении напряжения  $u_v$  к катушке напряжения по ней будет протекать ток  $i_v$  и создаваться магнитный поток  $\Phi_v$ , замыкающийся по магнитопроводу, пересекающий диск и индуцирующий в нем ЭДС  $e_v$ , которая создает ток Фуко  $I_{\Phi v}$ , препятствующий изменению потока  $\Phi_v$ .

Аналогичным образом рассуждая относительно токовой катушки, мы имеем магнитный поток  $\Phi_I$  и токи Фуко  $I_{\Phi I}$ . Ток Фуко  $I_{\Phi I}$ , взаимодействуя с магнитным потоком  $\Phi_v$ , создает  $m_{ep1}$ , а ток Фуко  $I_{\Phi v}$ , взаимодействуя с магнитным потоком  $\Phi_I$  создает вращающий момент  $m_{ep2}$ . Суммарный вращающий момент, действующий на диск, равен:

$$m_{ep\Sigma} = m_{ep1} + m_{ep2}. \quad (76)$$

Вращающаяся часть механизма (диск) в силу своей инерционности реагирует на среднее значение вращающего момента равное

$$M_{ep.cp.\Sigma} = K_{ep} I_I I_v \sin \varphi, \quad (77)$$

где  $I_I, I_v$  – токи протекающие по катушкам токовой и напряжения, А

$K_{ep}$  – коэффициент пропорциональности;

$\varphi$  – угол сдвига фаз между токами  $I_I, I_v$ , рад.

В линейных электрических цепях напряжения пропорциональны токам, следовательно,

$$M_{ep.cp.\Sigma} = K'_{ep} U I_I \cos \varphi = K'_{ep} P. \quad (78)$$

Противодействующий момент в индукционных механизмах создается постоянным магнитным 5 потоком  $\Phi_{пм}$ , пронизывающим вращающийся диск и индуцирующим в нем токи Фуко  $I_{\Phi пм}$ .

Значение индуцированных токов Фуко  $I_{\Phi пм}$  зависит от магнитного потока  $\Phi_{пм}$  и скорости вращения диска  $d\alpha/dt$ , т.е.

$$I_{\Phi пм} = k \Phi_{пм} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (79)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Взаимодействие магнитного потока  $\Phi_{пм}$  с током Фуко  $I_{\Phi пм}$  вызывает противодействующий момент

$$M_{np} = \kappa_{торм} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (80)$$

где  $\kappa_{торм} = k\Phi_{пм}^2$  – коэффициент пропорциональности.

При постоянной скорости вращения диска  $d\alpha/dt=0$  имеем

$$M_{ep.cp.\Sigma} = - M_{np}. \quad (81)$$

или

$$K'_{ep} P = \kappa_{торм} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (82)$$

откуда

$$\frac{d\alpha}{dt} = kP, \quad (83)$$

где  $k = k'_{\text{вр}} / \kappa_{\text{торм}}$  – коэффициент пропорциональности.

За время  $dt$  нагрузкой потребляется энергия  $dW = Pdt$ , а диск поворачивается на угол  $d\alpha$ , тогда за время  $t_1 - t_0$  диск повернется на угол равный:

$$\int_{t_0}^{t_1} d\alpha = 2\pi N, \quad (84)$$

где  $N$  – число оборотов за время  $t_1 - t_0$ ,  
и будет потреблена энергия

$$\int_{t_0}^{t_1} kPdt = kW, \quad (85)$$

или

$$2\pi N = kW. \quad (86)$$

Откуда

$$W = \frac{2\pi N}{k} = CN, \quad (87)$$

где  $C = 2\pi/k = W/N$  – постоянная индукционного прибор, кВт/об.

На лицевой панели индукционных приборов указывается обратная величина постоянной прибора (передаточное число)  $1/C, \text{ об} / \text{кВт}$ .

### 1.7. Измерение напряжения в цепях переменного тока

Для измерения напряжения в цепях переменного тока применяются приборы электромеханических систем.

На действующее значение измеряемой величины реагируют приборы электромагнитной, электростатической, термоэлектрической, электро- и ферромагнитной систем,

Приборы выпрямительной системы откликаются на средневыпрямленное значение.

Действующее значение переменного напряжения промышленной частоты измеряют электромагнитными, электро-и ферродинамическими приборами, а на повышенных частотах – термоэлектрическими, электростатическими, выпрямительными и электронными приборами.

При измерении напряжений синусоидальной формы и известных коэффициентах формы  $K_{\text{ф}}$  и амплитуды  $K_{\text{а}}$  измерив амплитудное значение напряжения можно определить

$$U_{\text{ср.в}} = 2U_m/\pi, \text{ а } U = U = U_m/\sqrt{2}. \quad (88)$$

Для наиболее часто встречающихся форм сигналов значения  $K_{\text{ф}}$  и  $K_{\text{а}}$  приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов амплитуды и формы для некоторых форм напряжения

Форма напряжения	Коэффициент	
	Коэффициент амплитуды, $K_a$	Коэффициент формы, $K_\phi$
Синусоидальная	1,41	1,11
Прямоугольная	1,0	1,0
Треугольная	1,73	1,16

При измерении величин, характеризующихся несинусоидальной формой кривой, приборами, проградуированными в действующих значениях, но реагирующими на средневыпрямленное или амплитудное значение напряжения, возникает погрешность формы

$$\delta_\phi = \left( \frac{K_{\phi \sin} - K_\phi}{K_\phi} \right) 100\%, \quad (89)$$

где  $K_\phi(K_{\phi \sin})$  – коэффициент формы несинусоидальной (синусоидальной) измеряемой величины.

Наряду с погрешностью, обусловленной несинусоидальностью кривой исследуемого сигнала, имеет место и частотная погрешность

$$\delta_\phi = \frac{U_{\approx}}{U_{=}} = \frac{1}{U_{=}} \frac{U_{\approx}}{U_{=}} = 1 \sqrt{\frac{\omega^2 L^2 + r^2}{r^2}} = 1 \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{r}\right)^2}. \quad (90)$$

Для измерения напряжения ниже 0,1 В применяют только электронные приборы, нижние пределы которых достигают  $10^{-6}$  В.

Для измерения напряжения от 1 до 100 В применяют приборы всех систем, однако, если требуется высокая точность измерения, то используют приборы электродинамической системы, но их можно использовать только в силовых цепях. Это относится и к электромагнитным и ферродинамическим приборам. В маломощных цепях пригодны электростатические системы и электронные вольтметры.

Наиболее точное измерение переменных напряжений обеспечивается многопредельными (универсальными) вольтметрами выпрямительных систем.

Для измерения больших напряжений используют те же приборы, что и для измерения средних напряжений, включая их во вторичные обмотки трансформаторов напряжения.

При использовании трансформаторов напряжения значение напряжения вычисляется так:

$$U_x = n_v C_v K_v = U_{x,v} K_v, \quad (91)$$

где  $U_{x,v}$  - показания прибора;

$n_v$  – число делений;

$C_v$  - цена деления;

$K_v$  – коэффициент трансформации.

Суммарная относительная погрешность

$$\delta_{v_{пред}}(v) = \delta_v(v) + f_v, \quad (92)$$

где  $f_v = \pm[C + d(U_n/U - 1)]$  - погрешность трансформатора напряжения.

### 1.8. Измерение несинусоидальных напряжений различными типами приборов

Если измеряется напряжение несинусоидальной формы вольтметрами, предназначенными для измерения синусоидальных сигналов, шкалы которых проградуированы в среднеквадратических (действующих) значениях синусоидального напряжения  $U$ , то по снятым показаниям находят параметры несинусоидального напряжения следующим образом (табл.3).

Если известны показания вольтметра с пиковым преобразователем  $\alpha$ , то их умножают на коэффициент 1,41, тогда действующее и средневыпрямленное значения могут быть определены:

$$U = \frac{U_m}{K_a} = \alpha \frac{1,41}{K_a}, \quad (93)$$

и

$$U_{cp.в} = \frac{U}{K_\phi} = \alpha \frac{1,41}{K_a K_\phi}, \quad (94)$$

где  $K_a$  – коэффициент амплитуды;

$K_\phi$  – коэффициент формы.

Если известны показания вольтметра действующего значения  $\beta$ , то пиковое и средневыпрямленное значения можно вычислить так:

$$U_m = K_a \beta, \quad (95)$$

и

$$U_{cp.в} = \beta / K_\phi. \quad (96)$$

Если известны показания вольтметра средневыпрямленного значения  $\gamma$ , то, умножая их на коэффициент 0,9 (деля на 1,11), получаем средневыпрямленное значение, тогда пиковое и среднеквадратическое значения:

$$U = K_\phi U_{cp.в} = \frac{K_\phi}{1,11} \gamma = K_\phi 0,9 \gamma, \quad (97)$$

и

$$U_m = K_a U = \frac{K_a K_\phi}{1,11} \gamma = K_a K_\phi 0,9 \gamma. \quad (98)$$

Если известны показания пикового вольтметра  $\mathfrak{x}$ , проградуированного в амплитудных значениях, то действующее и средневыпрямленное значения определяются так:

$$U = U_m / K_a = \mathfrak{x} / K_a, \quad (99)$$

и

$$U_{cp.в} = U / K_\phi = \mathfrak{x} / K_a K_\phi. \quad (100)$$

На практике коэффициенты формы и амплитуды чаще всего не известны. Их можно вычислить, измерив напряжение, используя вольтметры различных систем. Действующее значение напряжения определяется по показаниям вольтметра электромагнитной и электродинамической систем:

$$U = U_{эм(эд)}. \quad (101)$$

Средневыпрямленное напряжение по показаниям вольтметров выпрямительной системы

$$U_{cp.в} = U_{Mэ(B)} 0,9. \quad (102)$$

Амплитудные напряжения по показаниям вольтметров пиковых

$$U_m = U_{пик} 1,41. \quad (103)$$

Тогда

$$K_\phi = \frac{U}{U_{cp.в}} = \frac{U_{эм(эд)}}{U_{MэB} 0,9}, \quad (104)$$

и

$$K_a = \frac{U_m}{U} = \frac{U_{пик} 1,41}{U_{эм(эд)}}. \quad (105)$$



Таблица 3

Значения коэффициентов градуировки при определении действующих значений измеряемого напряжения по показаниям приборов

Тип вольтметра	Магнито-электрический	Электромагнитный	Электродинамический	Электростатический	Термоэлектрический	Выпрямительный, В <sub>1</sub> /В <sub>2</sub>	Среднеквадратический	Средневыпрямительный	Импульсный	Универсальный
Тип преобразователя	-	-	-	-	Среднеквадратический	Средневыпрямительный	Среднеквадратический	Средневыпрямительный	Максимального значения	Максимального значения
Напряжение на которое откликается вольтметр $U_{отк}$	$U$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{св}$	$U_{ск}$	$U_{св}$	$U_m$	$U_m$
Значение напряжения, в котором отградуирована шкала вольтметра	$U$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_{ск}$	$U_m$	$U_{ск}$
Значение коэффициента градуировки	1	1	1	1	1	2,22-В <sub>2</sub> 1,11-В <sub>1</sub>	1	1,11	1	0,71

**Примечание:** В<sub>1</sub> – однополупериодное выпрямление;  
В<sub>2</sub> – двухполупериодное выпрямление

## 1.9. Примеры решения задач по измерению напряжения

### Задача 1

Определить показание импульсного вольтметра с закрытым входом при подаче на его вход переменного напряжения  $u(t)=8+4\sin(\omega t+\psi_u)$

#### Решение

Импульсный вольтметр имеет закрытый вход, поэтому постоянная составляющая  $U_0 = 8$  В не проходит.

Как видно из таблицы 3, импульсный вольтметр откликается на максимальное значение измеряемого переменного напряжения (без постоянной составляющей)  $U_{отк} = U_m$  и градуируется в этих же значениях, т.е. коэффициент градуировки равен 1.

Напряжение, на которое откликается вольтметр  $U_{отк} = U_m = 4$  В.

Следовательно, показание импульсного вольтметра с закрытым входом равно

$$U = 1 \cdot U_{отк} = 1 \cdot 4 = 4 \text{ В}$$

### Задача 2

Определить показание универсального вольтметра с открытым входом при подаче на его вход переменного напряжения  $u(t)=8+4\sin(\omega t+\psi_u)$

#### Решение

Универсальный вольтметр имеет открытый вход, поэтому постоянная составляющая  $U_0 = 8$  В проходит.

Как видно из таблицы 3, универсальный вольтметр откликается на максимальное значение измеряемого переменного напряжения (с учетом постоянной составляющей)  $U_{отк} = U_m$  и градуируется в среднеквадратических значениях, т.е. коэффициент градуировки равен 0,71.

Напряжение, на которое откликается вольтметр  $U_{отк} = U_0 + U_m = 8 + 4 = 12$  В.

Следовательно, показание универсального вольтметра с открытым входом равно

$$U = 0,71 \cdot U_{отк} = 0,71 \cdot 12 = 8,52 \text{ В}$$

### Задача 3

Определить показание электростатического вольтметра при подаче на его вход переменного напряжения  $u(t)=8+4\sin(\omega t+\psi_u)$

#### Решение

Как видно из таблицы 3, электростатический вольтметр откликается на среднеквадратическое значение  $U_{отк} = U_{ск}$  и градуируется в среднеквадратических значениях, т.е. коэффициент градуировки равен 1.

Электростатический вольтметр измеряет как постоянную, так и переменную составляющие.

Напряжение, на которое откликается вольтметр  $U_{отк} = U_{ск}$ .

Определяем среднеквадратическое значение напряжения  $U_{ск}$

$$U_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{8^2 + \left(\frac{4}{\sqrt{2}}\right)^2} = 8,49 \text{ В}$$

Следовательно, показание электростатического вольтметра равно

$$U = 1 \cdot U_{отк} = 1 \cdot 8,49 = 8,49 \text{ В}$$

## 2. Задачи по приборам электромеханических систем

1. Определить предел измерений и чувствительность вольтметра со шкалой на 150 делений и постоянной  $0,1 \text{ В/дел}$ .
2. Миллиамперметр рассчитан на ток  $500 \text{ mA}$  и имеет чувствительность  $0,2 \text{ дел/мА}$ . Определить полное число делений шкалы постоянную прибора и измеряемый ток, если стрелка прибора отклонилась на 60 делений.
3. Измерительный прибор со шкалой на 100 делений имеет чувствительность по току  $2 \text{ дел/мА}$  и внутреннее сопротивление  $20 \text{ Ом}$ . Определить пределы измерения по току и напряжению, а также постоянную прибора по напряжению.
4. При изменении тока от 5 до  $10 \text{ mA}$ , измеряемого двумя миллиамперметрами, указатель одного прибора переместился на 4 деления, а другого - на 7 делений. Определить соотношения между чувствительностями и постоянными приборов.
5. Определить чувствительность и постоянную ваттметра, если прибор рассчитан на ток  $5 \text{ A}$  и напряжение  $75 \text{ В}$ , а шкала имеет 150 делений.
6. Ваттметр имеет шкалу на 150 делений и рассчитан на ток  $7,5 \text{ A}$  и напряжение  $200 \text{ В}$ . Собственная мощность последовательной и параллельной цепей ваттметра составляет  $2,5 \text{ Вт}$  и  $5 \text{ Вт}$ . Определить постоянную ваттметра и сопротивление его цепей.
7. Ваттметр, включенный в цепь постоянного тока, а затем переменного тока показывает одно и то же число делений – 120. Определить полные мощности в обоих случаях, если  $I_n = 10 \text{ A}$ ,  $U_n = 250 \text{ В}$ ,  $\alpha_n = 250 \text{ дел}$ , и угол сдвига во фазе в цепи переменного тока  $15^\circ$ .
8. Внутреннее сопротивление электромагнитного вольтметра равно  $5 \text{ кОм}$  при номинальном токе  $30 \text{ mA}$ . Определять предел измерения вольтметра, его постоянную, номинальную мощность собственной измерительной цепи и наибольшую абсолютную погрешность измерений, если вольтметр имеет класс точности  $0,5$  в шкалу на 150 делений.
9. Определить чувствительность и собственную мощность измерительной цепи, если прибор с внутренним сопротивлением  $10 \text{ кОм}$  имеет предел измерения  $50 \text{ mВ}$  и шкалу на 50 делений.
10. Номинальное напряжение магнитоэлектрического прибора с внутренним сопротивлением  $20 \text{ Ом}$  и шкалой од 150 делений –  $60 \text{ mВ}$ . Чему равны постоянная прибора и его чувствительность по току, а также собственная мощность измерительной цепи.
11. Счетчик электрической энергии имеет следующие номинальные параметры: ток  $15 \text{ A}$ , напряжение  $220 \text{ В}$  сопротивление токовой цепи и напряжения  $0,15 \text{ Ом}$  и  $3 \text{ кОм}$ , передаточное число  $1280 \text{ об/кВт ч}$ . Определить номинальную постоянную счетчика и собственную мощность его измерительных цепей.
12. Вольтметр со шкалой на 100 делений, имеет чувствительность по току  $2 \text{ дел/мА}$  и внутреннее сопротивление  $20 \text{ Ом}$ . Определить измеряемое напряжение, а также постоянную прибора по напряжению.
13. При измерении напряжения от  $100$  до  $200 \text{ mВ}$ , измеряемого двумя милливольтметрами, указатель одного прибора переместился на 4 деления, а другого на 8 делений. Определить соотношение между чувствительностями приборов.
14. В схеме однополупериодного выпрямителя определить показания магнитоэлектрического и электродинамического амперметров, включенных последовательно с нагрузкой  $200 \text{ Ом}$ , если к схеме приложено синусоидальное напряжение амплитудой  $63 \text{ В}$ .
15. К однополупериодному выпрямителю приложено синусоидальное напряжение амплитудой  $22 \text{ В}$ . Определить среднее и действующее значения тока в нагрузке, имеющей сопротивление  $100 \text{ Ом}$ , если сопротивление диода в прямом направлении  $10 \text{ Ом}$ , а обратном –  $5 \text{ кОм}$ .

16. На вход однополупериодного выпрямителя, подано напряжение  $u = 10 + 20 \sin 314t$ . Определить ожидаемое падение напряжения на нагрузке при условии, что диод можно принять за идеальный.
17. На вход вольтметра магнитоэлектрической системы с двухполупериодной схемой выпрямления, подано напряжение  $u = 10 + 20 \sin 314t$ . Определить показания вольтметра.
18. К однополупериодному выпрямителю приложено напряжение, описываемое уравнением  $u = U_0 + U_m \sin \omega t$ . Определить падение напряжения на нагрузке выпрямителя, если приложенное напряжение характеризуется  $U_0 = 12 \text{ В}$ ;  $U_m = 18,5 \text{ В}$ .
19. Вольтметром, который имеет пиковый преобразователь с открытым входом, измеряется напряжение, описываемое уравнением  $u = 100(1 + \sin \omega t) \text{ В}$ . Определить показания вольтметра.
20. Определить показания вольтметров магнитоэлектрической, электромагнитной и выпрямительной систем с однополупериодным выпрямителем, подключенных к напряжению, которое образуется последовательно включенными аккумулятором напряжения  $1,5 \text{ В}$  и генератором переменного напряжения прямоугольной формы с амплитудой  $2 \text{ В}$ .
21. Вольтметр, имеющий пиковый преобразователь с закрытым входом подключен к выходу однополупериодного выпрямителя. Определить максимальное значение напряжения, если вольтметр показал  $15 \text{ В}$ .
22. Определить показания магнитоэлектрического вольтметра выпрямительной системы с однополупериодным выпрямлением. Если измеряемое напряжение имеет амплитудное значение  $150 \text{ В}$  и форма кривой имеет следующий вид (см. рис.).

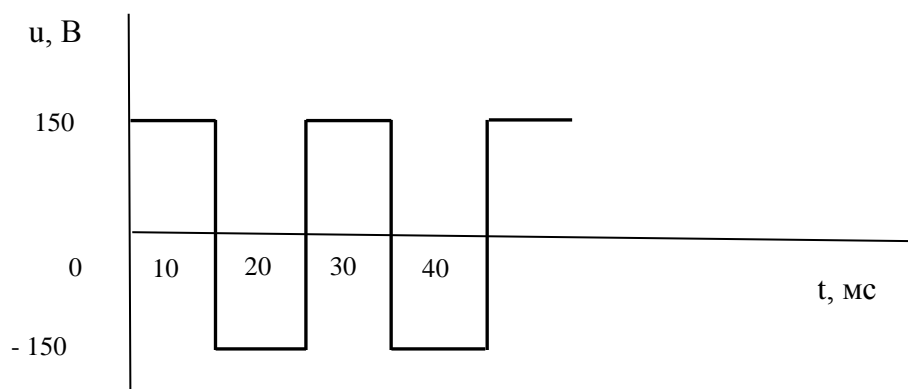


Рис. К задаче 22

23. Цепь питается последовательно соединенными аккумуляторной батареей напряжением  $12 \text{ В}$  и трансформатором с вторичным напряжением синусоидальной формы, действующее значение которого  $6 \text{ В}$ . Определить показания вольтметров следующих систем: магнитоэлектрической, электродинамической, магнитоэлектрической с двухполупериодным выпрямительным преобразователем при подключении их на суммарное напряжение.
24. Сравнить показания магнитоэлектрического, электродинамического и выпрямительного с однополупериодной схемой выпрямления вольтметров при подключении их к источнику напряжения, изменяющемуся по закону, изображенному на рисунке.

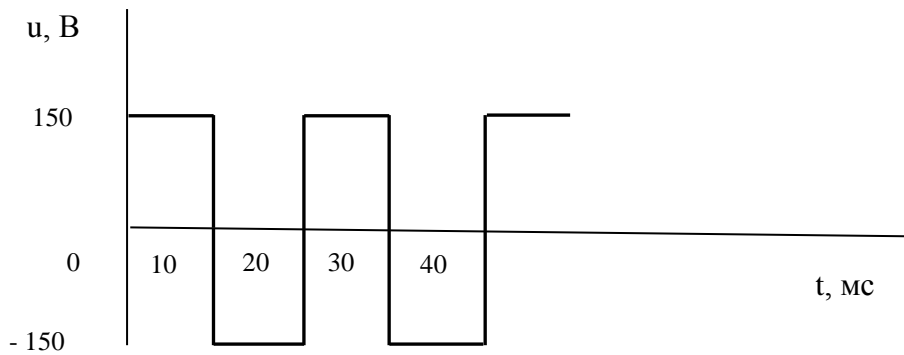


Рис. К задаче 24

25. К аккумуляторной батарее напряжением 120 В параллельно подключены два вольтметра. Один магнитоэлектрический, а другой выпрямительной системы с двухполупериодной схемой выпрямления. Определить показания вольтметров.

26. Определить показание вольтметра выпрямительной системы с двухполупериодной схемой выпрямления. Если измеряемое напряжение имеет амплитудное значение 10 В и форму кривой показанную на рисунке.

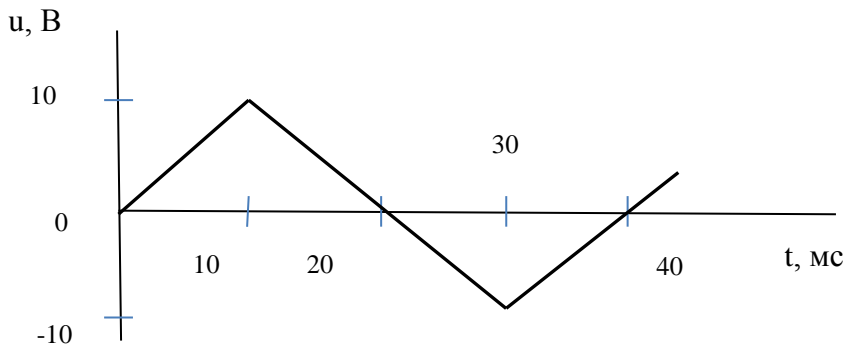


Рис. К задачам 26

27. К выходу генератора прямоугольных импульсов постоянной полярности подключены два вольтметра – магнитоэлектрический и электромагнитный. Определить показания вольтметров. если амплитуда импульсов 3 В, длительность 1 мс, а скважность 3 мс (см. рис.).

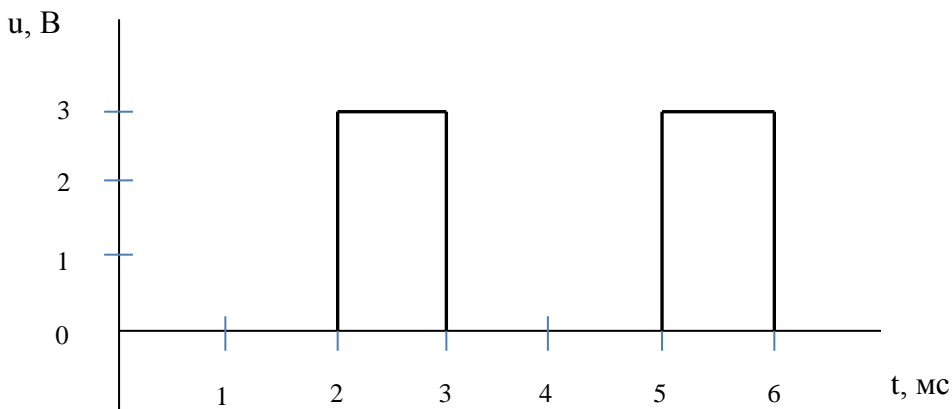


Рис. К задаче 27

28. Электродинамическим вольтметром измеряется ряд напряжений, имеющих разные формы кривых. Определить показания прибора, если измеряемые имеют формы изображенные на рисунке

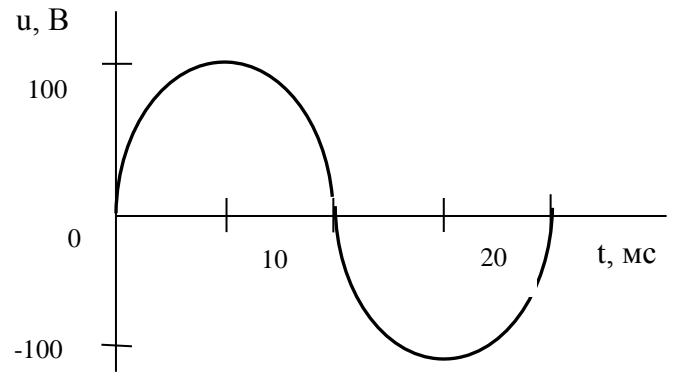
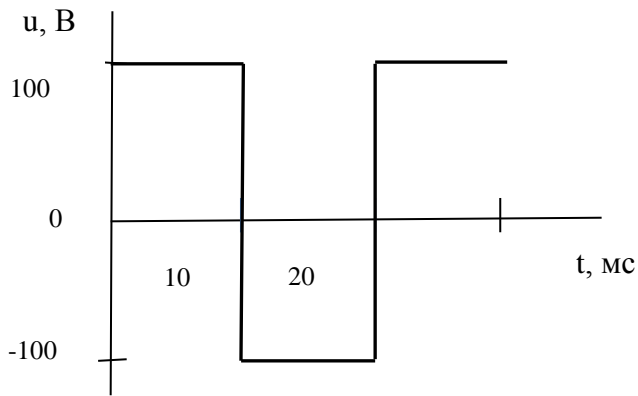


Рис. К задаче 28

29. Определить амплитуду сигнала синусоидальной формы, поданного на вход вольтметра с выпрямительным преобразователем. Преобразователь выполнен по схеме двухполупериодного выпрямления. Шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях синусоидального сигнала. Показания вольтметра 10 В.

30. Что покажет вольтметр, имеющий пиковый преобразователь с закрытым входом шкала которого проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения. Если его подключили к схеме (см. рис.), питающейся напряжением с амплитудой 4,5 В.

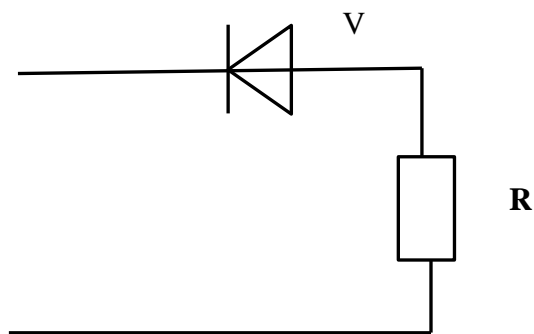


Рис К задаче 30

31. На вход вольтметра с пиковым преобразователем подано напряжение прямоугольной формы (см. рис.). Определить коэффициент формы и амплитуды и показания вольтметра, а также действующее и среднев्यпрямленное значения исследуемого напряжения.

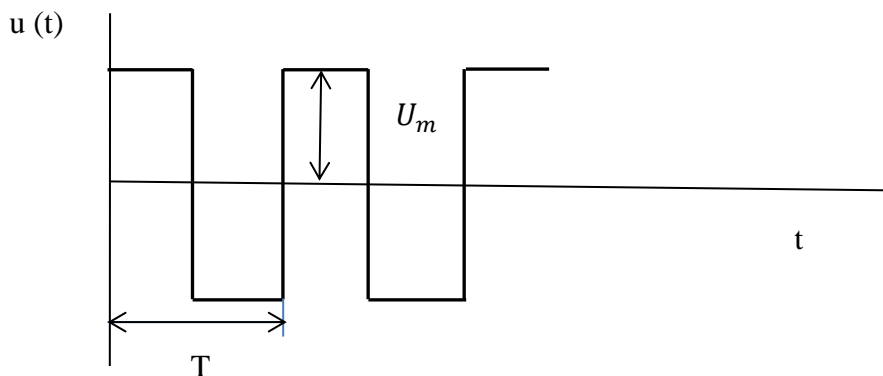


Рис. К задаче 31

32. Определить показания вольтметра со среднеквадратичным преобразователем и закрытым входом. Шкала которого проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения. Если на вход подан прямоугольный сигнал с положительной полярности с амплитудой 141 В, частотой 10 кГц и длительностью импульса 1 мкс.

33. Определить показания вольтметра с двухполупериодным выпрямительным преобразователем и открытым входом, шкала которого проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения. Если на его вход подана периодическая последовательность прямоугольных импульсов амплитудой 141 В, частота следования 100 кГц. Длительность импульса 1 мкс.

34. Определить показания вольтметра с пиковым преобразователем и открытым и закрытым входами. Шкалы которых проградуированы в максимальных значениях. Если на их входы поочередно подано напряжение амплитудой 100 В. (см. рис.).

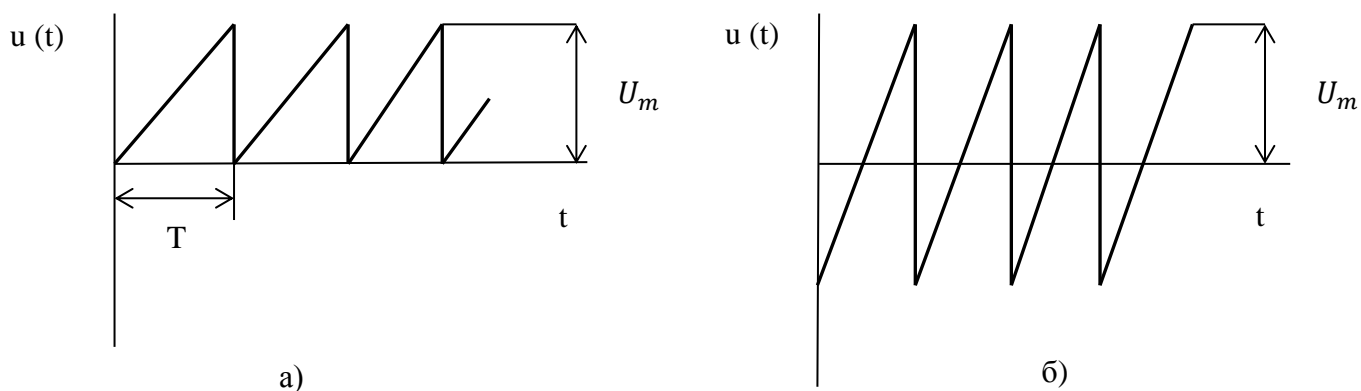


Рис. К задаче 34

35. Определить показания вольтметра, имеющего двухполупериодный выпрямительный преобразователь средневыпрямленного значения, вход открытый. Шкала проградуирована в действующих значениях. Если на вход подано напряжение формы «меандр» с амплитудой 100 В.

36. Определить показания вольтметров, имеющих преобразователи максимального значения и шкалу проградуированную в максимальных значениях. У одного вход открытый. А у другого вход закрытый. Если на их входы подана периодическая последовательность импульсов (см. рис.) с амплитудой 100 В.

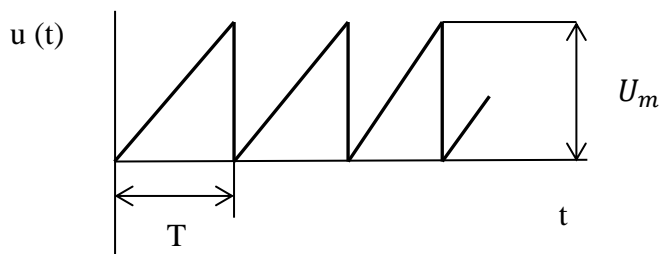


Рис. К задаче 36

37. Определить показания вольтметров, имеющих преобразователи максимального значения и шкалу. Проградуированную в максимальных значениях. У одного вход открытый, а у другого вход закрытый, если на входы подано напряжение формы «меандр» с амплитудой 141 В.

38. Определить по показаниям вольтметра среднеквадратического значения пилообразного напряжения сигнала амплитудой 100 В и периодом 100 мкс (см. рис.), если вольтметр имеет преобразователь средневывпрямленного значения с двухполупериодной схемой выпрямления. Вход открытый и шкала проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения. Вольтметр работает в режиме измерения напряжения постоянного и переменного тока.

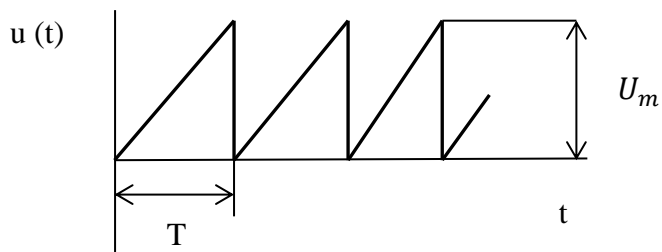


Рис. К задаче 38

39. Определить показания вольтметра, работающего в режиме измерения переменного напряжения, если на его вход подано напряжение прямоугольной формы с амплитудой 141 В и частотой 50 Гц (см. рис.). Вольтметр имеет преобразователь средневывпрямленного значения с двухполупериодной схемой выпрямления. Открытый вход. Шкала проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения.

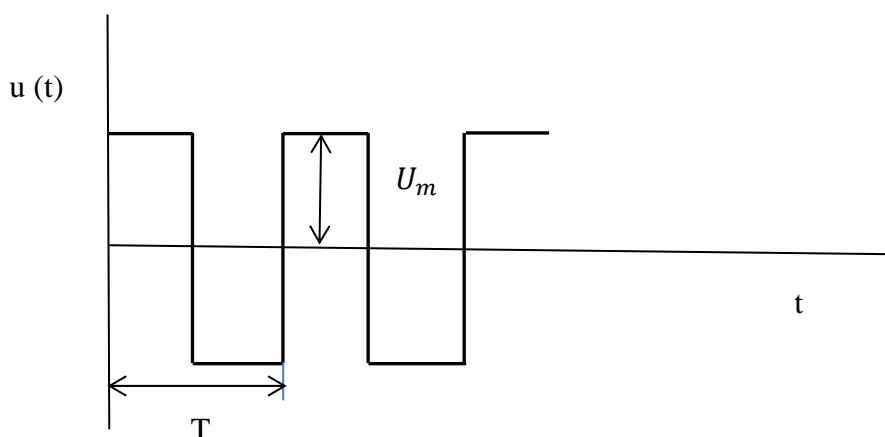


Рис. К задаче 39

40. Определить показания вольтметра. Работающего в режиме измерения переменного напряжения, если на его вход подано пилообразное напряжение амплитудой 141 В и частотой 50 Гц.

41. Сравнить ожидаемые выходные напряжения двух выпрямителей действующих значений. Из которых один имеет открытый вход, а другой закрытый вход, если на их входы поступают однополярные импульсы напряжения прямоугольной формы амплитудой 15 В и скважностью  $T/\tau_{и} = 2$  (см. рис.).



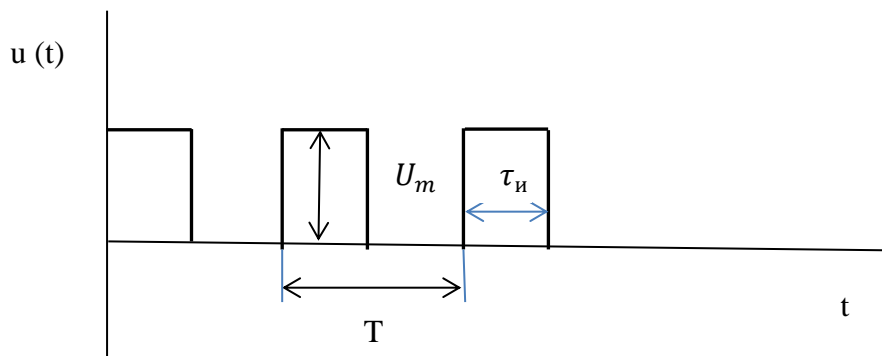


Рис. К задаче 41

42. Вольтметром, имеющим пиковый преобразователь с закрытым входом, измеряется напряжение синусоидальной формы. Определить амплитуду исследуемого сигнала, если вольтметр показал 15 В.
43. Вольтметр, имеющий пиковый преобразователь с закрытым входом, подключен к выходу однополупериодного выпрямителя. Определить амплитудное значение приложенного напряжения, если вольтметр показывает 9 В.  
 Ответ: 18 В.
44. Электрическая цепь состоит из последовательно соединенных аккумуляторной батареи напряжением 12 В и трансформатора с вторичным напряжением синусоидальной формы, действующее значение напряжения которого 6 В. Определить показания электромагнитного прибора.

**Некоторые единицы Международной системы СИ**

Физическая величина	Определяющее уравнение	Наименование единицы измерения	Обозначение		Размерность	Единицы не входящие в СИ			
			Международное	Русское		Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ
							Международное	Русское	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сила тока	I	ампер	A	А	I				
Угловая скорость	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	радиан в секунду	$\frac{rad}{s}$	$\frac{рад}{с}$	$T^{-1}$	градус в секунду	$\frac{o}{S}$	$\frac{o}{C}$	$1,745 \cdot 10^{-2}$
						оборот в секунду	$\frac{u}{S}$	$\frac{об}{C}$	$2\pi \frac{rad}{s} = 6,283 \frac{rad}{s}$
Частота периодического процесса	$\frac{1}{t}$	герц	Hz	Гц	$T^{-1}$				
Работа, энергия	$A = Fs$	джоуль	J	Дж	$L^2MT^{-2}$	электрон-вольт калория	eV cal	эВ кал	$1,6022 \cdot 10^{-19}J$ 4.186J
Мощность	$P = \frac{A}{t}$	ватт	W	Вт	$L^2MT^{-3}$	киловатт-час лошадиная сила вольт-ампер вар	kWh HP,PS VA var	кВтчас л.с. ВА вар	$3,6 \cdot 10^6 J$ $75kGm/s = 735,5$ W
Электрический заряд, количество электричества	$q = It$	кулон	C	Кл	T I	ампер-час	Ah	Ачас	3600 C

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Плотность тока	$\Delta = \frac{I}{S}$	ампер на квадратный метр	$\frac{A}{m^2}$	$\frac{A}{M^2}$	$L^{-2}I$	ампер на квадратный миллиметр	$A/mm^2$	$A/мм^2$	$10^6 A/mm^2$
Электрическое напряжение, потенциал, эдс	$U = \frac{A}{q} = IR$	вольт	V	В	$\frac{L^2 M}{T^{-3} I^{-1}}$				
Напряженность электрического поля	$E = \frac{F}{q} = \frac{U}{r}$	вольт на метр	$\frac{V}{m}$	$\frac{В}{м}$	$LM T^{-3} I^{-1}$				
Электрическая емкость	$C = \frac{q}{U}$	фарада	F	Ф	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$				
Диэлектрическая проницаемость абсолютная	$\varepsilon = \varepsilon_k \varepsilon_0$	фарада на метр	$\frac{F}{m}$	$\frac{Ф}{м}$	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$	$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} F/m$			
Электрическое сопротивление	$R = \frac{U}{I}$	ом	$\Omega$	Ом	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$				
Электрическая проводимость	$G = \frac{1}{R}$	сименс	S	См	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$				
Удельное сопротивление	$\rho = \frac{RS}{l}$	ом - метр	$\Omega m$	Ом · м	$L^3 M T^{-3} I^{-2}$		$\frac{\Omega mm^2}{m}$	$\frac{Омм^2}{м}$	$10^{-6} \Omega m$
Удельная проводимость	$\gamma = \frac{1}{\rho}$	сименс на метр	$S/m$	$См/м$	$L^{-3} M^{-1} T^{-3}$				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Магнитный поток, потокоцепление	$\Phi = Ut$ $\Psi = w\Phi$	вебер	$Wb$	Вб	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	максвелл	$Mx$	Мкс	$10^{-8} Wb$
Магнитная индукция	$B = \frac{\Phi}{S}$	тесла	Т	Тл	$M T^{-2} I^{-1}$	гаус	Gs	Гс	$10^{-4} T$
Напряженность магнитного поля	$H = \frac{wI}{l}$	ампер на метр	$A/m$	A/м	$L^{-1} I$	эрстед	Oe	Э	$\frac{10^3}{4\pi} A/m = 79,6$
Магнитодвижущая сила магнитное напряжение	$E_m = HI = wl$	ампер или ампервитки	$A$	$A$	I	гильберт	Gb	Гб	0,796 А
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L = \frac{\Psi}{I}$ $M = \frac{\Psi}{I}$	генри	Н	Гн	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$				
Магнитная проницаемость абсолютная	$\mu = \frac{B}{H} = \mu_r \mu_o$	генри на метр	$H/m$	Гн/м	$L^{-2} l$	$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ магнитная постоянная $H/m$			
Магнитное сопротивление	$R_m = \frac{E_m}{\Phi}$	ампер на вебер	$A/Wb$	A/Вб	$L^{-2} M^{-1} T^2 I$				

## Правила применяемые при округлении результата измерений и его погрешностей

В практической метрологии существует несколько правил, применяемых при округлении результата измерений и его погрешностей.

В соответствии с п. 3.4. методических указаний МИ 1317-86 ГСИ. «Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров», характеристики погрешностей (или их статистические оценки) должны выражаться числом, содержащим не более двух значащих цифр.

**Сначала округляют (отбрасывают значащие цифры справа до определенного разряда с возможным изменением цифры этого разряда) значение абсолютной погрешности результата измерения, а затем округляется значение результата самой измеряемой величины.**

**Если первая значащая цифра абсолютной погрешности результата измерения равна 1 или 2, то значение абсолютной погрешности округляется до двух значащих цифр. Если первая значащая цифра абсолютной погрешности результата измерения равна 3, 4, ..., 9, то значение погрешности округляется до одной значащей цифры. При этом используют стандартные правила округления.**

При этом используют стандартные правила округления.

**Если первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) меньше 5, то последнюю сохраняемую цифру не меняют.**

**Примеры:**

Число 0,27375 округляется до двух значащих цифр  $\approx 0,27$ ;

Число 8,337 округляется до одной значащей цифры  $\approx 8$ .

**Если первая из отбрасываемых цифр больше или равна 5, но за ней следует значащая цифра, то последняя остающаяся цифра увеличивается на единицу.**

**Примеры:**

Число 0,257 округляется до двух значащих цифр  $\approx 0,26$ .

Число 8,735 округляется до одной значащей цифры  $\approx 9$ .

**Если отбрасывают только одну цифру 5, а за ней нет значащих цифр, то последняя сохраняемая цифра остается неизменной, если она четная, и увеличивается на единицу, если она нечетная.**

**Примеры:**

Число 0,275 округляется до двух значащих цифр  $\approx 0,28$ ;

Число 0,145 округляется до двух значащих цифр  $\approx 0,14$ .

Вместе с тем п. 3.4. методических указаний допускалось выражать характеристики погрешностей (или их статистические оценки) числом, содержащим одну значащую цифру. При этом погрешность измерения, округляемая до первой значащей цифры, всегда увеличивается на единицу, если первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) равна или больше 5 и не меняется, если первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) меньше 5.

**Примеры:**

Число 0,273 округляется до одной значащей цифры  $\approx 0,3$ ;

Число 0,00083 округляется до одной значащей цифры  $\approx 0,0009$ .

Недостаток изложенного допущения состоит в том, что относительная погрешность от округления изменяется скачком при таком переходе. Например, при

переходе от числа 0,273 к числу 0,3 (округление до одной значащей цифры), приводит к очень большой относительной погрешности  $(0,40 - 0,30) / 0,30 = 30 \%$ , в то время как при округлении до двух значащих цифр, переход от числа 0,27 к числу 0,28, приводит к незначительной относительной погрешности  $(0,28 - 0,27) / 0,28 = 3,5 \%$ .

Если же полученное число начинается, например, с цифры 8, то сохранение второго знака, т.е. указание погрешности, например, 0,00083 вместо 0,8, приводит к незначительной относительной погрешности  $(0,00084 - 0,00083) / 0,00084 = 1 \%$ , что является дезинформацией, т.к. исходные данные не обеспечивают такой точности.

**Результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности.**

**Если число десятичных знаков в результате вычисления оказывается меньше, чем в значении абсолютной погрешности, то недостающие цифры заменяют нулями.**

**Если число десятичных знаков в результате вычисления оказывается больше, то используют стандартные правила округления.**

**Примеры.**

Правильно:  $17,0 \pm 0,2$ . Неправильно:  $17 \pm 0,2$  или  $17,00 \pm ,2$ .

Правильно:  $12,13 \pm 0,17$ . Неправильно:  $12,13 \pm 0,2$ .

Правильно:  $46,40 \pm 0,15$ . Неправильно:  $46,4 \pm 0,15$  или  $46,402 \pm 0,15$ .

Правильно:  $235,73 \pm 0,15$ . Неправильно:  $235,7 \pm 0,15$ .

**Если число есть результат расчета, то в нем должно быть сохранено столько десятичных разрядов или значащих цифр, сколько их содержится в наименее точном числе, использованном при вычислении.**

**Пример:**

Числовое значение результата расчета  $2,1 \cdot 3,45 \cdot 1,3 = 9,4185 \approx 9,4$

**Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.**

**Пример:**

Результата измерения  $220,46 \pm 4$ .

Используя стандартные правила округления:

- число знаков после запятой в оценке измеряемой величины должно совпадать с числом знаков после запятой в значении погрешности, погрешность выражается в абсолютных величинах;

- если при округлении первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) меньше 5, то последняя сохраняемая цифра не меняется, округление в окончательном ответе  $\approx 220 \pm 4$ .

Округление по этапам привело бы к ошибке:

- на I этапе -  $220,46 \pm 4 \approx 220,5 \pm 4$ ;

- на II этапе -  $220,5 \pm 4 \approx 221 \pm 4$ .

**Множители и приставки СИ для обозначения кратных и дольных единиц**

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

**Образец оформления отчета по практическому занятию и содержание пунктов отчета**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский государственный горный университет»

Кафедра Электротехники



**ОТЧЕТ**  
**по практическому занятию № \_\_\_\_**  
**по дисциплине «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»**  
**Тема: ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ**  
**СИСТЕМ**

Студент(ка) гр. \_\_\_\_\_

Дата выполнения практического занятия \_\_\_\_\_

Преподаватель

доц. Антропов Л.А. \_

Екатеринбург  
2021



## Пример оформления решения задачи

### Исходные данные:

*(Условие задачи переписать в отчёт).*

Определить показания вольтметров магнитоэлектрической и выпрямительной систем (однополупериодное выпрямление), подключенных к напряжению, которое образуется последовательно включенным аккумулятором напряжением 1,5 В и генератором прямоугольных импульсов с амплитудой 2 В.

Форма исследуемого напряжения приведена на рис.1.

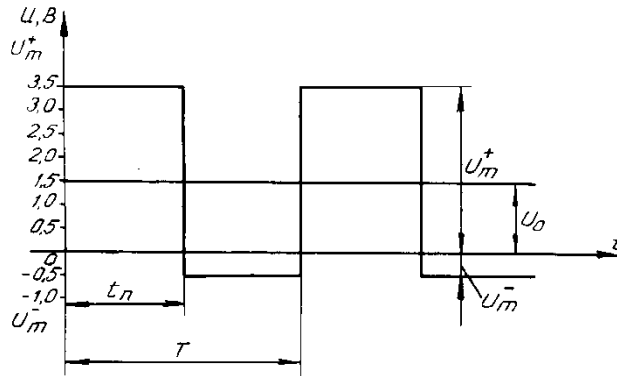


Рис. 1. Форма исследуемого напряжения к задаче.

### Решение.

Магнитоэлектрический механизм реагирует на действующее значение напряжения, которое связано с амплитудой и временными параметрами исследуемого сигнала следующей зависимостью:

$$U = \sqrt{\frac{D-1}{D^2}} \cdot U_m = \sqrt{\frac{1}{D} \left( \frac{1-1}{D} \right)} \cdot (U_m^+ - U_m^-) = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1-1}{2} \right)} \cdot 3 = 1,5 \text{ В},$$

где  $D = t_n/T = 2$ ,  $U_m^+ = 3,5 \text{ В}$ ,  $U_m^- = 0,5 \text{ В}$ .

Прибор выпрямительной системы реагирует на средневыпрямленное значение измеряемого напряжения, которое связано с амплитудным значением следующей зависимостью:

$$U_{cp.v.} = (D-1/D^2) \cdot U_m = (D-1/D^2) (U_m^+ - U_m^-) ,$$

и

$$U_{cp.v.} = (2 - 1/4) \cdot 3 = 0,75 \text{ В} .$$

Шкала прибора выпрямительной системы проградуирована в действующих значениях исследуемого напряжения, которое связано со средневыпрямленным коэффициентом формы, для нашего сигнала

$$K_\phi = U/U_{cp.v.} = 1,5/0,75 = 2 .$$

Следовательно, прибор выпрямительной системы покажет

$$U = K_\phi \cdot U_{cp.v.} = 2 \cdot 0,75 = 1,5 \text{ В}.$$

Ответ: Показания обоих приборов для данного сигнала будут одинаковыми.