

ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ
ПРИБОРАМИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ

При использовании стационарных режимов в цепях переменного тока используют приборы, которые в зависимости от принципа действия измерительной системы определяют одно из следующих значений измеряемой величины:

а) действующее значение

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}; \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$$

б) среднее значение за половину периода (постоянная составляющая)

$$I_0 = I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i dt; \quad U_0 = U_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u dt$$

в) амплитудное (максимальное) значение за период

$$I_m \quad \text{и} \quad U_m$$

г) среднев्यпрямленное значение

$$U_{cp.в} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt$$

Если кривые тока и напряжения симметричны относительно оси абсцисс, то действующее, среднее и амплитудное значения связаны между собой известными соотношениями:

1) Коэффициентом формы кривой $k_\phi = \frac{U}{U_{cp}}$ (или $\frac{I}{I_{cp}}$);

2) Коэффициентом амплитуды $k_a = \frac{U_m}{U}$ (или $\frac{I_m}{I}$).

Очевидно, что значения этих коэффициентов зависят от формы кривой напряжения (тока). Так, для синусоиды

$$k_\phi = \frac{U}{U_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad \text{и} \quad k_a = \frac{U_m}{U} = \sqrt{2} = 1.41$$

При несинусоидальных кривых значения коэффициентов k_ϕ и k_a отличаются от этих значений. Чем ближе кривая измеряемой величины к прямоугольной форме, тем ближе к единице значения k_ϕ и k_a , и наоборот, чем острее кривая, тем больше значения k_ϕ и k_a по сравнению с соответствующими значениями коэффициентов для синусоиды.

Если измеряемая величина представляет собой несинусоидальную периодически изменяющуюся функцию, то ее можно представить в виде тригонометрического ряда. Отношение действующего значения основной

гармоники U_1 ряда разложения к действующему значению U всей кривой получило название коэффициента искажения k_u

$$k_u = \frac{U_1}{U}$$

Для синусоиды

$$k_u = 1$$

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.

Приборы электродинамической, электромагнитной, электростатической и термоэлектрической систем реагируют на действующее значение измеряемой величины, а приборы магнитоэлектрической системы – на постоянную составляющую измеряемой величины.

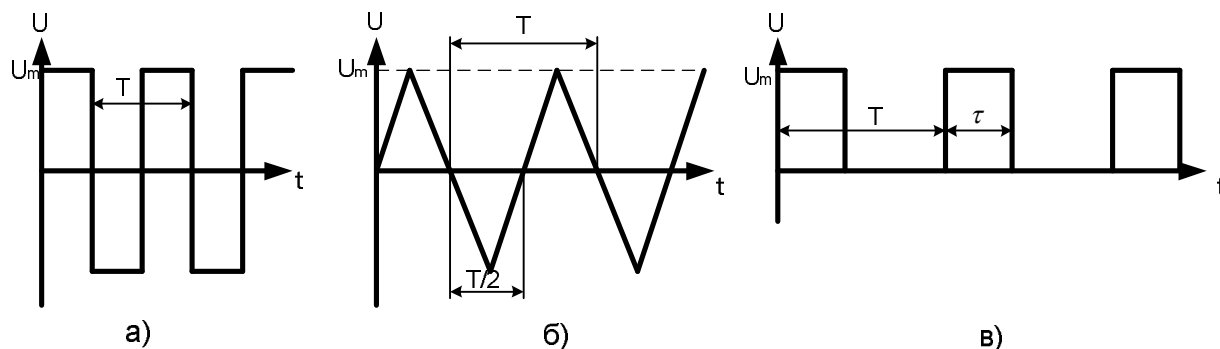


Рис.1 – формы кривой напряжения.

Приборы выпрямительной системы измеряют среднее по модулю значение измеряемой величины, а амплитудные электронные вольтметры – максимальное (амплитудное) значение. Но обычно всеми приборами (кроме магнитоэлектрических) пользуются для измерения действующих значений синусоидальных величин, и поэтому шкалы этих приборов градуируются в действующих значениях. Так, в выпрямительных приборах шкалы градуируются на напряжение $U = 1.11U_{cp}$, в амплитудных электронных вольтметрах на $U = \frac{1}{\sqrt{2}}U_m$. 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.

Посмотрим, что будут показывать приборы разных систем при различных формах кривой измеряемого напряжения (рис.1). Допустим, что $U_m = 100 B$.

В случае, приведенном на рис.1-а, магнитоэлектрический вольтметр покажет нуль, так как отсутствует постоянная составляющая; электродинамический вольтметр покажет $100 B$; выпрямительный вольтметр покажет $100 \cdot 1.11 = 111 B$; амплитудный электронный вольтметр покажет $100 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 71 B$.

В случае, приведенном на рис.1-б магнитоэлектрический вольтметр покажет нуль, так как отсутствует постоянная составляющая; электродинамический вольтметр покажет $\frac{100}{\sqrt{3}} = 58 B$; выпрямительный вольтметр покажет $50 \cdot 1.11 = 55.5 B$; амплитудный электронный вольтметр покажет $100 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 71 B$.

В случае, приведенном на рис.1-в, при $\tau = 0.25 T$ магнитоэлектрический вольтметр покажет постоянную составляющую $U_0 = 25 B$; электродинамический вольтметр покажет $100 \cdot \sqrt{0.25} = 50 B$; выпрямительный вольтметр покажет $25 \cdot 1.11 = 27.25 B$; амплитудный вольтметр покажет $100 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 71 B$.

В приведенной ниже таблице приведены некоторые виды простейших форм кривой напряжения (тока) и соответствующие им действующие и средние значения напряжения (тока), а также значения коэффициентов K_ϕ , K_a и K_u .

В ряде практических случаев представляет интерес среднее значение измеряемой величины. В этом случае следует применять только приборы выпрямительной системы, так как даже отградуированные в средних значениях приборы других систем при отличии формы кривой измеряемой величины от синусоиды будут давать погрешность. Почти все типы приборов изменяют показания в зависимости от формы кривой измеряемой величины. Исключение составляют лишь приборы термоэлектрической и электростатической систем.

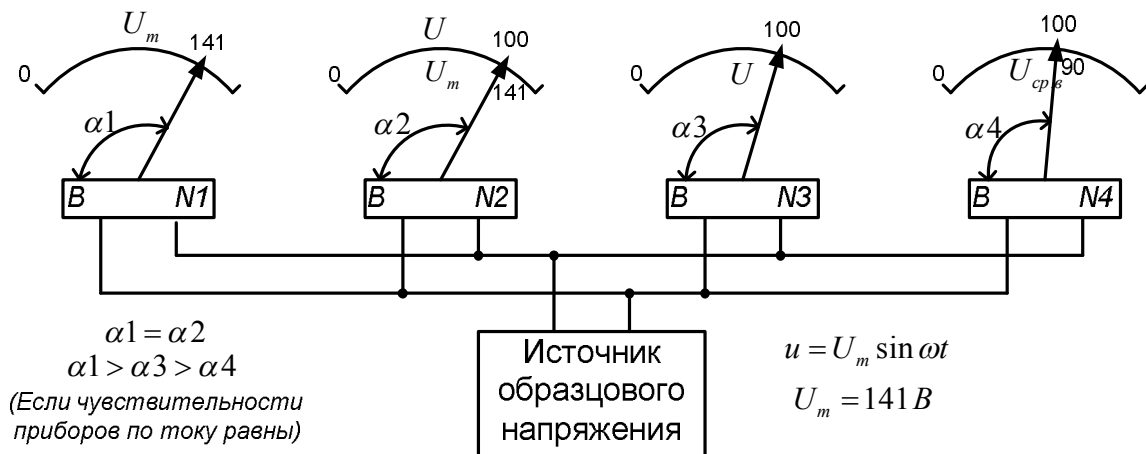
ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАНИЙ АНАЛОГОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ ОТ ФОРМЫ КРИВОЙ ИЗМЕРЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Шкалы подавляющего большинства аналоговых (стрелочных) вольтметров, предназначенных для измерения переменных напряжений, градуируют в среднеквадратичных значениях синусоидального напряжения. Шкалы импульсных вольтметров градуируют в пиковых значениях напряжения.

Соотношения между максимальным U_m , среднеквадратичным U и средневывпрямленным $U_{cp.в}$ значениями синусоидального напряжения таковы:

$$U_m = \sqrt{2}U, U = 1,11U_{cp.в}$$

При измерении напряжений, отличных по форме от синусоидальных, лишь показания квадратичных электронных вольтметров с открытым входом, а также вольтметров электромагнитной, электродинамической (ферродинамической) и электростатической систем соответствуют среднеквадратичному значению измеряемого напряжения. Показания всех других типов вольтметров (детекторы которых неквадратичны) не будут соответствовать этому значению измеряемого напряжения.



Для уяснения выше сказанного кратко познакомимся с процессом градуировки вольтметров. Пусть имеются четыре электронных вольтметра, шкалы которых нужно проградуировать. Вольтметр №1, имеющий пиковый детектор с закрытым входом, предназначается для измерения высоты импульсов. Вольтметр №2, имеющий пиковый детектор с открытым входом, предназначается для измерения синусоидальных напряжений в среднеквадратичных значениях. Вольтметр №3 имеет квадратичный детектор; вольтметр №4 – детектор средневывпрямленного значения и предназначается для измерения синусоидальных напряжений в среднеквадратичных значениях.

Подключим эти вольтметры к стабилизированному источнику синусоидального напряжения и проведем градуировку их шкал.

Пусть максимальное значение напряжения источника $U_m = 141\text{ В}$. В этом случае стрелка измерителя вольтметра №1 повернется на угол, пропорциональный U_m . Так как прибор предназначается для измерения высоты импульсов, то против конца стрелки измерителя ставят риску и число 141 ($U_m = 141\text{ В}$). Стрелка измерителя вольтметра №2 также повернется на угол, пропорциональный максимуму калибрующего напряжения, однако против конца стрелки нужно поставить число 100, так как прибор градуируется в среднеквадратичных значениях синусоидального напряжения. Угол поворота стрелки вольтметра №3 пропорционален среднеквадратичному значению калибрующего напряжения и против конца стрелки следует поставить число 100. Угол поворота стрелки измерителя вольтметра №4 пропорционален средневыпрямленному значению калибрующего напряжения ($U_{ср.в} = 90\text{ В}$), однако против конца стрелки нужно поставить число 100, так как прибор предназначен для измерения синусоидальных напряжений в среднеквадратичных значениях.

При измерении напряжений, форма которых отлична от синусоидальной, всегда нужно учитывать характер градуировки шкалы вольтметра. Так, например, если при измерении неизвестного напряжения вольтметр №4 показал 30 В, то это означает при открытом входе вольтметра, что средневыпрямленное значение измеряемого напряжения равно $30 \cdot 0.9 = 27\text{ В}$.

Если же какое-то неизвестное напряжение измерялось прибором №2 с закрытым входом и его показания равны 10 В, то можно лишь сказать, что это напряжение имело пиковое отклонение вверх над постоянной составляющей $10\sqrt{2} = 14.1\text{ В}$.

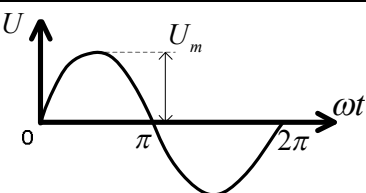
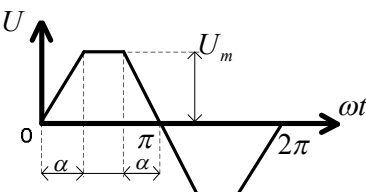
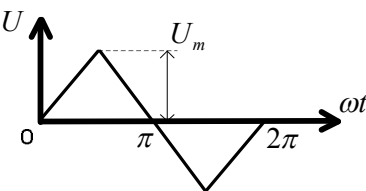
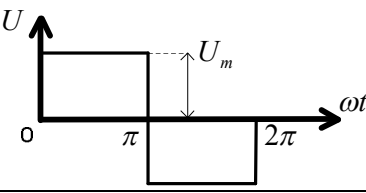
Если форма измеряемого напряжения известна, то интересующее экспериментатора значение напряжения может быть определено по отчетам прибора практически любого типа.

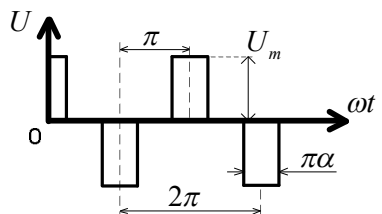
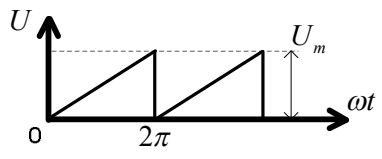
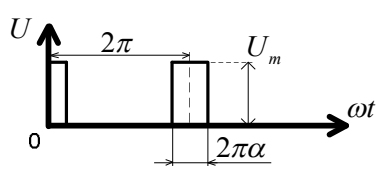
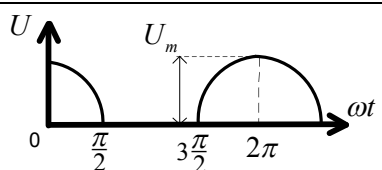
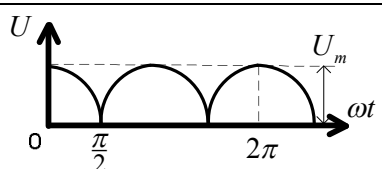
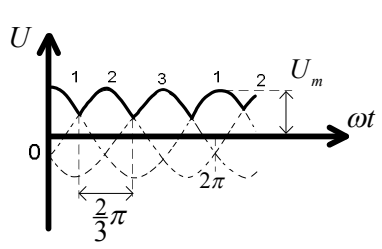
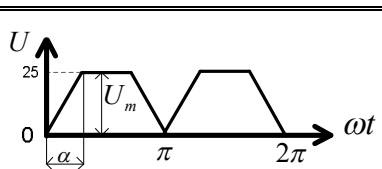
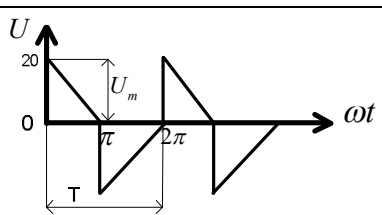
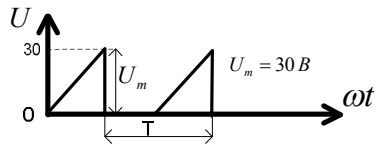
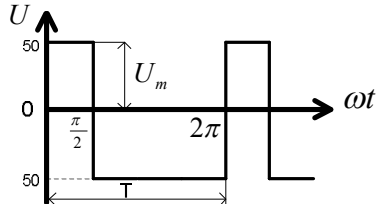
ЗАДАНИЕ К ККР ПО ТЕМЕ: ИЗМЕРЕНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИБОРАМИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ.

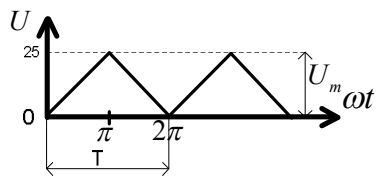
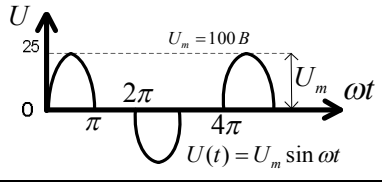
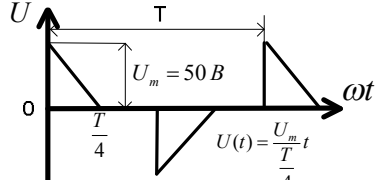
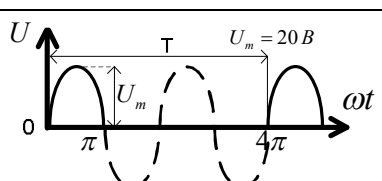
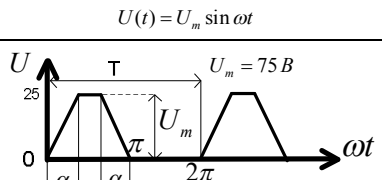
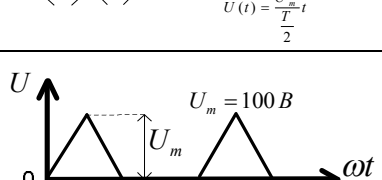
Определить результат измерения одного из несинусоидальных напряжений в зависимости от варианта, формы и параметры которых приведены в таблице №1, следующими приборами:

1. Магнитоэлектрическим вольтметром
2. Выпрямительным вольтметром
3. Электромагнитными 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 не обходимо привести схему соответствующего детектора с открытым и закрытым входами.

№ вариант а	График $U = f(\omega t)$	U	U_{cp}	k_{ϕ}	k_a	k_u
1		$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{2U_m}{\pi}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$	$\sqrt{2}$	1
2		$U_m \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}$	$U_m (1 - \frac{\alpha}{\pi})$	$\frac{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$	$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}$	$\frac{2\sqrt{2} \sin \alpha}{\alpha \pi \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}$
3		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$	$\frac{4\sqrt{6}}{\pi^2}$
4		U_m	U_m	1	1	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$

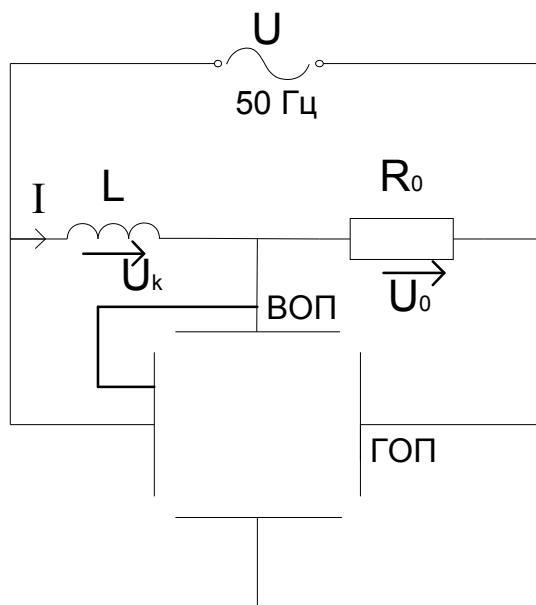
5		$U_m \sqrt{\alpha}$	$U_m \alpha$	$\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$	$\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$	$\frac{4 \sin \frac{\alpha \pi}{2}}{\pi \sqrt{\alpha}}$
6		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{\pi}$
7		$U_m \sqrt{\alpha}$	$U_m \alpha$	$\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$	$\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$	$\frac{2 \sin \alpha \pi}{\pi \sqrt{\alpha}}$
8		$\frac{U_m}{2}$	$\frac{U_m}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	2	-
9		$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{2U_m}{\pi}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$	$\sqrt{2}$	-
10		$U_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi}}$	$\frac{3\sqrt{3}U_m}{2\pi}$	$\pi \sqrt{\frac{2}{27} + \frac{1}{3\pi\sqrt{3}}}$	$\frac{2}{\sqrt{2 + \frac{3\sqrt{3}}{\pi}}}$	-
11		$U_m \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}$	$U_m (1 - \frac{\alpha}{\pi})$	$\frac{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$	$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}$	$\frac{2\sqrt{2} \sin \alpha}{\alpha \pi \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}$
12		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$	-
13		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{4}$	$\frac{4}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$	-
14		U_m	U_m	1	1	-

15		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$	-
16		$\sqrt{\frac{T}{4} \int_0^T u^2(t) dt}$	$\frac{T}{4} \int_0^T u(t) dt$	$\frac{U}{U_{cp.s}}$	$\frac{U_m}{U}$	-
17		$\sqrt{\frac{T}{4} \int_0^T u^2(t) dt}$	$\frac{T}{4} \int_0^T u(t) dt$	$\frac{U}{U_{cp.s}}$	$\frac{U_m}{U}$	-
18		$\sqrt{\frac{T}{4} \int_0^T u^2(t) dt}$	$\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$	$\frac{U}{U_{cp.s}}$	$\frac{U_m}{U}$	-
19		$\frac{U_m}{2} \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}$	$\frac{U_m}{2} (1 - \frac{\alpha}{\pi})$	$\frac{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$	$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}}}$	-
20		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{4}$	$\frac{4}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$	-

Задание 2 к ККР по теме: определение результатов измерений электрических величин с помощью электронного осциллографа.

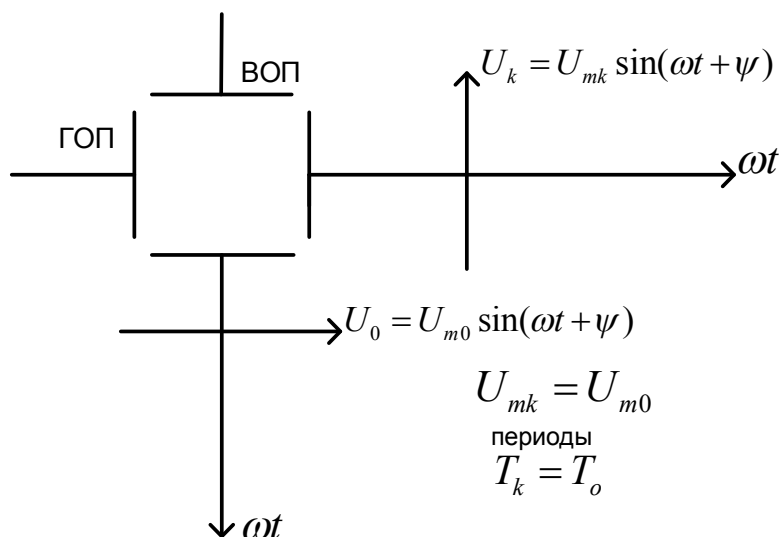
На рис.1 и рис.2 приведены схемы электрических цепей $R-L$ и $R-C$ по которым протекает ток I от источника переменного напряжения U с частотой $f = 50 \text{ Гц}$.

Напряжение на катушке индуктивности U_k , на конденсаторе C и на сопротивлениях R_0 подключены к вертикально-отклоняющим (ВОП) и горизонтально-отклоняющим (ГОП) пластинам как показано на рисунках. Исходные данные: $y_0, y_k, y, S_0, S_k = S, R_0$ приведены в таблице №2

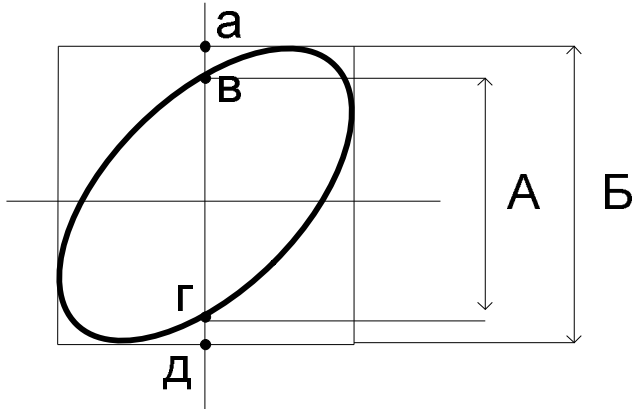


1) Используя формулу чувствительности осциллографа $S = \frac{y}{2\sqrt{2}U}$, где y - отклонение луча, U - напряжение на пластинах осциллографа. Определить напряжение U_k, U_0, U и построить векторную диаграмму напряжений (методом засечек строится треугольник напряжений) совмещенную с вектором тока. Показать на диаграмме угол сдвига фаз φ между током I_k и общим напряжением U , а также угол ψ между током I и напряжением U_k .

2) Учитывая, что угол $\psi < 90^\circ$ и что U_k опережает ток I на этот угол, построить графически фигуру Лиссажу, которая при этом будет на экране ЭО.



3) Определить угол ψ , используя зависимость отношения параметров эллипса $\frac{A}{B}$ и угла сдвига фаз ψ $\frac{A}{B} = \pm \sin \psi$



Отношения $\frac{A}{B}$ в числах приведены в таблице №1 и выбирается в соответствие варианту:

Таблица №1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{A}{B}$	$\frac{50}{52}$	$\frac{51}{68}$	$\frac{64}{80}$	$\frac{42}{60}$	$\frac{63}{70}$	$\frac{40}{65}$	$\frac{61}{74}$	$\frac{50}{78}$	$\frac{55}{76}$	$\frac{63}{72}$

№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\frac{A}{B}$	$\frac{63}{70}$	$\frac{67}{80}$	$\frac{62}{75}$	$\frac{60}{70}$	$\frac{60}{70}$	$\frac{52}{70}$	$\frac{65}{75}$	$\frac{61}{70}$	$\frac{55}{70}$	$\frac{53}{70}$

Таблица №2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_0, \text{Ом}$	18	16	15	17	13	12	14	10	11	17
$y_0, \text{мм}$	58	80	75	54	65	60	70	50	50	54
$S_0, \frac{\text{мм}}{B}$	60	82	77	56	67	62	72	52	52	56
$y_k, \text{мм}$	10.56	10.32	10.2	10.44	9.96	9.84	10.08	9.6	9.72	10.4
$y, \text{мм}$	2.16	1.92	1.8	2.04	1.56	1.44	1.68	1.2	2.28	2.04
$S_k = S, \frac{\text{мм}}{B}$	0.9	0.7	0.6	0.8	0.4	0.3	0.5	0.1	0.2	0.8

№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R_0, Ом$	18	14	12	13	16	18	15	11	10	16
$y_0, мм$	58	70	60	65	80	58	75	50	50	80
$S_0, мм/В$	60	72	62	67	82	60	77	52	52	82
$y_k, мм$	10.56	10.08	9.84	9.96	10.3	10.6	10.2	9.7	9.6	10.3
$y, мм$	2.16	1.68	1.4	1.6	1.9	2.2	1.8	2.3	1.2	1.9
$S_k = S, мм/В$	0.9	0.5	0.3	0.4	0.7	0.9	0.6	0.2	0.1	0.7

4. Используя векторную диаграмму (треугольник напряжений) и исходные данные в табл.2, определить ток I , активное сопротивление R_k , активную мощность P_k , реактивное сопротивление катушки X_{Lk} , индуктивность катушки L_k , полное сопротивление катушки Z_k , активное напряжение U_{ak} и реактивное напряжение U_{pk} , общее напряжение U , коэффициент мощности $\cos \varphi$, угол сдвига φ .

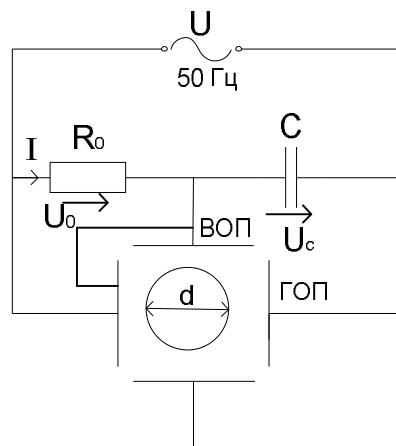


Рисунок 2

Исходные данные электрической цепи $R_0 = \frac{1}{\omega \cdot C}$; значения R_0, C, d ;

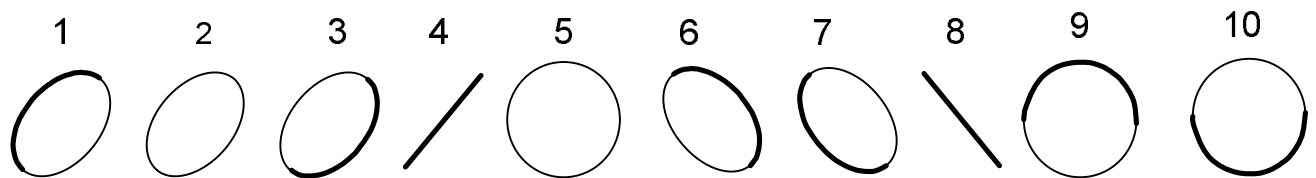
C_{uy} - цена деления по вертикали шкалы осциллографа;

C_{ux} - цена деления по горизонтали приведены в таблице 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_0, Ком$	23	10	23	10	63	16	16	32	32	32
$C, мкФ$	0.15	0.3	0.15	0.3	0.05	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
$d, мм$	15	9	10	12	10	15	8	10	6	3

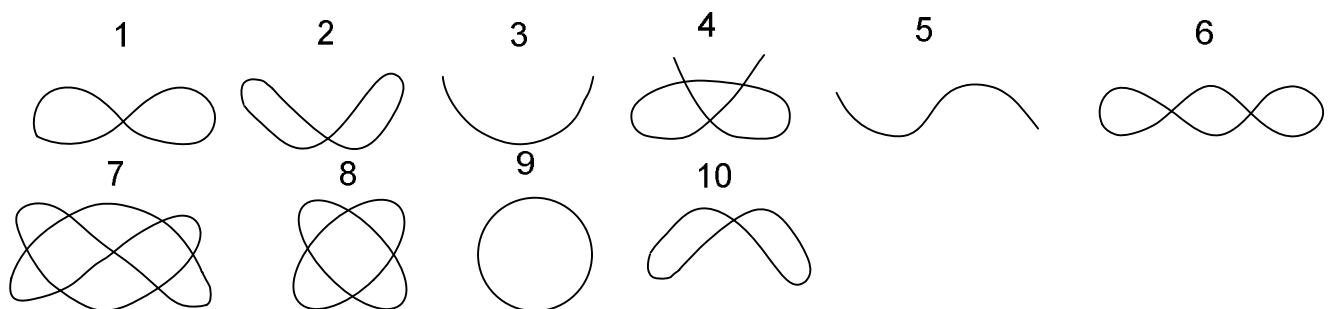
$C_{uy}, B/дел$	2	5	2	5	5	10	1	10	5	1
$C_{ux}, B/дел$	2	5	2	5	5	10	1	10	5	1
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R_0, Ком$	32	8	20	13	10	20	39	10	8	6
$C, мкФ$	0.1	0.4	0.18	0.25	0.32	0.13	0.08	0.3	0.4	0.5
$d, мм$	8	10	12	9	8	6	10	12	6	8
$C_{uy}, B/дел$	2	2	3	3	2	5	3	4	3	2
$C_{ux}, B/дел$	2	2	3	3	2	5	3	4	3	2

1. Построить векторную диаграмму напряжений
2. Учитывая, что напряжение U_c относительно напряжения U_R со сдвигом 90° , построить графически фигуру, которая при этом будет на экране осциллографа. Построения произвести аналогично тому, как выполнялось для схемы $L-R$.
3. Определить напряжение U , Z - полное сопротивление цепи $R-C$, ток I , частоту f , напряжения питания U , активную мощность P , полную мощность S , коэффициент мощности $\cos \varphi$.
4. Определить величину и знак фазового угла по приведенным фигурам Лиссажу.



5. Определить частоту на вертикальном канале ЭО f_y по известной частоте f_x на горизонтальном канале, используя приведенные фигуры Лиссажу.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_x, Гц$	100	150	700	50	120	30	300	200	500	250



6. Используя метод яркостной модуляции определить частоту модуляции f_m , если частота f_0 круговой развертки известна.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_0, \text{Гц}$	50	30	100	60	200	150	400	150	500	700

