

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВВОДНЫЙ ПРАКТИКУМ

ИРКУТСК 2004

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Иркутского государственного университета

УДК 53:001.4

Вводный практикум / Под ред. проф. А.Д. Афанасьева. – Иркутск:
Иркутский ун-т, 2004. –63 с.

Пособие содержит описания 3-х лабораторных работ вводного практикума по курсу общей физики. Описания лабораторных работ предназначены для студентов первого курса физических специальностей вузов.

Научный редактор - проф. А.Д. Афанасьев
Рецензент – проф. Г.В. Павлинский

© Иркутский государственный
университет, 2004

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Лабораторная работа 0-1	5
В.В. Дорохова, Е.Ф. Мартынович Г.Т. Тимощенко	
Градуирование термомпары и исследование теплового поля печи	
Лабораторная работа 0-2	14
В.В. Дорохова, Н.А. Иванов	
Изучение основных электроизмерительных приборов	
Лабораторная работа 0-3	36
Н.А. Иванов	
Осциллограф	

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данное учебное пособие включены описания трех наиболее важных лабораторных работ, которые необходимо усвоить всем студентам, приступающим к выполнению лабораторного практикума по общей физике первого курса. Предлагаемые работы посвящены изучению основных инструментов для измерения физических величин: термопары, электроизмерительных инструментов, осциллографа.

Каждая лабораторная работа содержит краткую теорию изучаемой проблемы, выводы основных рабочих формул и задания для выполнения лабораторных работ. Контрольные вопросы и литература, приведенные в конце каждой работы, призваны помочь студентам при самоподготовке. Преподавателям можно использовать это пособие в качестве методического пособия при планировании и организации занятий.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 0-1

ГРАДУИРОВАНИЕ ТЕРМОПАРЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ПЕЧИ

Цель работы

Ознакомление с термоэлектрическим методом измерения температур.

Задача работы

Изготовить термопару, проградуировать ее и измерить с помощью полученной термопары распределение теплового поля в заданном объекте.

1. ВВЕДЕНИЕ

Термоэлектрический метод измерения температур широко используется в физике и технике. Термопары обладают тем преимуществом, что позволяют измерять как очень высокие, так и очень низкие температуры, что невозможно сделать с помощью обычных жидкостных термометров. Термопары очень просты и компактны, могут использоваться для измерения температуры вещества в любом агрегатном состоянии, не требуя предварительного разрушения материала и практически не искажая теплового поля той области вещества, где измеряется температура. Метод определения температуры с помощью термопары обладает большой чувствительностью и малой инерционностью действия. Термопары находят широкое применение для измерения и контроля постоянства температур в очень широких пределах. Они могут применяться также как преобразователи тепловой энергии в электрическую, для измерения интенсивности оптического излучения (как видимого, так и невидимого) и т.д.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Явление термоэлектричества (Эффект Зеебека)

При соприкосновении двух разнородных проводящих материалов (металл – металл, металл – полупроводник, полупроводник – полупроводник) электроны могут переходить через контакт вследствие

теплового движения. Материал, в котором образуется избыток электронов, заряжается отрицательно, а другой – положительно. Возникает контактная разность потенциалов, которая обусловлена двумя причинами:

- различием работы выхода электронов из материалов;
- различием концентрации свободных электронов.

Исходя из классической модели электронного газа, оценим величину контактной разности двух проводящих материалов с различной концентрацией электронов. Пусть некоторый металл **B** имеет концентрацию квазисвободных электронов n_B , а металл **C** – n_C . В месте контакта образуется некоторый переходный слой, в котором концентрация электронов непрерывно изменяется от n_B до n_C . Выделим в

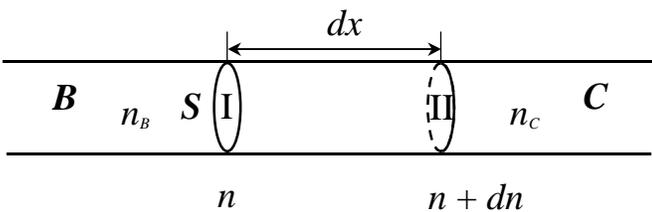


Рис. 1

переходном слое цилиндр высотой dx и площадью основания S (рис. 1). По гипотезе Лоренца свободные электроны в металле образуют электронный газ, удовлетворяющий основным представлениям молекулярно-

кинетической теории газов. Пусть в области контакта со стороны металла **B** (основание I) число свободных электронов в единице объема равно n , а со стороны металла **C** (основание II) – $n + dn$. Используя основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа, примем давление газа в основании I:

$$P = nkT,$$

а в основании II:

$$P + dP = (n + dn) kT.$$

При этом разность давлений между основаниями цилиндра равна:

$$dP = kT dn \quad (1)$$

Вследствие этой разности давлений электроны начнут перемещаться от металла **C** к металлу **B**, что сопровождается переносом заряда, и следовательно, возникновением разности потенциалов dj между основаниями цилиндра, препятствующей дальнейшему перемещению электронов. Когда тормозящая сила, возникшего электрического поля dF_1 , станет равна силе, обусловленной разностью давлений электронного газа dF_2 наступит динамическое равновесие.

Суммарный заряд электронов в рассматриваемом объеме определится как:

$$dq = ne dx S,$$

где e – заряд электрона.

При этом сила, действующая на заряд dq со стороны возникшего электрического поля: $dF_1 = E dq$, где E – напряженность электрического поля. Последняя определяется через разность потенциалов на концах участка dx :

$$E = dj / dx,$$

т.е. сила, действующая на электроны, будет равна:

$$dF_1 = n e dx S dj / dx.$$

С другой стороны, сила, обусловленная разностью давлений на концах рассматриваемого участка:

$$dF_2 = S dP.$$

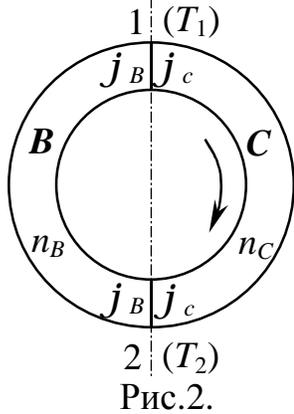


Рис.2.

При достижении динамического равновесия: $dF_1 = dF_2$, т.е.:

$$S dP = ne dx S dj / dx \quad (2)$$

Подставляя в последнее выражение уравнение (1) имеем:

$$SkTdn = ne S dj$$

и разделив переменные, получим дифференциальное уравнение первого

порядка: $\frac{dn}{n} = \frac{e}{kT} dj$.

Интегрируя последнее уравнение в пределах всего переходного слоя BC, приходим к выражению:

$$j_c - j_B = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_C}{n_B}$$

Итак, при соприкосновении двух разнородных материалов между ними возникает контактная разность потенциалов, обусловленная различной концентрацией носителей тока.

Если из таких разнородных металлов составить замкнутую цепь (рис. 2) и контакты 1 и 2 поддерживать при одинаковой температуре, то ЭДС такой цепи равна нулю и поэтому никакого тока в ней не будет. Таким образом, хотя в каждом из контактов и возникает ЭДС, равная внутренней контактной разности, эти ЭДС равны по величине и противоположны по знаку, и поэтому полная ЭДС цепи:

$$U_1 + U_2 = 0.$$

Если контакты поддерживать при различной температуре, то т.к. внутренние контактные разности потенциалов зависят от температуры, то теперь уже их сумма не равна нулю. Поэтому не будет равна нулю и полная ЭДС цепи, и в последней появится ток. Это явление получило

название термоэлектричества, а возникающая электродвижущая сила называется термоэлектрической (*термоэдс*).

Действительно, разность потенциалов на контакте 1:

$$(j_C - j_B)_1 = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_C}{n_B} \alpha,$$

на контакте 2:

$$(j_B - j_C)_2 = \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_B}{n_C}$$

Сумма контактных скачков потенциала равна термоэлектродвижущей силе:

$$e = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_C}{n_B} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_B}{n_C} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_C}{n_B} (T_1 - T_2).$$

Обозначая $\frac{k}{e} \ln \frac{n_C}{n_B} = a$, мы получим следующее выражение для

величины термоэлектродвижущей силы: $\varepsilon = \alpha (T_1 - T_2)$

Величину α называют коэффициентом термоэдс или коэффициентом Зеебека. Хотя ТЭДС прямо пропорциональна разности температур спаев, она зависит не только от нее. Особенно это заметно при большой разности температур. Поэтому для характеристики термоэлектрических свойств какой-либо пары проводников пользуются дифференциальной ТЭДС, которая равна термоэлектродвижущей силе, возникающей при разности температур спаев в один градус:

$$\alpha = de/dT.$$

В классическом приближении можно считать, что концентрация электронов не зависит от температуры, и тогда a является постоянной величиной для данной пары металлов, приведенных в контакт.

Зависимость термоэдс от температуры используется в настоящее время для измерения температур в чрезвычайно широком диапазоне. Измерения проводятся с помощью устройства, называемого термопарой.

2.2. Устройство термопары

Замкнутая цепь, состоящая из двух разнородных металлов, места соединения которых поддерживаются при различных температурах, называется термопарой (рис. 3). Технически термопара представляет собой две проволоки из различных металлов, в месте контактов которые свариваются или спаиваются. Один из контактов помещается в термостатированную среду большой теплоемкости с известной и постоянной температурой T_0 , а второй в область, температура которой

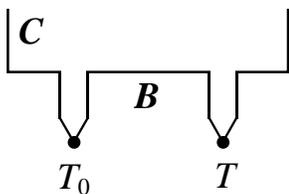


Рис.3

измеряется T . Для измерения возникающей термоэдс в цепь необходимо включить гальванометр. Для подключения этого прибора разрыв цепи производится по проводнику, приобретающему положительный потенциал в контакте с другим. Так,

в термопаре медь–константан разрыв осуществляется по меди.

Зависимость термоэдс от температуры для данной пары металлов, составляющей термопару, обычно заранее известна (в виде градуировочного графика $\varepsilon = \alpha(T - T_0)$, где α – угол наклона этого графика к оси температур). Такая термопара называется дифференциальной, т.к. с ее помощью можно измерять разность температур.

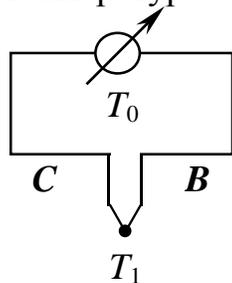


Рис. 4

Оценить температуру какой-то среды можно и с помощью термопары, схема измерения которой представлена на рис. 4. Однако точность такого измерения будет небольшая, т.к. в этом случае показания термопары в значительной степени будут зависеть от колебаний температуры окружающей среды T_0 (роль второго спая играет контакт с гальванометром).

Поэтому преимущество дифференциальной термопары несомненно. Для снижения погрешности в определении термоэдс

применяется компенсационный метод.

Термопары могут изготавливаться из различных пар материалов. Наиболее употребительны термопары: медь–константан, константан–железо, хромель–алюмель, платина–платина+родий (10%). Термоэлектродвижущая сила может быть усилена путем применения ряда термопар, соединенных последовательно, причем, например, все четные спаи нагреваются, а все нечетные – охлаждаются. Такая система термопар называется термостолбиком, имеющим ЭДС $\varepsilon = N\varepsilon_i$, где N – число термопар.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Упражнение 1.

Изготовление термопары медь–константан.

Приборы и принадлежности: сварочный агрегат, медная и константановая проволоки на катушках, раствор буры, пинцет, ножницы, наждачная бумага.

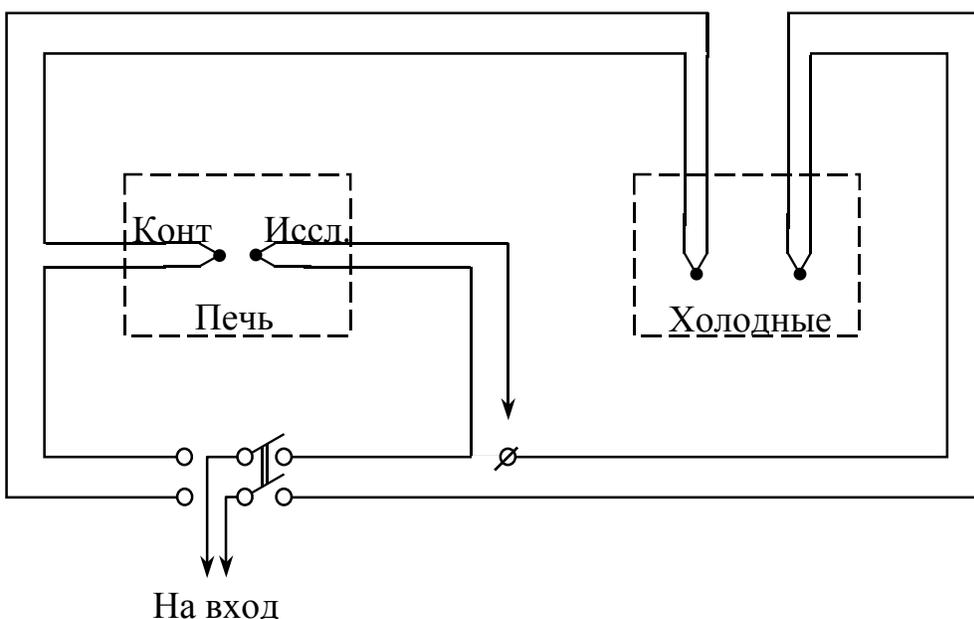


Рис. 5

1. Отрезать от катушек два куска проволоки (медной и константановой) длиной 15 – 17 см. Тщательно очистить наждачной бумагой концы проводников (по 1 см), сложить параллельно друг другу, концы скрутить и обрезать ножницами.

2. Окунуть скрученные концы проволок в раствор буры и сварить их на сварочном устройстве в вольтовой дуге. (К графитовому электроду сварочного агрегата проволока подносится с помощью находящегося в ней в контакте пинцета.) Если термопара сварена правильно, то в месте контакта образуется «королек».

Упражнение 2.

Градуирование термопары медь–константан.

Приборы и принадлежности: термопара медь–константан, контрольная термопара железо–константан, электропечь, цифровой вольтметр, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), градуировочный график контрольной термопары.

Описание установки

Установка, применяемая в работе, состоит из электропечи, по оси которой установлен массивный медный цилиндр для создания однородности теплового поля печи. С одной стороны в цилиндр введен «горячий» спай контрольной термопары, с другой вдвигается на штативе «горячий» спай исследуемой термопары, который необходимо поместить как можно ближе к «горячему» спаю контрольной термопары. «Холодные» спаи обеих термопар термостатированы с помощью специального сосуда с маслом, температура которого измеряется термометром (T_0).

Как мы видим, обе термопары являются дифференциальными. Измерение термоэдс осуществляется универсальным цифровым вольтметром В7-38. Установка снабжена тумблером «Контр. – Иссл.», с помощью которого происходит подключение к потенциометру каждой из термопар и поочередное измерение их термоэдс (e_k , $e_{\text{иссл}}$). Питание печи осуществляется от сети переменного тока с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа). Напряжение, подаваемое на спираль печи, не должно превышать 80 В. Нагревание печи производится ступенчато.

Порядок выполнения работы

1. Ввести исследуемую термопару в печь как можно ближе к центру печи.
2. Установить на ЛАТРе напряжение 20 В. Тумблер «Контр. – Иссл.» установить в положение «Контр.» Выдержать 10 – 15 минут для установления постоянной температуры в печи (стационарный режим) –

при этом стрелка гальванометра перестанет отклоняться от нулевого положения.

3. Измерить термоэдс контрольной термопары (\mathcal{E}_k) и быстрым переключением тумблера на «Иssl.» – термоэдс исследуемой термопары ($\mathcal{E}_{\text{иссл}}$).

4. Увеличивая напряжение на ЛАТРе через каждые 10 В до 70 В, провести аналогичные измерения \mathcal{E}_k и $\mathcal{E}_{\text{иссл}}$.

5. Используя градуировочный график контрольной термопары, определить разность температур спаев исследуемой термопары ($T - T_0$), считая, что обе термопары (контрольная и исследуемая) находятся при одинаковой температуре. Результаты измерений занести в таблицу 1:

ТАБЛИЦА 1

№ п/п	Напряжение на ЛАТРе	\mathcal{E}_k , мВ	$\mathcal{E}_{\text{иссл}}$, мВ	$(T - T_0)^\circ\text{C}$
-------	---------------------	----------------------	----------------------------------	---------------------------

6. Построить градуировочный график для исследуемой медно–константановой термопары $\mathcal{E}_{\text{иссл}} = f(T - T_0)$.

Упражнение 3.

Исследование температурного поля печи с помощью медно–константановой термопары.

Приборы и принадлежности: установка, градуировочный график термопары медь–константан, цифровой вольтметр В7-38 .

1. Установить «горячий» спай термопары медь–константан в центре печи, замечая положение штатива по шкале. Тумблер «Контр. – Иssl.» поставить в положение «Иssl.».

2. Установить на ЛАТРе напряжение 50 В и подождать до тех пор, пока температура в печи не станет постоянной (стационарный режим). Стрелка гальванометра при этом не отклоняется от нулевого положения.

3. Произвести измерение термоэдс термопары \mathcal{E}_1 .

4. Перемещая «горячий» спай термопары вдоль оси печи от центра к выходу через 1 см, произвести аналогичные измерения термоэдс \mathcal{E}_2 ,

e_3, e_4, e_5, \dots . Показания по потенциометру снимать только в стационарном режиме.

5. Используя градуировочный график термопары медь–константан, определить температуру в печи: $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots$.

6. Результаты измерений занести в таблицу 2.

ТАБЛИЦА 2

№ п/п	$l, \text{ см}$	$e_i, \text{ мВ}$	$T_i, \text{ }^\circ\text{C}$
-------	-----------------	-------------------	-------------------------------

7. Построить график теплового поля печи в виде зависимости $T = T(l)$, где l – расстояние до центра печи.

8. По графику $T = T(l)$ рассчитать величину градиента теплового поля вдоль оси печи.

Напомним, что в одномерном случае градиент – это вектор, направленный в сторону возрастания переменной величины, модуль которого равен определяется выражением

$$|\text{grad } T| = \left| \frac{\partial T}{\partial l} \right|.$$

На практике это выражение можно заменить другим:

$$|\text{grad } T| = \left| \frac{\Delta T}{\Delta l} \right|,$$

где ΔT – разность температур на участке Δl , определяемая из графика этой зависимости. Длина этого участка выбирается такой, чтобы в его пределах зависимость $T(l)$ можно было аппроксимировать прямой линией.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление термоэлектричества?
2. Какими причинами объясняется возникновение контактной разности потенциалов?
3. Каким образом зависит термоэлектродвижущая сила от разности температур спаев? Приведите вывод формулы этой зависимости.
4. Что понимается под постоянной термопары, зависит ли она от температуры?

5. Какая термопара называется дифференциальной? В чем ее преимущество перед другими термопарами?

6. Для чего необходимо иметь при измерении температур градуировочный график термопары?

7. Что называется градиентом температуры? Укажите физический смысл.

8. Как получить график теплового поля с помощью термопары?

Инструкция работы с цифровым вольтметром В7-38.

Измерение напряжения проводить в следующем порядке:

1. Подключить объект измерения, соблюдая полярность, на вход вольтметра.
2. Переключить вольтметр в положение для измерения постоянного напряжения. (V-, 1 kv)
3. Значения измеренного напряжения считываются по шкале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики. М., 1970 г.
2. Калашников С. Г. Электричество М., 1964 г. с. 502.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С УСТАНОВКОЙ

1. Следить, чтобы в исходном положении напряжение на обмотке электропечи равнялось нулю, что соответствует нулевому положению ЛАТРа.

2. Не трогать руками спай термопары в рабочем режиме.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 0-2

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы

Ознакомление с устройством и принципом действия основных электроизмерительных приборов.

Задача работы

Произвести градуировку электроизмерительных приборов.

1. Классификация и технические характеристики электроизмерительных приборов.

К электроизмерительным приборам относятся приборы для измерения величины тока (амперметры), напряжения (вольтметры), мощности (ваттметры) и сопротивления (омметры) в цепях постоянного и переменного тока.

На панелях электроизмерительных приборов указываются их технические характеристики:

- 1) единицы измеряемых величин (табл. 1);
- 2) класс точности прибора;
- 3) система прибора (табл. 2);
- 4) наличие защиты измерительной цепи от магнитных или электрических полей и вид преобразователя (табл. 3);
- 5) рабочее положение прибора и испытательное напряжение изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу (табл. 4);
- 6) род тока и число фаз (табл. 5);
- 7) устойчивость к климатическим воздействиям.

Здесь могут быть также указаны внутреннее сопротивление измерительного механизма, ток, отклоняющий стрелку на всю шкалу прибора, падение напряжения на внутреннем сопротивлении, год изготовления и заводской номер.

Таблица 1

Обозначение единиц измеряемых величин на приборах.

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Ампер	A	Ом	Ω
Килоампер	kA	Килоом	k Ω
Миллиампер	mA	Магом	M Ω
Микроампер	μ A	Миллиом	m Ω
Вольт	V	Микроом	$\mu\Omega$
Киловольт	kV	Микрофарада	μ F
Милливольт	mV	Пикофарада	pF
Ватт	W	Генри	H
Киловатт	kW	Миллигенри	mH
Мегаватт	MW	Микрогенри	μ H
Мегавар	Mvar	Коэффициент реактивной мощности	Sin ϕ
Коэффициент мощности	Cos ϕ		

По устойчивости к климатическим воздействиям электроизмерительные приборы делятся на группы А, Б, В. Приборы группы А предназначены для работы в сухих, отапливаемых помещениях, Б – в не отапливаемых помещениях, В – для работы в полевых или морских условиях.

Таблица 2.

Условные обозначения систем приборов

Тип прибора	Обозначение систем электроизмерительных приборов	
	С механическим противодействующим моментом	Без механического противодействующего момента
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой		
Магнитоэлектрический с подвижным магнитом		
Электромагнитный		

Электродинамический		
Ферродинамический		
Индукционный		
Электростатический		—
Вибрационный		—
Тепловой		—
Биметаллический		—
Термоэлектрический		—

Таблица 3.

Обозначения, характеризующие вид преобразователя и наличие защиты измерительной цепи

Наименование	Обозначение
Выпрямитель полупроводниковый	
Выпрямитель электромеханический	
Электронный преобразователь	
Термоэлектрический преобразователь	
Защита от внешних магнитных полей	
Защита от внешних электрических полей	

Таблица 4.

Обозначения, характеризующие рабочее положение приборов и прочность изоляции по отношению к корпусу

Наименование	Обозначение
Вертикальное положение	
Горизонтальное положение	

Наклонное положение	
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением (например, 2 кВ)	
Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи не соответствует нормам!	
Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте прибора.	

Таблица 5.

Род тока измеряемого прибором

Род тока	Обозначение
Постоянный	—
Переменный	•
Переменный и постоянный	•
Трёхфазный	•
Трёхфазный с неравномерной нагрузкой фаз	•/

Кроме того, в соответствии с ГОСТом электроизмерительные приборы классифицируются также:

а) по положению нулевой отметки на шкале: с односторонней шкалой, с двусторонней симметричной шкалой и двусторонней несимметричной и безнулевой шкалой;

б) по количеству диапазонов измерений: однопредельные и многопредельные (несколькими диапазонами измерений);

в) по конструкции отсчетного устройства: со стрелочным, световым или вибрационным указателем, с подвижной шкалой, с пишущим устройством, с цифровой индикацией;

г) по характеру шкалы: с равномерной шкалой, с неравномерной шкалой, (степенной, логарифмической)

Как уже указывалось, электроизмерительные приборы встречаются со стрелочным и световым указателем и цифровой индикацией, в которых применяются электронные методы измерения и представления информации без преобразования ее в механическое движение. Стрелочный указатель представляет собой перемещающийся по шкале стрелку, жестко скрепленную с подвижной частью прибора. Световой

способ отсчета заключается в следующем: на оси подвижной части закрепляется зеркальце, освещаемое специальным осветителем; луч света, отраженный от зеркальца, попадает на шкалу и отображается на ней в виде светового пятна с темной нитью посередине. Световой отсчет позволяет существенно увеличить чувствительность прибора, во-первых, вследствие того, что угол поворота отраженного луча вдвое больше угла поворота зеркальца, а во-вторых, потому, что длину луча можно сделать весьма большой.

На корпусе приборов, как правило, устанавливается **корректор**– приспособление, предназначенное для установки прибора в нулевое положение, и **арретир** - устройство, предназначенное для предохранения подвижной части прибора от повреждений при переноске, транспортировке и хранении.

2. ПОГРЕШНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

2.1. Абсолютная и относительная погрешности

Важнейшей характеристикой электроизмерительного прибора является его погрешность. В качестве действительного значения измеряемой величины принимается величина, измеренная образцовым прибором. Разность между показанием образцового прибора a_0 и показанием прибора a , которым определяется искомая величина, называется **абсолютной** погрешностью: $Da = a_0 - a$.

Точность измерения обычно характеризуются **относительной погрешностью** e , которая представляет собой отношение абсолютной максимальной погрешности к действительному значению измеряемой величины.

В большинстве случаев для характеристики электроизмерительных приборов пользуются **приведенной погрешностью** e_n . Приведенной погрешностью называется отношение максимальной абсолютной погрешности к предельному максимальному значению измеряемой величины: $e_n = Da_{max} / a_{пред. max}$

Если прибор имеет двухстороннюю шкалу, то $a_{пред.}$ определяется как $a_1 + a_2 / 2$, где a_1 и a_2 – значения максимального предела измерений слева и справа от нуля. Для приборов с безнулевой шкалой $e_n = Da_{max} / a_2$, где a_2 – конечное значение рабочей части шкалы.

Необходимость введения приведенной ошибки объясняется тем, что даже при постоянстве абсолютной погрешности по всей шкале прибора относительная погрешность не остается постоянной. Рассмотрим пример:

Прибор предназначенный для измерения постоянного тока до 200 мА. Максимальная абсолютная погрешность прибора $Da = \pm 3$ мА. Причем эта погрешность условно принимается постоянной для каждой точки шкалы прибора. Относительная же погрешность прибора изменяется, например, при измерении тока величиной 50 мА

$$e_1 = \frac{3 \text{ мА}}{50 \text{ мА}} * 100\% = 6\%;$$

при измерении тока величиной 100 мА

$$e_2 = \frac{3 \text{ мА}}{100 \text{ мА}} * 100\% = 3\%;$$

при измерении тока величиной 200 мА

$$e_3 = \frac{3 \text{ мА}}{200 \text{ мА}} * 100\% = 1,5\%.$$

Таким образом, наибольшая относительная погрешность будет в первой части шкалы прибора. В связи с этим измерения рекомендуется проводить в третьей части шкалы прибора, то есть там, где относительная ошибка наименьшая.

2.2. Класс точности прибора

Приведенная погрешность, выраженная в процентах, называется **классом точности** прибора: $e_n = Da_{max} / a_{пред. max} * 100\%$. Класс точности указывается на шкале прибора в одном из трех вариантов, например, для класса точности 1,5 возможны обозначения: 1,5; ~~1,5~~ и (1,5). Первые два обозначения следует читать так: приведенная погрешность не превышает 1,5%. Третий же вариант читается: приведенная погрешность не превышает 1,5% от длины шкалы прибора.

В настоящее время электроизмерительным приборам в соответствии со стандартом присвоено девять классов точности: 0,01; 0,02; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Приборы классов точности от 0,01 до 0,5 включительно называются прецизионными и используются для точных лабораторных исследований. Приборы классов точности от 1,0 до 4,0 включительно – технические, выше 4,0 – внеклассовые.

2.3. Чувствительность электроизмерительного прибора

Важной характеристикой электроизмерительного прибора является **чувствительность**, которая характеризуется способностью прибора реагировать на изменение измеряемой величины. Оценивается она отношением изменения положения указателя на шкале к изменению измеряемой величины, вызвавшему это перемещение: $S = Db/Da$, где b – угловое или линейное перемещение указателя измеряемая; a – измеряемая величина. Если шкала прибора равномерная, чувствительность будет постоянной ($S = Const$). Если шкала не равномерная, чувствительность определяется для каждой точки шкалы: $S_a = db/da$. Величина, обратная чувствительности прибора, называется **постоянной прибора**: $C = 1/S = Da/Db$. Порог чувствительности – такое изменение измеряемой величины, которое вызывает наименьшее изменение его показаний.

3. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ

3.1. Магнитоэлектрическая система

Приборы этой системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. Схема отклоняющего механизма показана на рисунке 1.

Прямоугольная рамка с n витками изолированного провода (2), по которым проходит измеряемый ток J , находится в кольцевом зазоре.

За счет постоянного магнита (1) с полюсными наконечниками (4) и цилиндрического сердечника (7) в зазоре создается радиальное магнитное поле величиной \vec{B} . Рамка удерживается в зазоре и может вращаться вокруг оси (6). При отсутствии тока, рамка, с прикрепленным к ней указателем (3) (стрелка или зеркальце), удерживается на нулевом делении шкалы (8) двумя пружинами (5). В чувствительных приборах вместо осей и спиральных пружин используются две ленточные растяжки. Измеряемый ток подводится к виткам через пружины и растяжки.

Угол поворота определяется равенством моментов $M_1 = k_1 j$ - момент сил спиральных пружин и $M_2 = k_2 J$ - момент сил, обусловленный протеканием тока в рамке. Угол $j = \frac{k_2}{k_1} J = k J$ пропорционален измеряемому току, в котором и градуируется шкала прибора. При протекании через витки измеряемого тока появляется вращающий рамку момент сил $\vec{M}_2 = \vec{m} \times \vec{B}$, где $\vec{m} = n J \vec{S}$ - магнитный момент рамки с током J , вектор \vec{S} численно равен площади витка и направлен перпендикулярно их плоскости (в нашей геометрии магнитного поля вектор \vec{S} перпендикулярен \vec{B} при любом повороте рамки).

Характер прихода рамки к равновесию определяется уравнением:

$$I \ddot{j} + b \dot{j} + k_1 j = M_2, \quad (1)$$

которое делением всех членов уравнения на I обычно приводится к виду:

$$\ddot{j} + 2g \dot{j} + w^2 j = \frac{M_2}{I}, \quad (2)$$

где I - момент инерции рамки с указателем, $\frac{1}{g} = t$, $t \approx 0,1$ с - характерное

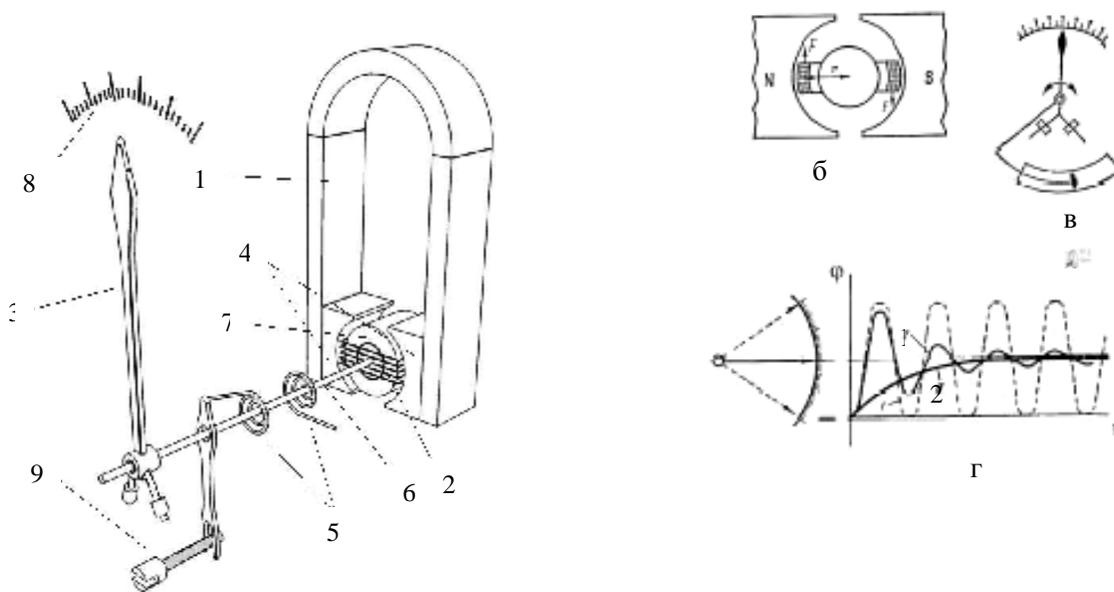


Рис.1. Магнитоэлектрический измерительный механизм с внешним магнитом

время затухания колебаний. bj - зависимость момента сил трения от угловой скорости; $w_0 = \sqrt{\frac{I}{k_1}}$ - частота собственных колебаний рамки в отсутствии сил трения.

Решение этого уравнения дает следующую зависимость от времени угла поворота рамки:

$$j(t) = j_0(1 - e^{-gt} \sin \Omega t). \quad (3)$$

Здесь $\Omega = w_0 \sqrt{1 - \frac{1}{(w_0 t)^2}}$ - частота колебаний подвижной системы, при наличии трения.

При включении постоянного тока рамка приходит к равновесию в режиме затухающего колебательного процесса (рис.1г, кривая 1). Для сокращения времени установления равновесных показаний прибор конструируют так, чтобы частота колебаний подвижной системой стремилась к нулю и время прихода к равновесию было минимальным (рис.1г, кривая 2). Иногда для этого вводят специальные демпфирующие устройства: воздушные, электромагнитные (смотри рис.1в).

Если период колебаний тока $T \ll t$, постоянная составляющая вращающего момента пропорциональна среднему току:

$$j = k\bar{J} = k \frac{1}{T} \int_0^T J(t) dt. \quad (4)$$

При $J = J_0 \sin \omega t$ среднее значение тока, а соответственно и j , равны нулю, т.е. при любой величине протекающего переменного тока показания прибора отсутствуют. Если период колебаний тока мал, т.е. $T \gg t$, стрелка прибора будет колебаться с частотой ω . Некоторые приборы магнитоэлектрической системы, имеющие на шкале рисунок диода, снабжены устройством, выпрямляющим ток – “детектором” и могут использоваться для измерения в цепях переменного тока.

Достоинствами магнитоэлектрических приборов являются высокая чувствительность – до $3 \cdot 10^{-11}$ А, высокая точность – до 0,1%, малое потребление мощности – до 10^{-5} - 10^{-6} Вт, низкая чувствительность к внешним магнитным полям, равномерность шкалы.

Недостатки проявляются в сложности изготовления и ремонта, недопустимость перегрузок по току (отламываются стрелки, перегорают токоподводящие пружинки, растяжки, обмотка рамки). Об этих недостатках часто забывают студенты.

Обычно сопротивление обмотки рамки, выполняемой тонким проводом, составляет 100-1000 Ом, ток полного отклонения 0,1 – 1,0 мА и при непосредственном включении рамки в цепь прибор может использоваться в качестве микроамперметра, миллиамперметра или милливольтметра.

3.2. Электромагнитная система

Работа гальванометров электромагнитной системы основана на эффекте втягивания железного сердечника катушкой, по которой проходит ток (рис. 2). Такой гальванометр состоит из неподвижной катушки 1 и железной пластинки 2, вращающейся вокруг оси, на которой закреплены удерживающая пластинку пружина и стрелка. При пропускании по катушке электрического тока любого направления железная пластинка втягивается в катушку, поворачиваясь на своей оси и перемещая стрелку. Для уменьшения колебаний стрелки применяется "успокоитель" (демпфер), состоящий из цилиндра, в котором движется поршень 3, связанный с железной пластинкой. Электромагнитные приборы менее точны, чем магнитоэлектрические, но проще по конструкции.

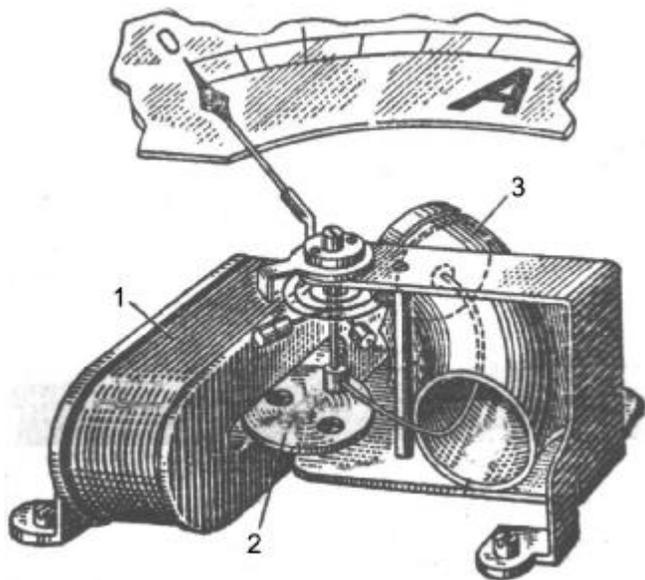


Рис. 2. Электромагнитная система.

Магнитное поле катушки пропорционально значению измеряемого тока. Поскольку намагничивание железной пластинки также пропорционально величине измеряемого тока, то момент пары сил,

действующий на сердечник, равен: $M = k_1 J^2$, где k_1 – коэффициент пропорциональности; J – ток в катушке. Противодействующий момент пружины при закручивании на угол φ равен: $M_2 = k_2 j$, где k_2 – постоянная кручения пружины. Для состояния равновесия $M_1 = M_2$, откуда $j \approx kJ^2$. Вследствие квадратичной зависимости знак отклонения не зависит от направления тока, и, следовательно, приборы электромагнитной системы могут применяться в цепях как постоянного, так и переменного тока.

При протекании через катушку прибора переменного синусоидального тока отклонение стрелки будет определяться средним квадратом тока (шкала прибора размечается в единицах $J_{\text{эфф}} = \sqrt{J^2}$ – так называемых эффективных или действующих значениях тока или напряжения). Для $J = J_0 \sin \omega t$ эффективное значение тока равно:

$$J_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int J_0^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{J_0}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Здесь $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

К достоинствам приборов этой системы относится также простота конструкции, выносливость в отношении перегрузок, возможность измерения постоянных и переменных токов. Изменяя число витков и сечение провода обмотки легко изготовить приборы на разные токи полного отклонения (обычно от 100 мА до 100 А). Недостатками их являются неравномерность шкалы, меньшая точность по сравнению с магнитоэлектрическими приборами, зависимость показаний от внешних магнитных полей, поскольку собственное магнитное поле слабо, зависимость показаний от частоты. Полное сопротивление катушки $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ определяется ее активным сопротивлением R и индуктивностью L и зависит от частоты, поэтому величина тока через обмотку уменьшается с увеличением частоты, при неизменном напряжении $J = U / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Обычно приборы этого типа градуируют на частотах 50-400 Гц, когда активное сопротивление катушки много больше индуктивного. Эти частоты указываются на шкале прибора. Для защиты от внешних полей употребляются два способа – астатирование и экранирование.

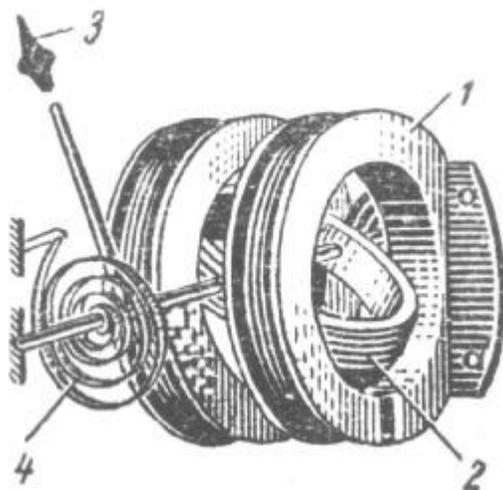
В астатическом измерительном механизме на оси подвижной части укреплены два одинаковых сердечника, каждый из которых размещается в магнитном поле одной из катушек, включенных между собой

последовательно. Направление обмоток выбрано так, что магнитные поля F_1 и F_2 катушек направлены навстречу друг другу. Ось подвижной части такого прибора будет находиться под действием суммы двух моментов, каждый из которых создается одним из сердечников и действующей на него катушкой. Если такой измерительный механизм поместить в равномерное внешнее поле, то один из моментов, для которого направление собственного и возмущающего момента будут совпадать, увеличится, а второй, соответственно, уменьшится. Суммарный момент, действующий на ось, а следовательно, и показания прибора при этом не изменятся.

При магнитном экранировании измерительный механизм помещают внутрь замкнутой оболочки из ферромагнитного материала с большой магнитной проницаемостью (чаще всего из пермаллоя). Для улучшения магнитной защиты иногда применяют экраны из двух или нескольких оболочек. Действие экрана состоит в том, что магнитные линии внешнего поля, стремясь пройти по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, сгущаются внутри стенок экрана, почти не влияя на измерительный механизм прибора.

3.3. Электродинамическая система

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии катушек, по которым проходит измеряемый ток (рис. 3). Внутри неподвижно закрепленной катушки 1 на оси может



вращаться подвижная катушка 2, с которой жестко связана стрелка 3, перемещающаяся над шкалой. Противодействующий момент создается спиральными пружинами 4. Измеряемый ток проходит через обе катушки. В результате взаимодействия магнитного поля неподвижной катушки и тока в подвижной создается вращающий момент $M_1 = k_1 J_1 J_2$, под влиянием которого подвижная катушка будет стремиться повернуться так, чтобы плоскость ее витков стала параллельной плоскости витков неподвижной катушки, а их магнитные поля Рис. 3.

Устройство гальванометра электродинамической системы совпали бы по направлению. Этому противодействует пружина, вследствие чего подвижная катушка устанавливается в положение, когда вращающий момент $M_2 = k_2 j = M_1$; $k_1 J_1 J_2 = k_2 j$. Тогда $j = J_1 J_2 k_1 / k_2$.

Катушки в электродинамических приборах в зависимости от назначения соединяются последовательно или параллельно. Если катушки прибора соединить параллельно, то он может быть использован как амперметр. Если же катушки соединить последовательно и присоединить к ним добавочное сопротивление, то он может быть использован как вольтметр. Если катушки соединены последовательно, то $j = kJ^2$.

Из приведенных выражений следует, что шкалы электродинамических приборов неравномерны. При перемене тока в обеих катушках направление вращающего момента не меняется, следовательно, приборы этой системы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока. Достоинством приборов электродинамической системы является также их сравнительно высокая точность. Электродинамические амперметры и вольтметры применяются главным образом в качестве контрольных приборов для измерений в цепях постоянного и переменного тока. К недостаткам приборов этой системы относится неравномерность шкалы, большая чувствительность к перегрузкам, чувствительность к внешним магнитным полям.

3.4. Цифровые измерительные приборы

Основой цифрового **вольтметра** является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В настоящее время имеется множество схемотехнических принципов построения АЦП, однако общим из них является сравнение измеряемой величины с набором эталонов. Основными характеристиками АЦП являются точность преобразования

(число разрядов в выходном коде) и быстродействие. Можно условно разделить АЦП на два класса: последовательного счета, когда выходной код определяется равенством измеряемого напряжения с дискретно растущим эталонным напряжением и параллельного, когда сигнал сравнивается с набором эталонных напряжений. Для снижения влияния сетевых наводок часто используют АЦП интегрирующего типа, в которых сигнал усредняют за время кратное нескольким периодам наводки. Поскольку среднее значение синусоидального сигнала за период равно нулю это позволяет снизить влияние помех. Заметим, что это далеко не полный перечень типов АЦП.

На рис.4 представлена блок-схема простейшего АЦП, последовательного типа (шагом эталонного напряжения является изменение напряжения пила за один такт импульсного генератора).

В состав АЦП входят прецизионный генератор пилообразного напряжения, устройство сравнения, импульсный генератор и счетчик импульсов. Устройство сравнения выполняет роль управляемого ключа, через который импульсы с генератора поступают на вход счетчика. Измеряемое напряжение U_0 и пилообразное напряжение $U(t)$ подаются на устройство сравнения. Как только $U(t)$ достигнет уровня измеряемого напряжения, устройство сравнения вырабатывает сигнал, который закрывает вход счетчика импульсов (начало счета синхронизировано с моментом времени, когда $U(t) = 0$). Таким образом, число импульсов, сосчитанное счетчиком, оказывается однозначно связанным с измеряемым напряжением.

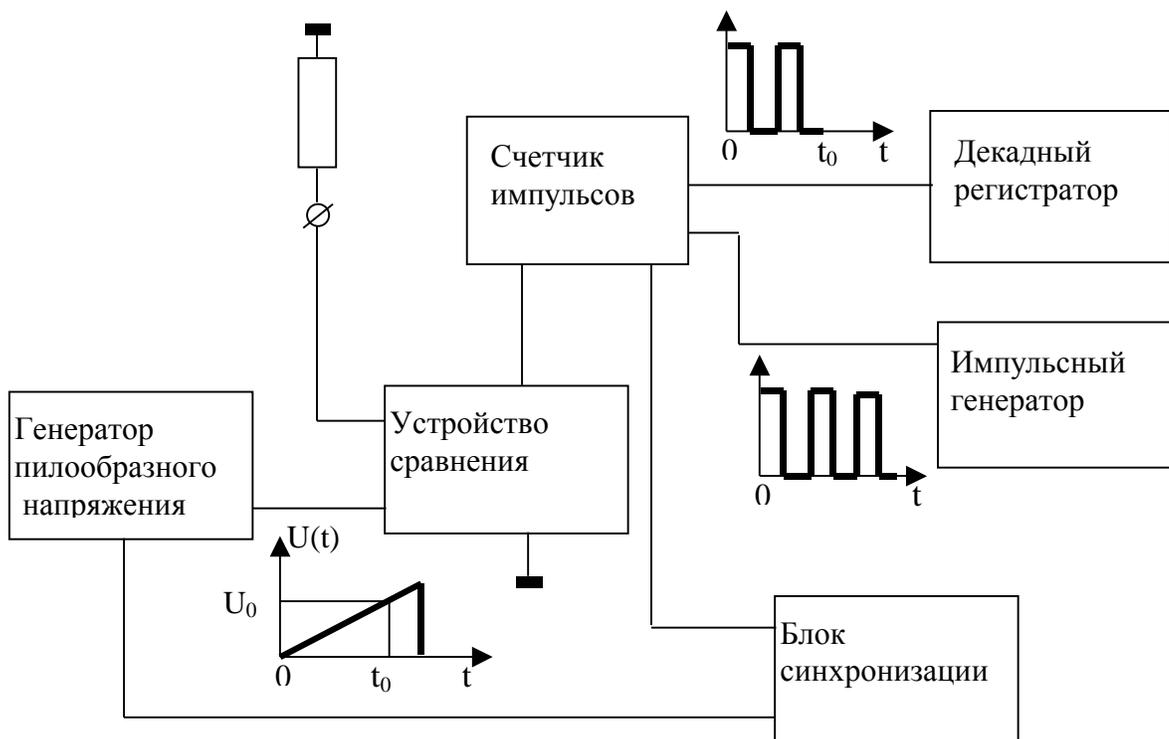


Рис.4. Блок-схема цифрового вольтметра.

Цифровой **амперметр** можно реализовать, установив на входе цифрового вольтметра калиброванный резистор небольшой величины, через который протекает измеряемый ток. Падение напряжения на входном резисторе, пропорциональное протекающему току, измеряется цифровым вольтметром, табло которого соответствующим образом градуируется.

4. Влияние внутреннего сопротивления приборов на точность измерений

При подключении измерительного прибора к электрической цепи ее параметры в той или иной степени изменяются, что необходимо учитывать при проведении измерений. Основное требование к электроизмерительным приборам сводится к минимизации влияния прибора на параметры и режим работы объекта измерений.

4.1. Измерение амперметром

Амперметр включается в электрическую цепь последовательно (в разрыв цепи) как показано на рисунке 5.

Ток в цепи до включения амперметра равен $J = \frac{E}{R^*}$, а при включении амперметра становится равен $J' = \frac{E}{R^* + R_A}$. Поэтому только при $R_A \ll R^*$ амперметр не вносит заметных искажений ($J' \approx J$).

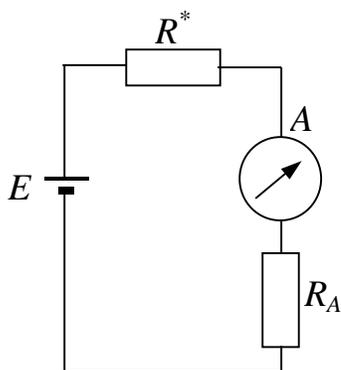


Рис. 5. Эквивалентная схема измерения тока амперметром.

E – источник ЭДС; R^* – эквивалентное сопротивление цепи, включая внутреннее сопротивление источника ЭДС; A – измерительный механизм (“идеальный” амперметр с нулевым входным сопротивлением); R_A – входное (внутреннее) сопротивление амперметра.

4.2. Измерение вольтметром

Как видно из описания принципа действия приборов их измерительные механизмы реагируют либо на ток (в приборах магнитоэлектрической системы угол отклонения стрелки $j \sim \bar{J}$, в приборах электромагнитной системы $j \sim \bar{J}^2$), либо на напряжение (в вольтметрах электростатической системы $j \sim \overline{U^2}$, в цифровых приборах показание пропорционально току, протекающему через входное сопротивление).

Системы, реагирующие на ток, могут использоваться и в качестве вольтметра. Для этого к измерительному механизму (обычно это микроамперметр с током полного отклонения 50-100 мкА) подключается последовательно большое добавочное сопротивление, тогда ток через прибор пропорционален напряжению, в единицах которого и градуируется шкала.

Рассмотрим, что происходит при подключении реального вольтметра к электрической цепи. До включения вольтметра падение напряжения на R равно:

$$U_{AB} = J \cdot R = \frac{E \cdot R}{R^* + R}$$

После включения вольтметра его внутреннее сопротивление R_V

$$U'_{AB} = \frac{E \cdot \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}}{R^* + \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}}$$

шунтирует R и показания вольтметра оказываются отличными от U_{AB} :

Напряжения U_{AB} и U'_{AB} близки ($U_{AB} \approx U'_{AB}$) только в том случае, если $R_V \gg R$. Следовательно, сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления того участка цепи, к которому он подключен.

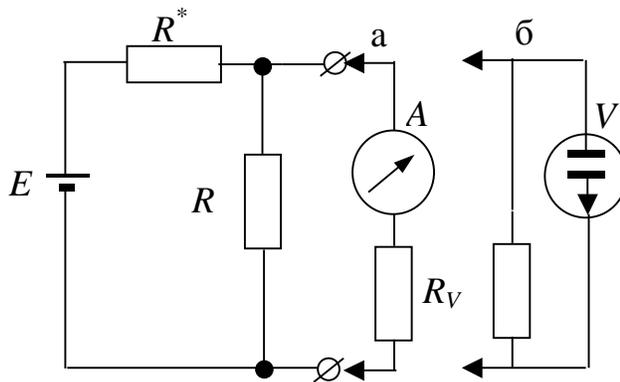


Рис. 6. Эквивалентная схема подключения реального вольтметра к цепи.

E – источник ЭДС; R^* – эквивалентное сопротивление цепи, включая внутреннее сопротивление источника ЭДС; R – сопротивление участка цепи, на котором измеряется падение напряжения; R_V – внутреннее

сопротивление вольтметра: **а** - реагирующего на ток, **б** – реагирующего на напряжение.

5. Изменение пределов электроизмерительных приборов

Часть измерительных приборов является многопредельными, тогда у соответствующего положения переключателя или клеммы указывается значение тока или напряжения при отклонении стрелки на всю шкалу.

В **амперметрах** изменение пределов достигается включением различных шунтов $R_{ш}$ (см. рис. 7, где R_A и $R_{ш}$ – сопротивления измерительной системы и шунта). При этом ток через прибор меньше тока J в цепи:

$$J_A = \frac{J}{1 + \frac{R_A}{R_{ш}}}$$

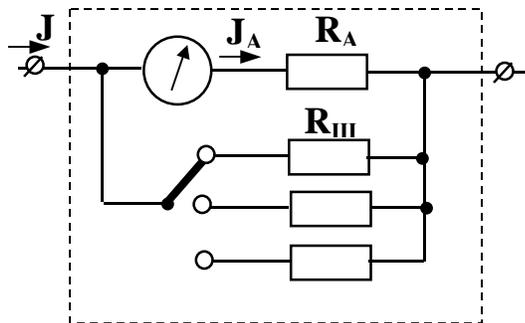


Рис.7. Схема измерения тока многопредельным амперметром.

ЗАДАЧА 1

Проверка электроизмерительных приборов

Приборы. Латр. Образцовый вольтметр электродинамической системы.
Проверяемый вольтметр.

Задание 1. По обозначениям на шкалах дать полную характеристику используемых приборов.

Задание 2. Провести поверку вольтметра методом сличения его показаний с показаниями образцового вольтметра.

1. Собрать схему

2. Последовательно увеличивая напряжение на поверяемом приборе от 0 до 250В (на оцифрованных точках шкалы) сравнить показания поверяемого вольтметра с показаниями образцового прибора. Прodelать то же, уменьшая напряжения от 250В до 0.

3. Результаты наблюдений занести в таблицу:

4. Найти относительную погрешность при любых значениях измеряемой величины в первой, второй и третьей частях шкалы прибора. Определить в какой части шкалы прибора измерения наиболее точные.

ЗАДАЧА 2

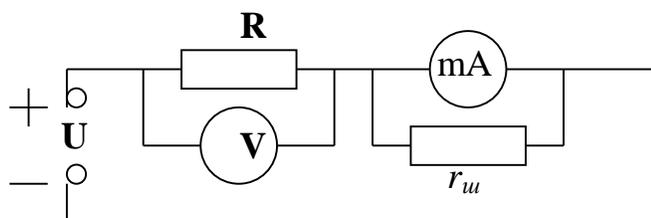
Градуирование амперметра и вольтметра. Расчет шунта к амперметру и добавочного сопротивления к вольтметру

Цель работы. Освоение методов расчета шунтов к амперметру и добавочных сопротивлений к вольтметру, градуирование амперметра и вольтметра.

Оборудование. Выпрямитель типа БЗ-2 или БЗ-3, шунтирующий магазин сопротивлений, градуировочный магазин сопротивлений, вольтметр, миллиамперметр для градуирования, соединительные провода.

Задание 1

1. Внимательно ознакомиться с предлагаемыми приборами.
2. Рассчитать сопротивления шунта к миллиамперметру с целью измерения этим прибором тока до 80мА.
3. Используя магазин сопротивлений (r_m), набрать шунтирующее сопротивление.
4. Собрать цепь по схеме:



Проградуировать миллиамперметр с шунтом в новых значениях тока*.
Для этого:

- а) набрать на градуировочном магазине сопротивление, позволяющее установить стрелку градуируемого прибора на нулевое деление;
- б) постепенно уменьшая сопротивление магазина, добиться отклонения стрелки миллиамперметра на 10, 20, 30, 40 и т.д. делений (до последнего деления шкалы). Значение тока, протекающего через прибор, может быть определено по закону Ома: $I=U/R$, где R – сопротивление магазина.

5. Результаты занести в таблицу:

Число делений шкалы градуируемого прибора, n	
Падение напряжения на магазине сопротивлений, U , В	
Сопротивление магазина R , Ом	
Величина тока, протекающего через миллиамперметр с шунтом, I , мА	

(Если расчеты шунта выполнены верно, то полное отклонение стрелки миллиамперметра должно соответствовать заданному значению тока I_1).

6. Построить градуировочный график $I=I(n)$

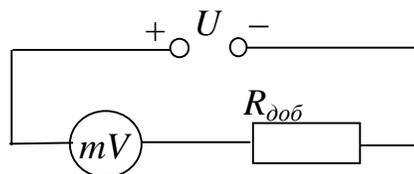
Замечания: 1) по мере увеличения тока напряжение на магазине может измениться, поэтому каждый раз следует смотреть на вольтметр, не полагаясь на результаты первых отсчетов, которые могут быть одинаковыми; 2) изменяя сопротивление магазина надо выключить выпрямитель, потому что в процессе переключения сопротивление

* Проградуировать какой-либо измерительный прибор – это значит установить соотношения между делениями его шкалы и значениями измеряемой этим прибором величины.

может оказаться равным 0 или очень малым; если в этот момент цепь будет под напряжением, то могут перегореть магазин, выпрямитель и миллиамперметр.

Задание 2

1. Рассчитать добавочное сопротивление к вольтметру, необходимое для того, чтобы измерять этим прибором напряжение 25, 50, или 100 В (по указанию преподавателя). В качестве добавочного сопротивления использовать магазин сопротивлений, для чего надо набрать на нем рассчитанное значение $R_{доб}$.



2. Собрать цепь по схеме:

3. Постепенно увеличивая (через 5В) подаваемое с выпрямителя напряжение снять зависимость показаний градуируемого прибора (число делений шкалы n от напряжения U).

4. Результаты занести в таблицу:

Напряжение, снимаемое с выпрямителя, В
Число делений шкалы градуируемого прибора, n

5. Построить градуировочный график $U=U(n)$. Объяснить, как им пользоваться.

6. Определить цену деления прибора с добавочным сопротивлением.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется классом точности прибора?
2. Что называется чувствительностью прибора?
3. Какие электроизмерительные приборы называются прецизионными ?

4. Могут ли приборы магнитоэлектрической системы употребляться для измерения переменного тока?
5. Какие приборы называются астатическими?
6. Объясните принцип действия приборов магнитоэлектрической системы, электродинамической, электромагнитной систем.
7. Каким знаком на панелях электроизмерительных приборов выполняется обозначение, указывающее, что прибор предназначен для работы в морских или полевых условиях, в сухих отапливаемых помещениях?
8. Для чего приборы высокого класса точности снабжаются зеркальной шкалой?
9. С какой целью используются в приборах корректор и арретир?
10. Можно ли считать, что абсолютная погрешность одинакова в любом месте шкалы прибора?
11. В какой части шкалы прибора измерения наиболее точные и почему?
12. Почему у приборов магнитоэлектрической системы равномерная шкала, а у приборов электромагнитной системы – неравномерная?
13. Как подразделяются приборы по конструкции отсчетного устройства?
14. Как подразделяются приборы по количеству диапазонов измерений?
15. Как обозначаются на панелях электроизмерительных приборов факт пригодности использования прибора для измерения в цепях трехфазного тока с равномерной нагрузкой фаз?
16. От чего зависит величина отклонения стрелки амперметра, вольтметра, омметра?
17. В чем различие измерительных цепей амперметра и вольтметра?
18. Какое сопротивление называется шунтирующим? Приведите формулу для расчета сопротивления шунта к амперметру.
19. В каких случаях амперметры включаются в измерительную цепь без шунтов, вольтметры – без добавочных сопротивлений?
20. В каких случаях применяются наружные и внутренние шунты?
21. Какие шунты называют многопредельными?
22. Приведите формулу расчета добавочного сопротивления к вольтметру.
23. Нарисуйте схему многопредельного вольтметра.
24. Что значит проградуировать электроизмерительный прибор?

25. Как построить градуировочную кривую/ градуировочный график/ электроизмерительного прибора?
26. Исходя из вида градуировочного графика, определите, к какой системе относится электроизмерительный механизм прибора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 0-3

ОСЦИЛЛОГРАФ

Цель работы

Изучить устройство простейшего электронного осциллографа.

Задача работы

Освоить практику основных измерений, выполняемых с помощью осциллографа.

ВВЕДЕНИЕ

Осциллограф – это прибор, который позволяет наблюдать на экране форму электрических сигналов (то есть зависимость напряжения от времени) и измерять их параметры. Название своё осциллограф получил от двух слов: латинского *oscillum* – колебания и греческого *grapho* – пишу. В переводе на русский “осциллограф” означает прибор для записи колебаний. Его преимуществом по сравнению с другими измерительными приборами являются малая инерционность, наглядность восприятия информации и универсальность – можно измерять сразу несколько параметров сигнала. К недостаткам можно отнести небольшую точность (2-5%) и относительно большую трудоемкость измерений. С помощью осциллографа можно измерять все параметры любых сигналов, в то время как более точные специализированные приборы измеряют обычно какой-то один параметр, и, главное, рассчитаны только на сигнал определенной формы (наиболее распространены приборы для измерения параметров гармонических сигналов), поэтому они могут давать большие и неконтролируемые погрешности при отклонении сигнала от "стандартного" вида. Таким образом, наличие осциллографа как контролирующего прибора необходимо и при использовании других, более точных измерительных приборов, особенно, если вид сигнала не известен и может изменяться в процессе измерений.

По назначению и принципу действия осциллографы разделяются на универсальные, запоминающие, стробоскопические, скоростные и

специальные. Данная задача посвящена ознакомлению с универсальным осциллографом.

Прежде, чем приступать к работе с любым прибором, необходимо изучить его техническое описание и инструкцию по эксплуатации. Однако у осциллографов различных типов есть много общего: общие принципы построения и работы, изучив которые, можно значительно быстрее разобраться в работе конкретного прибора.

1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Главным узлом любого осциллографа является электронно-лучевая трубка – ЭЛТ, поэтому осциллограф и называется электроннолучевым. Схематически устройство ЭЛТ показано на *рис.1*.

1.1 Электронная пушка

Электронная пушка создает и фокусирует электронный луч. С катода за счет термоэмиссии испускаются электроны и ускоряются в электрическом поле между катодом и вторым анодом. Далее, до экрана, они пролетают в области почти постоянного потенциала равного U_{a2} . Потенциал создается токопроводящим слоем, нанесенным на стенки трубки. Соударяясь с флюоресцирующим слоем на внутренней поверхности экрана – люминофором, электроны вызывают его свечение.

Яркость свечения определяется количеством энергии в единицу времени, сообщенной электронами люминофору (т.е. кинетической энергией электронов и их плотностью в электронном луче). С экрана электроны "стекают" на положительный полюс источника питания. Люминофор не токопроводен, и электроны покидают экран либо за счет вторичной эмиссии, либо на экран наносится тонкий, прозрачный для быстрых электронов, слой металла (алюминия), соединяемый с положительным полюсом источника питания.

Катод помещен внутрь цилиндра с отверстием – это *управляющий электрод*, на него подается отрицательный (по отношению к катоду) потенциал. Изменяя его величину, можно регулировать число электронов в пучке, а значит, *яркость* свечения пятна на экране (ручка "яркость", "☼"). Фокусировка луча осуществляется анодами. Процесс подобен фокусировке

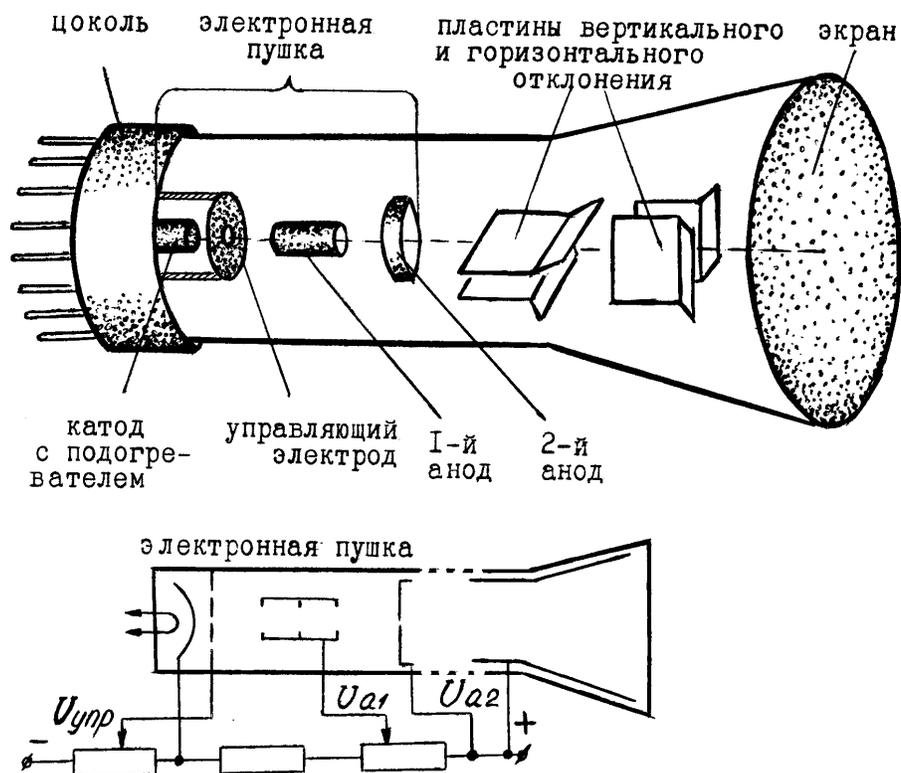


Рис.1. Электронно-лучевая трубка.

Напряжения относительно катода: $U_{a2} = +800 \dots +5000 \text{ В}$,
 $U_{a1} = (50 \dots 80 \%) U_{a2}$,
 $U_{упр} = -20 \dots -90 \text{ В}$.

световых лучей оптическими линзами, только линзы здесь образованы электростатическими полями между анодами. Регулируя напряжение на 1-м аноде, можно изменять электростатические поля (фокусное расстояние линзы) и фокусировать электронный луч (ручка "↑↓", "фокус").

1.2. Принцип образования осциллограммы

Положение светового пятна на экране зависит от пары напряжений, приложенных к горизонтально – (X) и вертикально – (Y) отклоняющим пластинам. Если на Y-пластины подать переменное, например, синусоидальное, напряжение, то электронный луч начнет колебаться в

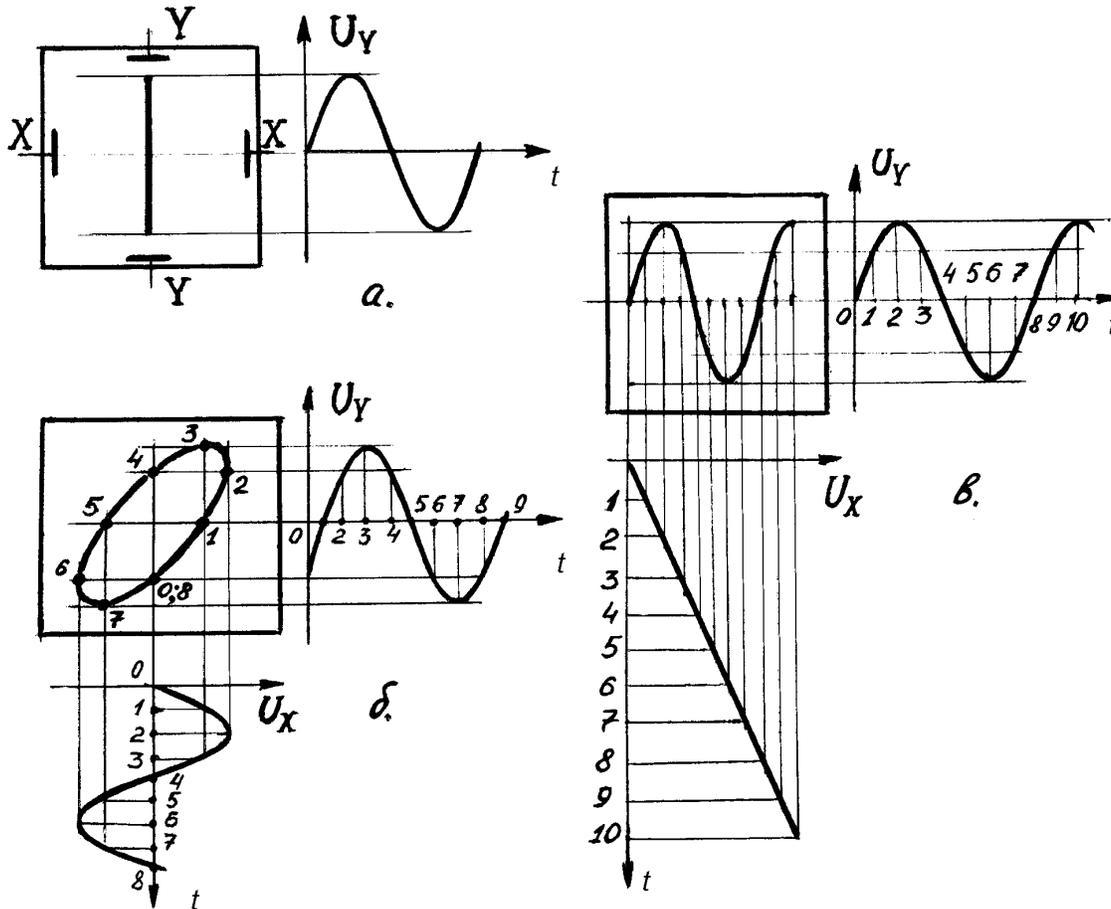


Рис.2 Принцип образования осциллограммы

- а) формирование осциллограммы синусоидального напряжения без горизонтальной развертки;
- б) формирование осциллограммы при подаче синусоидального напряжения на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины;
- в) формирование осциллограммы при линейной горизонтальной развертке

вертикальном направлении. При достаточно большой частоте колебаний (20-50 Гц) электронный луч оставит на экране трубки светящуюся вертикальную линию (*рис.2а*). Аналогично, напряжение, поданное на

горизонтально отклоняющие пластины – X, даст горизонтальную линию. При одновременном воздействии переменных напряжений на обе пары пластин можно получить различные осциллограммы. Например, подавая на пластины X и Y два синусоидальных сигнала с определенными соотношениями частот, амплитуд и фаз, можно наблюдать кривые, изображенные на *рис.2б*, *рис.3* - кривые Лиссажу. По этим кривым можно определить соотношение частот и фаз двух сигналов.

Если мы хотим наблюдать какой-либо периодический сигнал в зависимости от времени, то для получения его действительной формы

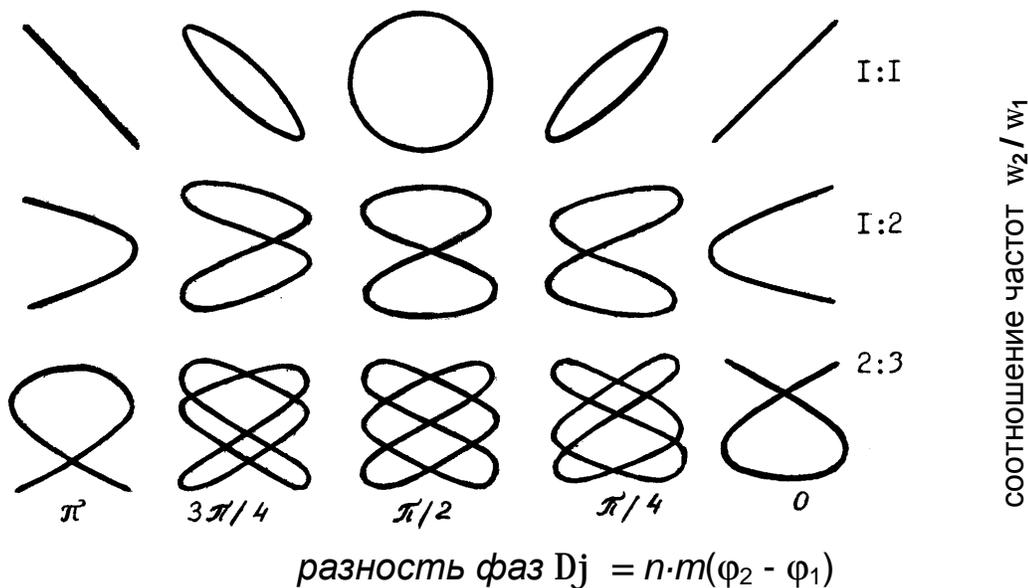


Рис. 3 Фигуры Лиссажу для двух синусоидальных сигналов с различными соотношениями частот и фаз: $x=A_1\cos[m(\omega t+j_1)]$, $y=A_2\cos[m(\omega t+j_1)]$.

$U_y = f(t)$, напряжение U_x должно быть пропорционально времени (*Рис.2в*). За время t_{10} точка один раз "пробежала" по синусоиде на экране – получили однократную осциллограмму. Существуют запоминающие осциллографы - способные фиксировать однократную осциллограмму. В обычных осциллографах для того, чтобы получить неподвижную картину, а не бегущую точку, необходимо, чтобы однократная осциллограмма не менее 10-50 раз в секунду повторялась (это связано с временем послесвечения люминофора и временем релаксации глаза) – и каждый раз приходилась бы на одни и те же точки экрана. Для этого надо:

1 - чтобы линейно возрастающее напряжение периодически повторялось – такое напряжение называется пилообразным (*рис.4*). Оно вырабатывается специальным генератором, который имеется в осциллографе. В зависимости от поставленной задачи можно пользоваться или этим генератором, или подавать на вход "X" любое необходимое вам напряжение (генератор пилообразного напряжения и блок синхронизации при этом отключаются, что соответствует положению "X" переключателя режимов развертки);

2 - чтобы частоты пилообразного напряжения и исследуемого сигнала были равны или кратны друг другу (*рис.5*). Добиться этого ручной регулировкой частоты практически невозможно из-за неизбежной нестабильности как периода развертки, так и периода сигнала. Кроме того, при ручной регулировке периода нарушается временной масштаб и становится невозможным измерение интервалов времени методом **калиброванной развертки**. Поэтому в осциллографе имеется **блок синхронизации**, выполняющий автоматическую подстройку периода развертки под исследуемый сигнал. Этот процесс – изменение частоты повторения пилообразного напряжения до значения, равного или кратного частоте сигнала U_y - называется синхронизацией. В зависимости от того, как сигнал попадает в блок синхронизации, различают три вида синхронизации: **внутреннюю, внешнюю и от сети**.

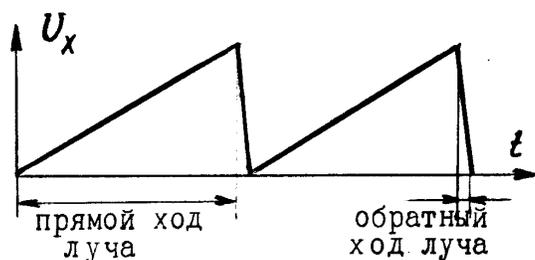


Рис. 4. Пилообразное напряжение.
Во время обратного хода луч гасится.

При **внутренней синхронизации** исследуемый сигнал поступает на вход "Y" и уже внутри осциллографа разделяется и идет как на вертикально отклоняющие пластины, так и в блок синхронизации. Таким образом, исследуемый сигнал сам управляет разверткой осциллографа (*рис.6*).

При **внешней синхронизации** сигнал с входа "Y" идет только на пластины вертикального отклонения, а в блок синхронизации сигнал от внешнего устройства подается с входа "X". Использовать внешнюю синхронизацию целесообразно в случае, если исследуемый сигнал недостаточен по амплитуде или непригоден по форме для синхронизации (например, содержит шумы). Например, при работе с сигналами, изменяющимися по форме, сложно получить неподвижное изображение при внутренней синхронизации. Тогда на вход "X" подается сигнал внешней синхронизации (например, запускающие

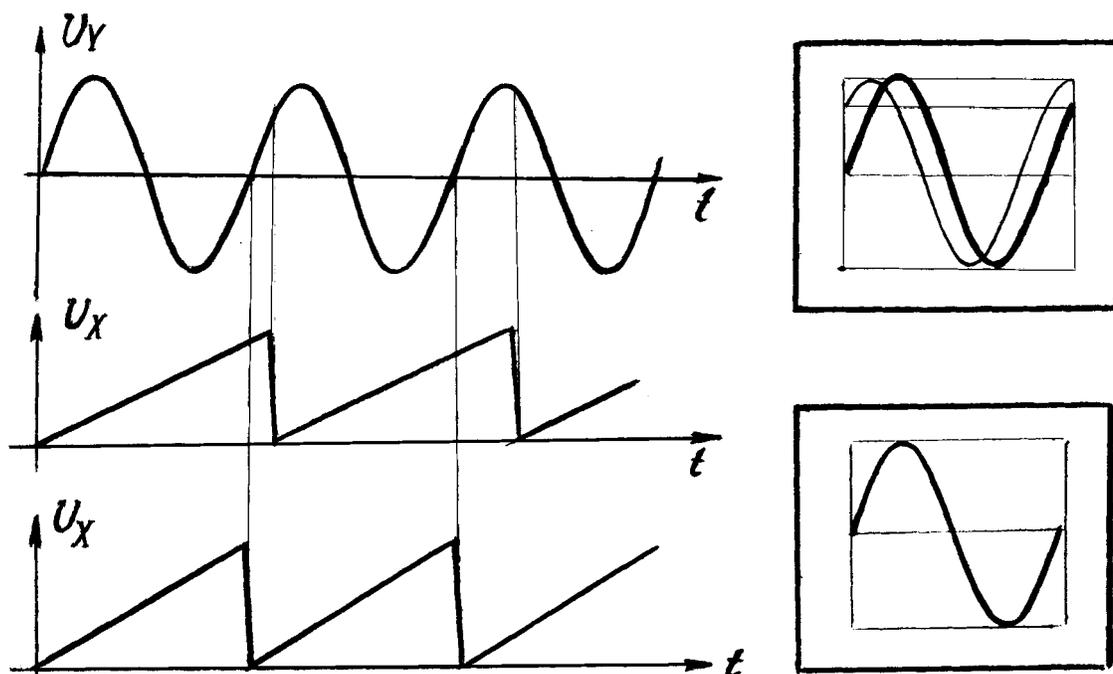


Рис. 5. а). Образование "бегущей синусоиды" - частота сигнала U_y отлична от частоты повторения пилообразного напряжения.

б). Неподвижная картина: частоты сигналов U_y и U_x кратны.

импульсы исследуемого сигнала) для согласования частоты повторения развертки с частотой исследуемого сигнала. Так как его частота точно равна частоте наблюдаемого сигнала, то картина должна стать неподвижной. Внешняя синхронизация также обычно применяется при изучении импульсных устройств, например, ЭВМ, все цепи которых работают синхронно от одного тактового генератора.

Синхронизация от сети обычно используется для проверки узлов приборов, связанных с преобразованием питающего напряжения от силовой сети (трансформаторов, выпрямителей, стабилизаторов и т.д.). В этом режиме в блок синхронизации подается сигнал с частотой промышленной сети 50 Гц от понижающего трансформатора внутри осциллографа).

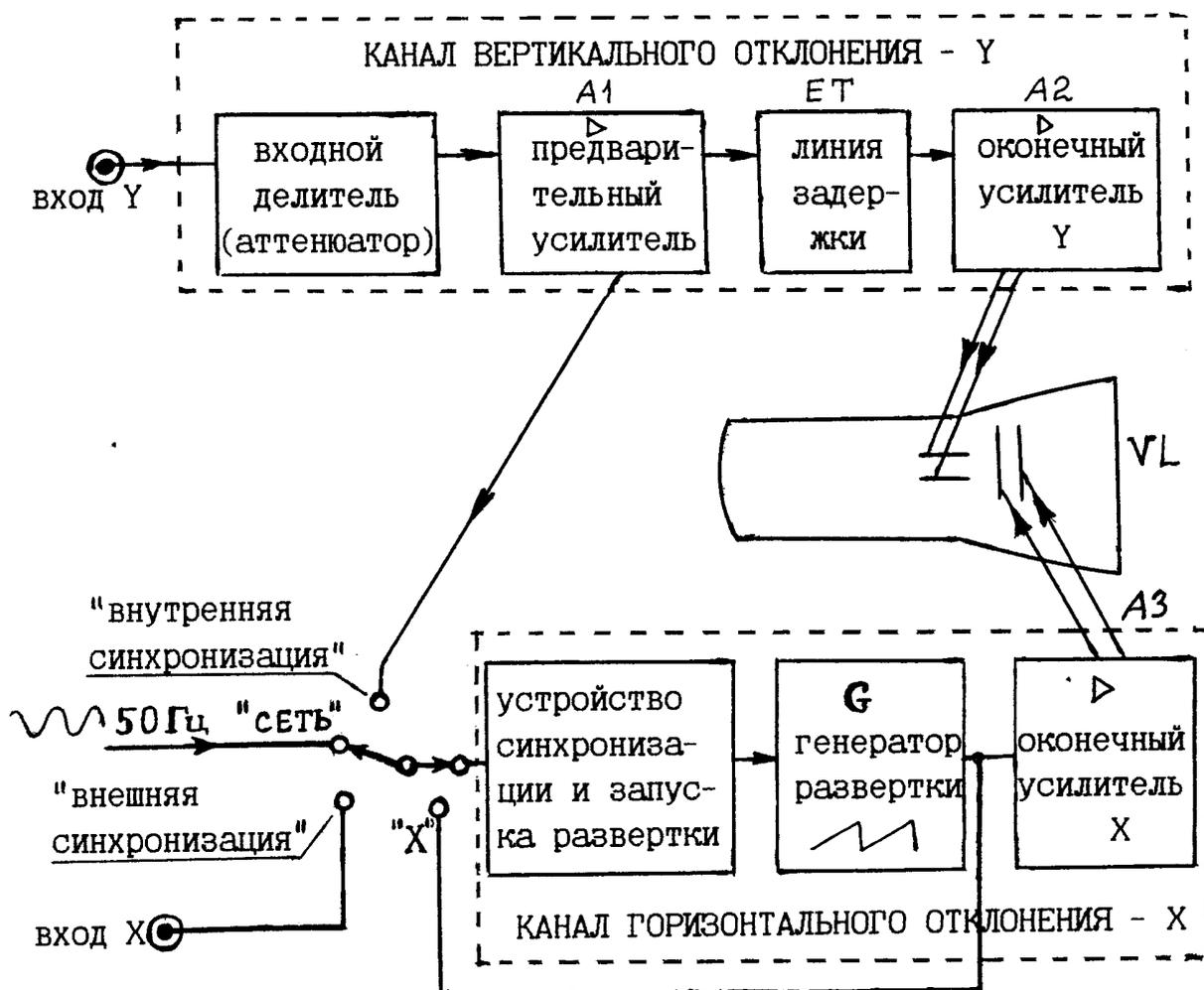


Рис. 6 Блок-схема осциллографа

2. БЛОК-СХЕМА ОСЦИЛЛОГРАФА

2.1. Канал вертикального отклонения

Канал вертикального отклонения (Y) усиливает или ослабляет сигнал до значения, удобного для изучения (ручки управления: " $V/\text{дел}$ " или " $mV/\text{дел}$ ", где деление – это большая клетка на шкале экрана трубки). Линия задержки задерживает сигнал на некоторое время, необходимое для запуска генератора горизонтальной развертки схемой синхронизации – это позволяет наблюдать передний фронт сигнала.

2.2. Канал горизонтального отклонения

Канал горизонтального отклонения (X) обеспечивает формирование напряжения развертки для управления перемещением луча по горизонтали.

Генератор развертки – основной узел канала X . Он формирует пилообразное напряжение. Генератор может работать в автоколебательном или ждущем режимах.

В автоколебательном режиме генератор непрерывно вырабатывает пилообразное напряжение (*рис.4*). Этот режим используется для наблюдения гармонических, а также периодических импульсных сигналов с небольшой скважностью (т.е. когда импульс занимает значительную часть периода) .

В ждущем режиме генератор вырабатывает однократную "пилу" только когда приходит сигнал запуска (сигнал синхронизации). Запуск следующей осуществляется следующим импульсом синхронизации, но *только после того, как закончилась предыдущая "пила"*. Этот режим целесообразно использовать для наблюдения непериодических сигналов или сигналов с очень большим периодом.

Генератор развертки, кроме пилообразного напряжения для отклонения луча, вырабатывает отрицательный гасящий импульс, который подается на модулятор ЭЛТ и запирает ее на время обратного хода луча, чтобы на экране не прочерчивалась линия возврата луча.

Устройство синхронизации и запуска развертки формирует высокостабильный импульс запуска, форма и амплитуда которого не зависят от формы и амплитуды исследуемого. Импульс запуска в ждущем режиме осуществляет запуск развертки, в автоколебательном - ее синхронизацию. Причем в автоколебательном режиме развертка вырабатывается непрерывно, даже при отсутствии импульса запуска,

однако изображение в этом случае получается неустойчивое ввиду несоответствия периодов сигнала и развертки. Коррекция периода развертки в этом случае происходит **только за счет изменения длительности обратного хода луча**. Параметры прямого хода - наклон и амплитуда "пилы" – не должны меняться, так как это привело бы к нарушению масштаба сетки по оси времени – X (определяется наклоном) и горизонтального размера изображения (определяется амплитудой).

Формирование импульса запуска происходит в тот момент времени, когда напряжение исследуемого входного сигнала становится равно заданному уровню (рис.7). Таким образом, начало развертки "привязывается" к определенной точке исследуемого сигнала. Регулировать уровень запуска $U_{ур}$ можно ручкой управления "уровень". Импульс запуска может формироваться как при пересечении уровнем запуска переднего (возрастающего) фронта сигнала (переключатель режима синхронизации ("┌┐" или "+"), так и при пересечении заднего (спадающего) фронта ("└┘" или "-").

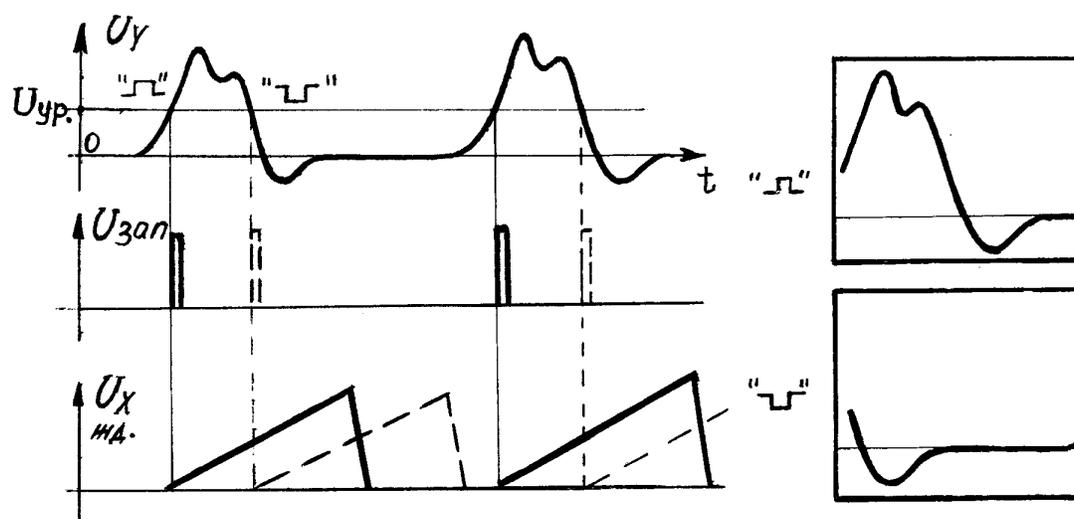


Рис. 7. Формирование импульса запуска. Ждущий режим развертки.
 а) исследуемый сигнал; б) импульсы запуска развертки от переднего фронта (сплошная линия) и от заднего фронта (штриховая линия) импульса; в) пилообразное напряжение развертки при двух типах запуска

В некоторых осциллографах переход из автоколебательного режима в ждущий осуществляется **плавной регулировкой**. При этом ручка запуска ("Режим запуска", "Стабильность" и т.д.) имеет два основных положения - обычно по часовой стрелке до упора –**автоколебательный**

режим (он используется для периодических процессов, амплитуда которых слишком мала для запуска ждущей развертки) и против часовой стрелки до упора – **ждущий режим**. Границу между этими двумя режимами можно определить так: ручку "**уровень**" повернуть против часовой стрелки до упора – на "нулевой" уровень (при этом импульс синхронизации не вырабатывается) и найти положение ручки режима запуска ("**стабильность**"), при котором луч исчезает (без импульса синхронизации в автоколебательном режиме картинка есть, в ждущем - нет). Работать с осциллографами, в которых переход режимов осуществляется плавно, рекомендуется в ждущем режиме.

2.3. Канал Z

Канал Z (Рис.8) служит для модуляции яркости луча внешним сигналом. Этот канал можно использовать для измерения частоты сигнала (Рис.9) и временных интервалов (см. п.3.4 где описана работа со

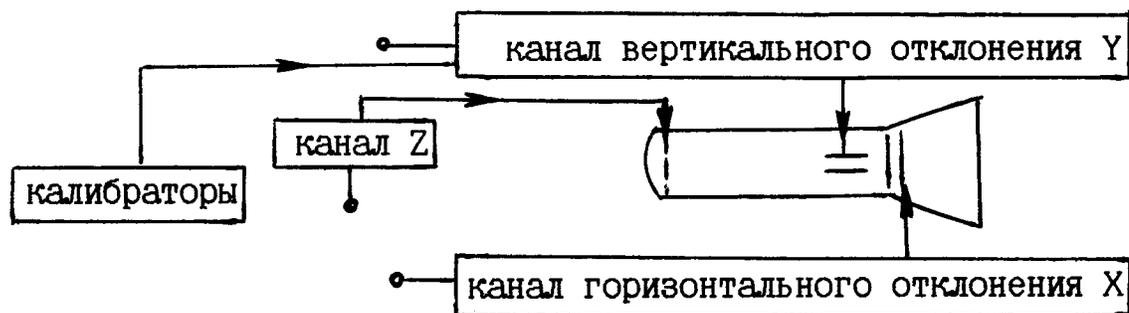


Рис. 8. Блок-схема осциллографа с Z-каналом яркости (встроенным в осциллограф модулятором). Встроенные модуляторы есть не во всех осциллографах.

2.4. Калибратор

Встроенный в ЭЛО калибратор позволяют с достаточной точностью калибровать масштабную сетку по оси Y (напряжение сигнала) и по оси X (напряжение развертки, определяющее масштаб времени) (см. разделы 3.3 и 3.4). Калибратор представляют собой высокостабильный (эталонный) генератор сигналов, обычно с набором нескольких фиксированных частот и амплитуд.

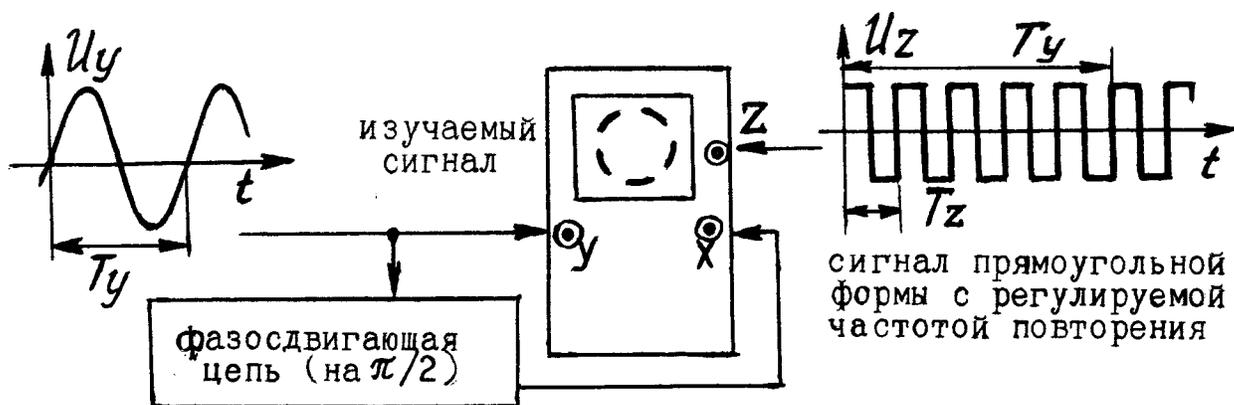


Рис. 9. Измерение периода сигнала при помощи внешней модуляции луча (канал Z). Картинка устойчива, когда частоты сигналов f_y и f_z кратны.

3. ТЕХНИКА ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Выбор осциллографа

Прежде, чем приступить к работе с осциллографом, необходимо убедиться, что он подходит для выполнения поставленных задач. При этом необходимо обратить внимание на такие характеристики:

1. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ осциллографа выбирается в зависимости от амплитуды исследуемого сигнала. В некоторых случаях используется выносной делитель или дополнительный усилитель.

2. ПОЛОСА ПРОПУСКАНИЯ канала вертикального отклонения. Для того, чтобы наблюдаемый на экране сигнал мало отличался от входного, необходимо постоянство коэффициента усиления вне зависимости от частоты. Полоса пропускания – область частот, где это условие практически выполняется (в приграничных областях могут быть нарушения). При недостаточно широкой полосе пропускания различные составляющие спектра сигнала будут усиливаться неодинаково, а это приведет к заметным искажениям осциллограммы. (Для частного случая прямоугольных сигналов вида \square достаточна полоса частот, доходящая до $f_{\text{верхн}} = (2-3)/\tau$, τ - длительность импульса).

По теореме Фурье любой периодический сигнал можно представить в виде суммы синусоидальных сигналов, т.е. получить его гармонический

состав или спектр. Например, прямоугольный сигнал  с периодом T амплитуды A можно представить в виде
$$y = \frac{8A}{T} \left(\sin t + \frac{\sin 3t}{3} + \frac{\sin 5t}{5} + \dots \right).$$

В современных универсальных осциллографах верхняя граница полосы пропускания составляет 30 - 40 МГц и более (можно наблюдать сигналы длительностью до 0,1 мкс и менее). Нижняя граница полосы пропускания определяет возможность наблюдения медленных процессов (или медленных составляющих сигнала). Часто бывает, что в исследуемых сигналах низкочастотная компонента не представляет интереса или даже мешает измерениям (например, при исследовании малого переменного напряжения на фоне большого постоянного напряжения). В этом случае целесообразно не пропускать низкочастотные составляющие в Y-тракт. В схеме осциллографа предусматриваются разделительные конденсаторы на входах, как Y, так и X. Это так называемый режим "с закрытым входом" ("~" – вход закрыт для постоянной и медленных составляющих путем включения конденсатора). В этом режиме нижняя граница полосы пропускания обычно $\approx 5-10$ Гц. Однако в ряде задач нужно наблюдать не только переменные процессы, но и постоянные уровни, и медленно меняющиеся напряжения. В этом случае используется режим "с открытым входом" – " \simeq ", при котором сигнал напрямую поступает на вход осциллографа.

3. ВРЕМЯ НАРАСТАНИЯ T_0 определяет скорость реакции усилителя канала "Y" на изменение входного сигнала. Величина T_0 должна быть меньше, чем характерное время изменения сигнала на наиболее "крутых" участках.

4. ПАРАМЕТРЫ ВХОДА. При любых измерениях нужно учитывать влияние осциллографа как нагрузки на источник исследуемого сигнала (если измеряем напряжение на резисторе R , то должно выполняться соотношение: $R_{\text{приб}} \gg R$). Нагрузка – входная цепь осциллографа – представляет собой сопротивление, шунтированное емкостью. Обычно – это 1 МОм и 40 -50 пф (с соединительными проводами емкость может увеличиться до 100 пф).

Для подключения осциллографа к исследуемой цепи обычно используют коаксиальный кабель для устранения электромагнитных наводок, дающих из-за помех "размытое" изображение (особенно на высоких частотах).

Правильным выбором осциллографа можно достигнуть минимальных искажений сигналов и измерений с минимальными погрешностями.

3.2. Подготовка осциллографа к измерениям

1. Перед включением прибора нужно привести ручки в исходное положение:

- ручки, регулирующие **усиление сигнала** – на минимальное значение (максимально ослабить сигнал);
- ручки управления **яркостью, фокусировкой, смещением луча** по вертикали и горизонтали, уровень синхронизации – в среднее положение, переключатель рода работы – в автоколебательный режим (непрерывной развертки), переключатель рода синхронизации – в положение внутренней синхронизации (вход X - отключен).

2. Если необходима максимальная точность измерений, то после прогрева осциллографа целесообразно проверить калибровку и балансировку (согласно техническому описанию прибора). Суть их состоит в том, что усилители каналов X и Y в процессе эксплуатации могут слегка "расстроиться", так что их надо периодически проверять и, если необходимо, подстраивать с помощью внутреннего калибратора осциллографа или дополнительных приборов.

3.3. Измерение напряжения

Измерение напряжений выполняется методом непосредственной оценки (метод калиброванных шкал) и методом сравнения.

Метод непосредственной оценки

Измерять напряжение сигнала можно, калибруя масштабную сетку осциллографа (т.е. определяя цену деления сетки в вольтах на сантиметр). В этом случае сама сетка становится шкалой. Масштаб указывается на переключателе чувствительности осциллографа. При наличии ручки плавной регулировки чувствительности, указанный масштаб получается лишь при **одном ее положении, фиксируемом при повороте** (это положение обычно обозначается меткой у ручки). Проверку калибровки можно провести с помощью образцового (калибровочного) сигнала, подаваемого в канал вертикального отклонения с встроенного калибровочного генератора. Из-за влияния ряда факторов – погрешностей калибровки, визуального отсчета, нелинейной амплитудной характеристики канала горизонтального

отклонения и т.д. – этот метод дает погрешность измерения напряжения обычно не менее 5%.

Погрешность отсчета включает в себя две составляющие:

- погрешность совмещения линий осциллограммы с линиями шкалы и;
- погрешность отсчета из-за конечной ширины линии.

Погрешность совмещения принимается равной $b/5$, погрешность отсчета - $b/3$, где b - ширина луча. Поскольку они независимы, то относительная погрешность отсчета составляет

$$\sigma_{\text{отн}} = \frac{1}{H} \sqrt{\left(\frac{b}{5}\right)^2 + \left(\frac{b}{3}\right)^2} \approx 0.4 \frac{b}{H}, \text{ где } H - \text{размер измеряемого участка}$$

изображения на экране. Погрешность уменьшается с увеличением размеров изображения H . Поэтому, чтобы погрешность измерения была минимальна, изображение измеряемой части исследуемого сигнала должно занимать 80 - 90 % рабочей площади экрана.

Нелинейность амплитудной (и частотной) характеристики приводит к тому, что сигналы различной амплитуды (частоты) усиливаются по разному. Значит, необходимо подбирать для работы осциллографа, у которых измеряемые значения величин будут лежать в диапазонах, рекомендованных для работы осциллографа, более того, ближе к середине диапазона – далеко от крайних значений. Наблюдать сигнал можно и при минимальной (для данного осциллографа) амплитуде, но при измерении напряжения погрешность будет значительно больше 5% (аналогично и для частот). На экране многих осциллографов есть две пунктирные горизонтальные линии, которые ограничивают область, в которой амплитудная характеристика линейна и гарантируется указанная в описании точность измерения напряжений.

Метод сравнения

Этот метод позволяет увеличить точность измерений за счет исключения погрешностей, связанных с нелинейностью амплитудной характеристики, геометрическими искажениями ЭЛТ. Осциллограф используется лишь как устройство сравнения исследуемого сигнала с эталонным, а изображение - как индикатор сравнения.

Метод замещения. В этом методе сначала получают на экране осциллографа изображение исследуемого сигнала. Затем, вместо этого сигнала подают на вход Y образцовое напряжение (усиление Y не изменять!). Регулируя его величину, добиваются картинки сигнала с той же амплитудой. Погрешность измерения определяется погрешностью образцового напряжения, неравномерностью переходной характеристики (если сигналы имеют разные формы и частоты) и

погрешностью совмещения линий. Благодаря этому метод замещения позволяет обеспечить погрешность не хуже 1 - 2 %.

Компенсационный метод обеспечивает компенсацию исследуемого сигнала с помощью образцового (постоянного) напряжения, подаваемого на вход "Y" в сумме с исследуемым сигналом. Регулируя образцовое напряжение, обеспечивают смещение положения импульса до тех пор, пока его вершина не совместится с основанием исходного импульса. Погрешность метода определяется аналогично предыдущему методу.

3.4. Измерение временных интервалов

Раньше в осциллографах для измерения длительности сигнала использовались яркостные метки. Эти метки можно получить, модулируя электронный луч ЭЛТ по яркости сигналом прямоугольной формы. Зная длительность модулирующего сигнала и посчитав число меток, определяют длительность исследуемого сигнала (*рис.10*). Погрешность измерения данным методом обычно составляет 2%. Однако, такой метод имеет ряд недостатков: при наблюдении сложных сигналов можно потерять часть информации за счет гашения участков картины, а при увеличении диапазонов развертки необходимо усложнять калибраторы. Поэтому сейчас более распространены осциллографы с калиброванным напряжением развертки (хотя точность измерения при этом ниже - порядка 5%).

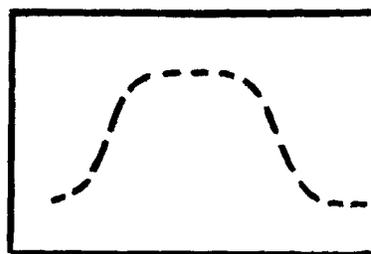


Рис.10. Определение длительности импульса с помощью меток времени

Метод калиброванной развертки

Определение временного интервала T осуществляется по размеру исследуемого участка M (в делениях) на экране и значению установленного масштаба развертки k (время/деление): $T = k \cdot M$. Погрешность измерения складывается из инструментальной погрешности прибора (неточность начальной калибровки осциллографа, нелинейность канала X) – она обычно дается в техническом описании, и ошибки считывания (дискретность шкалы, конечная ширина луча).

Для повышения точности измерения можно использовать МЕТОД СРАВНЕНИЯ. Этот метод предусматривает использование

осциллографа в качестве устройства сравнения (аналогично измерению амплитуды). Погрешность этого метода определяется погрешностью эталонного генератора и погрешностью считывания. Измерения методом сравнения наиболее удобно проводить на двухлучевом осциллографе при одновременном наблюдении на экране обоих сигналов (рис.11). (В двухлучевом осциллографе, как правило, существует две электронных пушки и четыре пары управляющих пластин. На лицевую панель выводятся два блока управления – для регулировки каждого из лучей.)

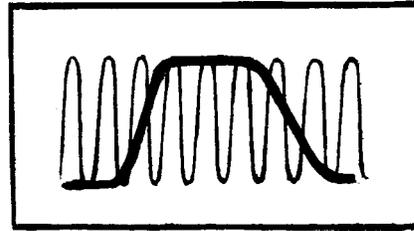


Рис.11. Определение длительности импульса методом сравнения

3.5. Измерение частоты сигнала

Существует довольно много методов измерения частоты сигналов с

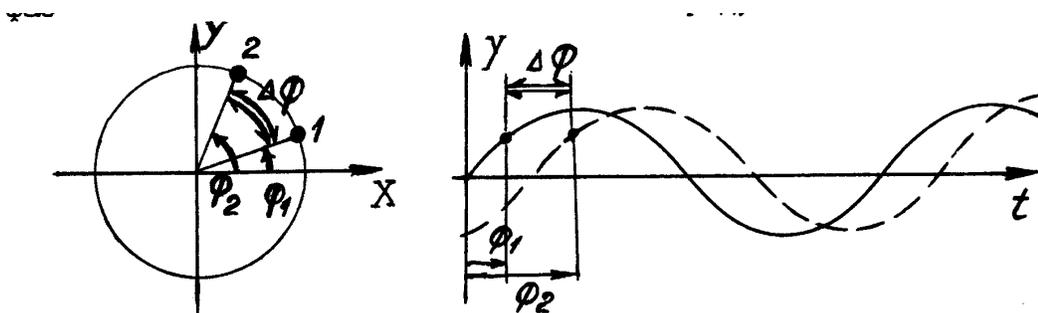


Рис. 13. Пример гармонических колебаний - проекции точек, равномерно вращающихся по окружности.

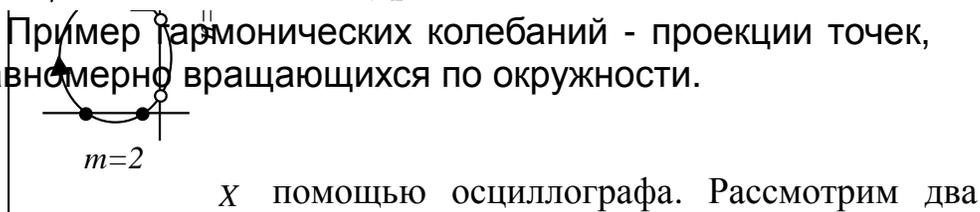


Рис.12. Определение частоты по фигурам Лиссажу

наиболее простых.

1. Частоту сигнала ν можно вычислить *из его периода T* по формуле $\nu = 1/T$. Погрешность измерения соответствует погрешности измерения периода.

2. Можно определить частоту *с помощью фигур Лиссажу* (см. раздел 1.2, рис.3). Для определения соотношения частот нужно сосчитать,

сколько колебаний совершает луч по одной и другой оси при полном обходе всей фигуры (сколько максимумов по вертикали и горизонтали на картинке). Число колебаний легко найти также по числу пересечений фигуры Лиссажу вертикальной (n) и горизонтальной (m) прямыми, как показано на **рис.12**. Луч совершает $m/2$ полных колебаний по вертикали (канал Y) и $n/2$ – по горизонтали (канал X), значит, отношение частот: $f_x/f_y = n/m$. Погрешность при строгом выполнении кратности частот (когда картинка абсолютно неподвижна) определяется погрешностью установки частоты эталонного сигнала. Эталонный сигнал целесообразно подать на ось X, поскольку он берется с эталонного генератора и обычно имеет достаточную амплитуду для развертки по оси X. Кроме этого, удобный для измерений горизонтальный размер фигуры можно подобрать изменением амплитуды эталонного сигнала.

3.6. Измерение фазовых сдвигов

Для гармонического сигнала $U(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$ фазой называют выражение $(\omega t + \varphi_0)$ – аргумент синуса, φ_0 – начальная фаза колебаний.

Значение фазы зависит от выбранного начала отсчета времени, поэтому физический смысл имеет сдвиг фаз $\Delta\varphi$ или разность фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ двух сигналов с одинаковыми частотами (**рис.13**). Измеряется фаза в угловых единицах – радианах или градусах.

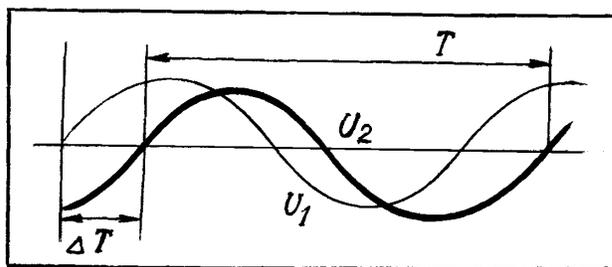


Рис.14. Измерение разности фаз из временного сдвига синусоид.

Нахождение фазового

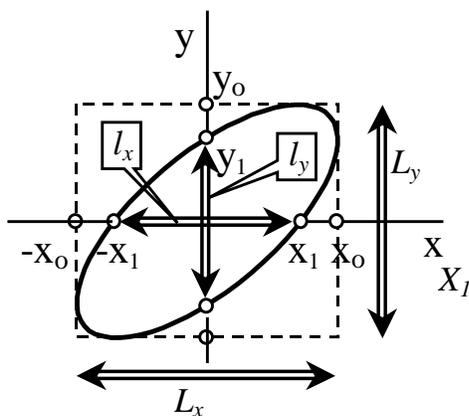


Рис.15. Определение фазового сдвига методом эллипса. 55

сдвига из временного интервала. Временной сдвиг двух сигналов легче всего наблюдать **на двухлучевом осциллографе**. На экране получают неподвижную картинку двух осциллограмм (**Рис.14**). Поскольку весь период T соответствует углу 360° , разность фаз определяется из соотношения: $\Delta\varphi = 360^\circ \Delta T/T$.

На *однолучевом осциллографе* процедура измерения сложнее и содержит два этапа: **а)** Получают устойчивое изображение одного из сигналов U_1 в режиме ВНЕШНЕЙ синхронизации *тем же самым сигналом*, то есть подавая его одновременно на вход **У** и вход синхронизации **Х**. Регулируют уровень синхронизации таким образом, чтобы какая-либо характерная точка (например, $y = 0$) попала на начало развертки (**Рис. 14**); **б)** Подают на вход **У** осциллографа второй сигнал U_2 , сохраняя синхронизацию от первого сигнала U_1 (УРОВЕНЬ НЕ ИЗМЕНЯТЬ!). Поскольку начало развертки по-прежнему определяется *первым сигналом*, второй сигнал будет сдвинут от начала. Временной сдвиг ΔT определяется по сдвигу от начала развертки аналогичной точки ($y = 0$) второго сигнала.

В методе ЭЛЛИПСА фазовый сдвиг определяется по фигуре Лиссажу. Движение луча по горизонтали и вертикали в параметрическом виде описывается уравнениями:

$$x = x_0 \sin \omega t$$

$$y = y_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

где $x_0 = s_1 u_1$, $y_0 = s_2 u_2$, s_1 и s_2 – чувствительность осциллографа по горизонтали и вертикали. В общем случае – это уравнение эллипса, главные оси которого повернуты относительно осей x и y на некоторый угол (**рис.15**). Координаты пересечений эллипса с осью ox определяются из условия $y = 0$, откуда следует $\omega t = \pi k - \varphi$, где $k = 1, 2, \dots$ и $x_1 = x_0 \sin(\pi k - \varphi) = (-1)^{k+1} x_0 \sin \varphi = \pm x_0 \sin \varphi$.

Аналогично, рассматривая координаты пересечений эллипса с осью oy , легко получить $y_1 = \pm y_0 \sin \varphi$. Таким образом, угол сдвига фаз можно найти из характерных размеров эллипса

$$\sin \varphi = \pm l_x / L_x = \pm l_y / L_y.$$

При определении φ нужно учесть направление наклона эллипса (**Рис.16**). Погрешность метода резко возрастает при углах, близких 90° , когда размеры l_x и L_x сближаются. Поэтому методом эллипса целесообразно измерять сдвиги фаз до $40^\circ - 50^\circ$. При этом погрешность осциллографа, как правило, не превышает 2 - 3 %. Систематическую ошибку, возникающую из-за неодинаковости фазовых сдвигов в каналах **Х** и **У** осциллографа, можно легко учесть. Для этого на оба канала одновременно подают один и тот же сигнал. Если на экране наблюдается не прямая, а эллипс, значит в осциллографе имеется постоянный фазовый сдвиг, величину которого можно определить по параметрам

получившегося эллипса. Этот сдвиг представляет систематическую ошибку, которую нужно вычитать из полученного результата.

Недостатком данного метода является его неоднозначность. Эволюция эллипса с ростом сдвига фаз показана на **рис.16**. Поскольку на

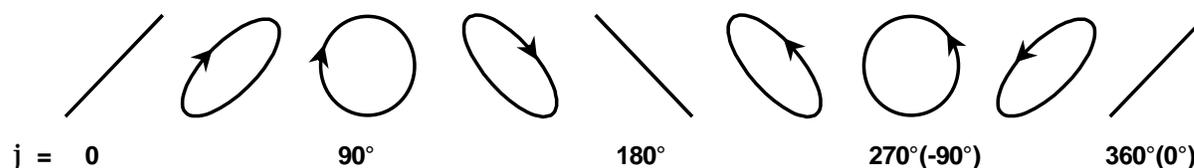


Рис. 16. Форма эллипса в зависимости от фазового сдвига

частотах $\geq 5-10$ Гц направление движения луча на экране не видно, эллипс выглядит одинаково для двух значений углов $\phi_{1,2} = \pm \phi$. Для разрешения данной неоднозначности в один из сигналов можно ввести известный дополнительный фазовый сдвиг и по характеру изменения эллипса определить исходный сдвиг фаз.

Приведенные выше методы определения фазового сдвига – не единственные. С другими методами можно ознакомиться в дополнительной литературе.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Ознакомьтесь с техническим описанием осциллографа. Сопоставьте ручки регулировки, расположенные на лицевой панели прибора с функциональной схемой (блок-схемой).

Приведите ручки в исходное состояние (см. техническое описание прибора и п. 3.3).

После включения осциллографа (сигнал на вход Y еще не подан), на экране должна появиться линия развертки. (Если линии нет, проверьте регулировку яркости луча, положения луча на экране и род работы генератора пилообразного напряжения – он должен работать в автоколебательном режиме.) Подберите оптимальную яркость, фокусировку, ручками смещение луча по вертикали и горизонтали установите луч посередине экрана. После подачи сигнала на вход Y подберите вертикальный размер. После этого приступайте к синхронизации. Для начала используйте режим внутренней синхронизации. Обратите внимание, как зависит картина от уровня синхронизации. Получите неподвижную картину для разных режимов работы генератора пилообразного напряжения, автоколебательного и

ждущего. При работе со ждущим режимом обратите внимание на полярности сигнала запуска ("┐┌" или "+" и "└└" или "-"). Убедитесь, что развертка действительно "ждет": временно отсоедините сигнал от входа Y - линия развертки должна исчезнуть. Освойтесь с режимом внешней синхронизации. В качестве сигнала синхронизации можно использовать тот же сигнал, который подан на вход Y, подведя его отдельными проводами к входной клемме внешней синхронизации X.

Прежде, чем приступать к измерениям, проверьте калибровку и балансировку осциллографа. Если они не нарушены, не стоит их расстраивать: настройка прибора требует довольно много времени и терпения.

После того, как Вы познакомились с различными режимами работы осциллографа, научились получать неподвижную картинку на экране, можно приступать к работе.

5. АНАЛИЗ СИГНАЛОВ

При измерении переменного напряжения различными приборами необходимо знать, какой вид имеет это напряжение, и какое именно напряжение измеряется – амплитудное, эффективное и т.д. и как они между собой связаны для конкретного сигнала. В общем случае – для произвольного периодического сигнала $U(t)$ эффективное значение напряжения определяется как среднее значение квадрата напряжения за период:

$$U_{\text{эфф}} = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt$$

Для синусоидального сигнала вида $U(t) = U_0 \sin(\omega t)$ $U_{\text{эфф}} = U_0 / \sqrt{2}$. Для сигналов другой формы это соотношение будет другим. Поэтому амплитуду несинусоидальных сигналов U_0 обычно определяют как полный перепад напряжения от минимального до максимального (*рис.18*).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Власова В.В., Павлов С.Е. Осциллографические методы измерений. Москва. Издательство МАИ. 1990 г.
2. Новопольский В.Д. Как работать с осциллографом. Москва. 1978 г.
3. Тронин Ю.В. Осциллограф. Учебное пособие по курсу "Электричество и радиотехнические измерения". Москва. 1977 г.
4. Прошин Е.М., Садовский Г.А. Измерение времени, частоты и фазы. Рязань. 1976 г.

5. Авсиевич Е.А. Современный электронный осциллограф. Москва. 1972 г.
6. Евсюков А.А. Электронный осциллограф в преподавании физики. Москва. 1972 г.
7. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. Москва. Мир. 1990 г. 535 с. Гл.12.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель работы: 1) изучить устройство простейшего электронного осциллографа; 2) освоить практику основных измерений, выполняемых с помощью осциллографа.

Оборудование: электронный осциллограф; генератор синусоидального напряжения, фазосдвигающая RC цепь, соединительные провода.

Задание 1. Ознакомление с монтажом и деталями осциллографа, его включение

1. Ознакомиться с панелью управления осциллографа (см. Приложение).
2. Включить осциллограф в сеть и вывести электронный луч в центр экрана.
3. Включить генератор внутренней развертки и с помощью горизонтального усилителя получить сигнал в пределах экрана. На вход вертикального усилителя подать синусоидальное напряжение с генератора. Изменяя частоту генератора внутренней развертки, получить на экране 1, 2, 3, 4 синусоиды при автоматическом запуске развертки и в ждущем режиме.
4. Зарисовать полученные осциллограммы с указанием соотношения периодов колебаний исследуемого сигнала и сигнала генератора внутренней развертки.
5. На вход вертикального усилителя подать сигнал с выхода калибратора осциллографа.
6. Изменяя частоту генератора внутренней развертки и чувствительность усилителя вертикального отклонения получить на экране изображение, соответствующее импульсному напряжению, указанному на выходе калибратора.
7. В соответствии с полученной частотой следования импульсов и амплитудным напряжением проверить правильность показаний на экране осциллографа сравнивая эти значения с выходными параметрами калибратора.

8. При несовпадениях показаний на экране с выходными значениями калибратора вывести ручки плавного управления чувствительностью и разверткой в положение правильного показания на экране.

Задание 2. Определение частотной характеристики вертикального входа осциллографа

1. Выключить генератор внутренней развертки (полож. “Выкл” или полож. “X”).
2. Подать на вход вертикального усилителя сигнал от звукового генератора, напряжение на входе которого поддерживается в течение всего опыта постоянным. Изменяя частоту подаваемого сигнала от 20 Гц до 200 кГц измерить длину вертикальной полоски на экране осциллографа – амплитуду сигнала (получить не менее 9 значений амплитуды – например, при частоте, равной 0,02, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 кГц).
3. Построить график зависимости амплитуды от логарифма частоты подаваемого сигнала. Этот график и будет являться частотной характеристикой вертикального усилителя осциллографа.
4. По графику частотной характеристики проанализировать качество вертикального усилителя, определить полосу пропускания его (т.е. определить, при каких частотах осциллограмма исследуемого сигнала не искажается).

Задание 3. Измерение напряжений с помощью осциллографа

1. Выключить генератор внутренней развертки (полож. “Выкл” или полож. “X”).
2. Подключить на вход вертикального усилителя звуковой генератор.
3. Определить величину напряжения подаваемого сигнала, используя значение чувствительности осциллографа, и сравнить ее с показанием вольтметра генератора. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.

Т а б л и ц а 4 .

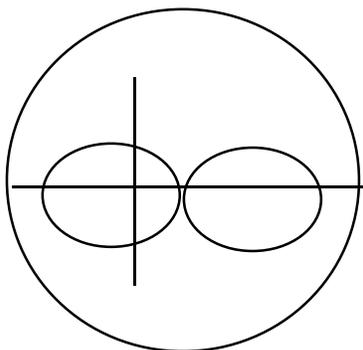
Определение неизвестного напряжения.

№ n/n	Отклонение, см	Чувств, V/см	$U_{ген.}, B$

Задание 4. Определение частоты исследуемого сигнала по фигурам Лиссажу

1. Выключить генератор внутренней развертки (полож. “Выкл” или полож. “X”).
2. На вход вертикального усилителя подать напряжение с генератора и вращая ручку регулировки усиления, добиться появления вертикальной полосы на экране.
3. На вход горизонтального усилителя подать напряжение с другого звукового генератора.
4. Изменяя ослабление канала горизонтального отклонения и регулятор частоты звукового генератора, добиться появления на экране устойчивой фигуры Лиссажу.
5. Зарисовать устойчивые фигуры Лиссажу для соотношения частот сигналов двух генераторов 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 .
6. Определить частоту исследуемого сигнала. Напомним, что частота определяется следующим образом. За каждый период колебаний напряжения, поданного на у, луч дважды пересекает ось х /для х-ось/, следовательно, отношение числа пересечений фигуры Лиссажу с осью х / n_x / и осью у / n_y / равно отношению частот, поданных на х и

на у, т.е. $\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y}$, $f_y = \frac{f_x n_x}{n_y}$. оси х и у мысленно выбирают так, чтобы они не проходили через точки пересечения самих фигур (см. рис).



Задание 4. Измерение фазового сдвига двух сигналов

1. Выключить генератор внутренней развертки (полож. “Выкл” или полож. “X”)
2. Подать сигнал с генератора на вход усилителя горизонтального отклонения (вход “X”).
3. Используя трехконтактный соединитель этот же сигнал подать на вход усилителя вертикального отклонения (вход “Y”).
4. Получить стабильное изображение сигнала генератора на экране осциллографа и зарисовать его положение.
5. Подать сигнал с генератора на вход усилителя вертикального отклонения через фазосдвигающую RC цепь.
6. Изменяя значения переменного сопротивления в фазосдвигающей RC цепи определить максимальный сдвиг фазы сигнала на входе “Y” относительно сигнала на входе “X” используя метод эллипсов.
7. Зарисовать изображение развертки сигнала при минимальном и максимальном сдвигах фаз сигналов.

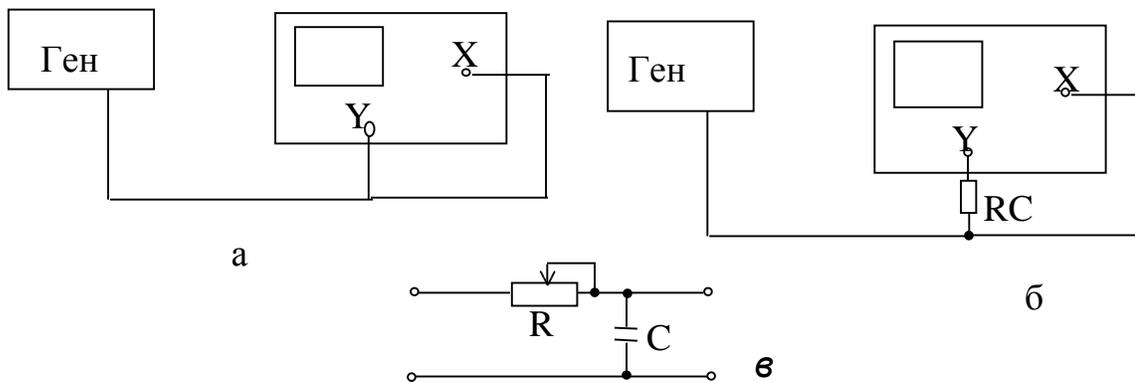


Рис.17. Схемы измерения фазового сдвига методом эллипса.
а) схема включения без фазосдвигающей цепи; б) схема включения с фазосдвигающей RC цепью; в) схема фазосдвигающей RC цепи

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроена электронно-лучевая трубка осциллографа?
2. Каким образом можно изменить яркость пятна на экране осциллографа?
3. Как производится фокусировка электронного луча?

4. Для чего служит в осциллографе генератор внутренней развертки?
5. Как получить неподвижное изображение на экране осциллографа?
6. Что такое синхронизация?
7. Для чего в осциллографе применяются усилители вертикального и горизонтального входов?
8. Каков принцип действия осциллографа? Объясните по блок-схеме осциллографа.
9. Каковы основные параметры электронного осциллографа? Что они характеризуют?
10. Где применяется электронный осциллограф? Каковы достоинства осциллографа по сравнению с другими электро-измерительными приборами?
11. Какое значение напряжения исследуемого сигнала – амплитудное или эффективное измеряет осциллограф?
12. Как изменить с помощью осциллографа неизвестное напряжение, ток? Можно ли измерить осциллографом постоянное напряжение?
13. Как измерить с помощью осциллографа сопротивление? Приведите схему этого измерения.
14. Как определить с помощью осциллографа сдвиг фаз и частоту исследуемого сигнала? Что такое фигура Лиссажу? Как получить ее на экране осциллографа?
15. Каково соотношение, с помощью которого можно определить частоту неизвестного сигнала по фигурам Лиссажу?
16. Для чего необходимо иметь график частотных характеристик усилителей осциллографа?

ВВОДНЫЙ ПРАКТИКУМ

Составители:

Дорохова Виктория Вольфовна
Иванов Николай Аркадьевич
Мартынович Евгений Федорович
Тимощенко Георгий Тимофеевич

Научный редактор – профессор А.Д. Афанасьев

ЛР № 020592 от 09.07.97

Подписано в печать _____ Формат 60x90 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. - печ. л. 4.

Тираж 150 экз. План 2004. Поз. _____. Зак. _____.

Редакционно-издательский отдел
Иркутского государственного университета
664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 36