

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПО ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВУ»

Кафедра высшей математики и физики

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. МАГНЕТИЗМ.
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

*Практикум
для выполнения лабораторных работ*

Специальности:

120301 – « Землеустройство»,
120302 – « Земельный кадастр»,
1200303 – « Городской кадастр»

Москва 2017

УДК 53(076.5)
ББК 22.373

Подготовлено и рекомендовано к печати
кафедрой высшей математики и физики
Государственного университета по землеустройству
(протокол № 1 от 29.января 2016 г.)

Утверждено к изданию ученым советом
факультета землеустройства
Государственного университета по землеустройству
(протокол № 7 от 21 марта 2016 г.)

Рецензенты:

- Калашников Н.П.**, доктор физико-математических наук,
профессор МИФИ
Загайнов В.А., доктор физико-математических наук,
профессор МИФИ.
Раклов В.П., кандидат технических наук, профессор ГУЗ.

Электричество. Магнетизм. Электротехника и основы электроники. Методические указания для выполнения лабораторных работ:
Иванов В.П., Куприянов Л.Ю., Максименко В.В., Прокофьев Л.Н.,
Хафизов Р.С. / Практикум для выполнения лабораторных работ. – М.: ГУЗ,
2017. – 104 с.

Учебное пособие содержит описания лабораторных работ по электричеству, магнетизму, электротехнике и основам электроники. В каждой работе имеется теоретическая часть, описание экспериментальной установки и методики проведения измерений.

© Государственный университет по землеустройству, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Основы обработки результатов эксперимента.....	4
Введение.....	4
1. Электричество.....	7
1.1 Проверка закона Ома и определение удельного сопротивления проводника.....	7
1.2 Измерение сопротивлений при помощи моста Уитстона.....	15
1.3 Снятие вольтамперной характеристики вакуумного диода.....	23
1.4 Определение вольтамперной характеристики полу- проводникового диода.....	26
2. Магнетизм.....	31
2.1 Изучение распределения магнитного поля вдоль оси соленоида.....	31
2.2. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона.....	39
2.3. Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли.....	46
2.4 Изучение намагничивания ферромагнетиков.....	51
3. Электромагнитные колебания.....	59
3.1 Изучение простейших линейных цепей переменного тока.....	59
3.2. Линейные избирательные цепи.....	65
3.3 Изучение релаксационных колебаний.....	71
4. Электротехника и основы электроники.....	76
4.1 Однофазные выпрямительные устройства.....	76
4.2 Транзисторный сглаживающий фильтр.....	83
4.3 Исследование логических и импульсных схем.....	87
5. Приложения.....	97
5.1 Единицы физических величин.....	99
5.2 Электронный осциллограф.....	100

ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Введение

В основе физики, как экспериментальной науки, лежат измерения. *Измерением называется операция сравнения измеряемой величины с некоторой величиной, принятой за единицу.* В результате измерения мы получаем число, показывающее, сколько единиц содержится в измеряемой величине. Само это число зависит от выбора единицы измерения и поэтому без ее указания не имеет никакого смысла.

Полученные в результате измерений значения различных величин могут зависеть друг от друга. Физика устанавливает связь между такими величинами и выражает ее в виде формул, которые показывают, как числовые значения одних величин могут быть найдены по числовым значениям других. Основы обработки результатов эксперимента подробно изложены в «Физическом практикуме. Лабораторные работы по механике и молекулярной физике. Учебное пособие для вузов / В.А. Рябов и др.». Здесь отметим особенности при проведении измерений в электрических цепях и связанными с этими измерениями приборными погрешностями.

Показания прибора обычно округляют до ближайшего деления шкалы (иногда до половины деления), поскольку отсчитывать на глаз доли деления неудобно и ненадежно. Если случайные ошибки невелики, все измерения после округления дадут один и тот же результат. В этом случае достаточно ограничиться двумя-тремя измерениями и не нужно проводить статистическую обработку результатов. Однако следует учесть приборную погрешность.

Будем различать погрешность отсчета по шкале и погрешность показаний прибора. Погрешность отсчета, связанную с округлением, примем равной половине деления шкалы или половине той доли деления, до которой производится округление.

Погрешность показаний, т.е. несоответствие показаний прибора истинному значению измеряемой величины, можно определить при сравнении показаний данного прибора и более точного

эталонного прибора. Эта погрешность может быть как систематической (например, неверная градуировка), так и случайной. В паспортных данных приводят максимальное значение суммарной погрешности (систематическая + случайная), которое называют предельной приборной погрешностью. Может быть указана относительная или абсолютная предельная погрешность.

Вместо предельной погрешности h может быть указан класс точности прибора γ . Для стрелочных электроизмерительных приборов, класс точности означает отношение предельной абсолютной погрешности к предельному значению измеряемой величины, т.е. к наибольшему ее значению x_{\max} , которое может быть измерено по шкале прибора:

$$\gamma = \frac{h}{x_{\max}} \cdot 100\%$$

Абсолютная погрешность показаний определяется по формуле:

$$h = x_{\max} \cdot \frac{\gamma}{100}$$

Класс точности может быть указан на шкале приборе, но это не всегда возможно, так как часто используются многопредельные приборы, в которых одна и та же шкала при различных режимах работы или способах включения прибора соответствует различным пределам измерений x_{\max} . В таких случаях в паспортных данных указывают погрешности для каждого из допускаемых пределов измерения прибора.

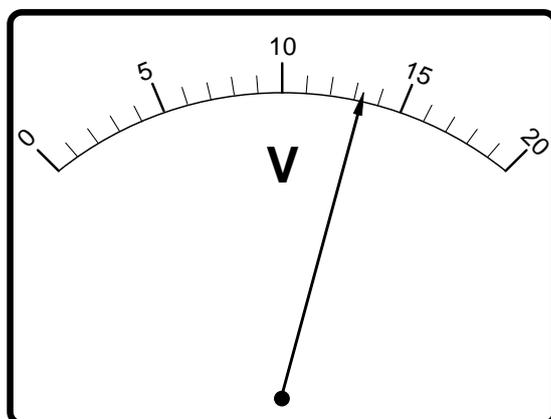


Рис. 1

Пример 1.

Милливольтметр класса 1,5 со шкалой на 300 мА дает в любом месте шкалы абсолютную предельную погрешность

$$h = 300 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 4,5 \text{ мА.}$$

Пример 2.

В табл. 1 приведена выдержка из паспортных данных электронного милливольтметра ВЗ-38. Указаны предельные погрешности в процентах от предела измерения.

Таблица 1

Погрешности милливольтметра ВЗ-38

Диапазон частот, МГц	Погрешность измерения напряжения, % на пределах измерения	
	1 - 300 мВ	1 - 300В
$(20 - 45) \cdot 10^{-6}$	+4	+4
$45 \cdot 10^{-6} - 1$	+2,5	+4
1-3	+4	+6
3-5	± 6	+6

При грубой оценке погрешностей будем учитывать лишь ту из приборных погрешностей (отсчета или показаний), которая больше. Если, в свою очередь, случайная (т.е. определяемая разбросом результатов) и приборная погрешности заметно различаются, в записи окончательного результата измерений будем указывать большую из них. Если эти погрешности примерно одинаковы, можно указать любую из них.

В качестве примера на рис.1 показано положение стрелки вольтметра при измерении падения напряжения на некотором сопротивлении. Тогда, с учетом изложенных правил, результатом измерения будет величина напряжения:

$$U = 13,5 \pm 0,5 \text{ В}$$

1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1.1 Проверка закона Ома и определение удельного сопротивления проводника

1.1.1 Введение

Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц. Сами эти частицы называются *носителями тока*. В металлах и полупроводниках носителями тока являются электроны, в электролитах – положительные и отрицательные ионы, в ионизированных газах – положительные, отрицательные ионы и электроны.

Упорядоченное движение носителей тока приводит к переносу заряда в направлении их скорости. Интенсивность этого переноса характеризуется *плотностью тока*, численно равной величине заряда, переносимого в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению движения носителей тока. За направление тока принимается направление движения положительно заряженных частиц. В случае, когда все носители тока одинаковы, плотность тока определяется формулой:

$$\vec{j} = ne\vec{u} \quad (1)$$

где, n – концентрация носителей тока, т.е. число их в единице объема,

e – заряд одной частицы,

\vec{u} – средняя скорость упорядоченного движения носителей тока. В случае, когда имеется несколько типов носителей тока, правая часть формулы (1) будет представлять собой сумму плотностей тока, создаваемого каждым типом частиц.

Силой тока через поверхность называется заряд, проходящий через эту поверхность в единицу времени. Бесконечно малый элемент поверхности характеризуется вектором $d\vec{S}$, направленным по нормали к поверхности, модуль которого равен площади этого элемента. Сила тока, протекающего через бесконечно малый элемент поверхности, равна

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

Сила тока, протекающего через конечную поверхность S , равна интегралу по этой поверхности от элементов силы тока:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (3)$$

Одним из основных способов возбуждения электрического тока в проводниках является создание и поддержание в них электрического поля. Как показывает опыт, для многих проводников (в частности, металлов) в широких пределах плотность тока \vec{j} пропорциональна напряженности электрического поля \vec{E} . Это – один из важнейших, хотя и не фундаментальных, законов электродинамики. Он называется *законом Ома*. Математически закон Ома выражается формулой

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности σ называется *удельной электрической проводимостью*. Строго говоря, формула (4) справедлива лишь для изотропных проводников, свойства которых одинаковы по всем направлениям. В анизотропных проводниках (кристаллах) направления векторов \vec{j} и \vec{E} , вообще говоря, не совпадают. Величина, обратная электрической проводимости, называется *удельным сопротивлением*:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (5)$$

Удельная электрическая проводимость зависит от свойств материала. По ее значению материалы делятся на три класса: диэлектрики, полупроводники и проводники. Резкой границы между ними нет. *Диэлектрики* – вещества с малой электрической проводимостью (большим удельным сопротивлением). Идеальный диэлектрик характеризуется отсутствием проводимости. Однако это может осуществиться лишь при 0° К . При температуре, отличной от 0 К , все материалы обладают определенной проводимостью и, следовательно, идеальных диэлектриков нет. Диэлектриком принято называть материал, удельное сопротивление которого $\rho > 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Полупроводники имеют удельное

сопротивление меньше 10^5 Ом·м, но больше 10^{-3} Ом·м. Проводники характеризуются удельным сопротивлением, меньшим 10^{-3} Ом·м. В основном это металлы. Наиболее хорошими проводниками среди них являются медь и серебро, удельное сопротивление которых имеет порядок 10^{-7} Ом·м.

В практически важном случае, когда электрические токи текут по тонким проводам, направление тока будет совпадать с направлением оси провода, а величина плотности тока может считаться одной и той же во всех точках его поперечного сечения. Сила тока через поперечное сечение провода площадью S равна

$$I = j \cdot S \quad (6)$$

Если ток постоянен, то сила тока I будет одна и та же вдоль всего провода. Электрическое поле постоянного тока создается зарядами, находящимися на поверхности проводника, плотность которых не меняется со временем, хотя и происходит движение зарядов: на место ушедших зарядов приходит такое же количество новых зарядов. Поэтому, как и поле неподвижных зарядов, поле постоянного тока является потенциальным. Разность потенциалов между двумя точками провода численно равна работе электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}, \quad (7)$$

где, $d\vec{l}$ – бесконечно малый элемент длины провода.

С учетом формул (4) и (6) для разности потенциалов получаем

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \frac{\vec{j} \cdot d\vec{l}}{\sigma} = I \cdot \int_1^2 \frac{dl}{\sigma \cdot S} = I \cdot R. \quad (8)$$

Величина

$$R = \int_1^2 \frac{dl}{\sigma \cdot S} \quad (9)$$

называется *электрическим сопротивлением* проводника.

Для однородного провода постоянного поперечного сечения

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (10)$$

где, l – его длина.

Разность потенциалов (8) называют также *напряжением* и обозначают

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

В случае, если участок цепи содержит источник сторонних (не электростатических) сил, то напряжение

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon, \quad (11)$$

где, ε – электродвижущая сила (ЭДС), равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке.

Формула
$$U = I \cdot R \quad (12)$$

выражает *закон Ома в интегральной форме* в отличие от формулы (4), представляющей этот закон в *локальной форме*. Формулу (12) называют также *законом Ома для участка цепи*.

Целью настоящей лабораторной работы является определение удельного сопротивления проводника. Наряду с этим экспериментально проверяется закон Ома (12) и пропорциональность сопротивления провода его длине.

Согласно формуле (10) коэффициент пропорциональности k между R и l равен

$$k = \frac{\rho}{S}.$$

Зная площадь поперечного сечения провода, и определив коэффициент k , можно найти удельное сопротивление как

$$\rho = k \cdot S.$$

1.1.2. Экспериментальная установка

Общий вид установки представлен на рис.2.

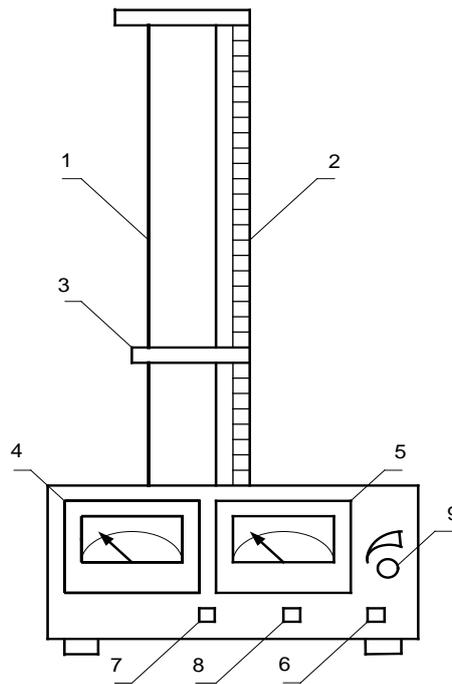


Рис. 2

Провод [1], удельное сопротивление которого требуется определить, натянут между неподвижными кронштейнами колонны [2], на которой нанесена метрическая шкала. Подвижный кронштейн [3] может передвигаться вдоль колонны и фиксироваться в любом положении. На подвижном кронштейне нанесена черта, которая позволяет определить по шкале колонны длину участка провода до нижнего кронштейна. Контактный зажим на подвижном кронштейне обеспечивает соединение данного участка провода с измерительной частью установки. Вольтметр [4] служит для измерения напряжения на выбранном участке провода, а амперметр [5] – для измерения силы тока в нем. Нажатие кнопки [6] вызывает включение напряжения питания. Нажатие кнопки [7] позволяет произвести измерения по одной из схем: при отжатой кнопке [8] с точным измерением силы тока, а при нажатой кнопке – с точным измерением напряжения. Ручка потенциометра [9] позволяет изменять силу тока в цепи.

1.1.3 Методика измерений

Схема измерений с точным измерением силы тока представлена на рис.3.

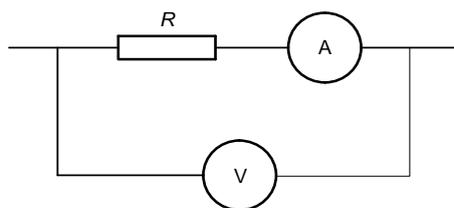


Рис. 3

R – измеряемое сопротивление, A – амперметр, V – вольтметр.

В этом режиме измерений сила тока I в сопротивлении R совпадает с показаниями амперметра I_A :

$$I = I_A, \quad (13)$$

а напряжение U на сопротивлении R равно:

$$U = U_V - I_A \cdot R_A, \quad (14)$$

где, U_V – показания вольтметра,

$R_A = 0,15$ Ом – внутреннее сопротивление амперметра.

В соответствии с законом Ома, измеряемое сопротивление определяется по формуле:

$$R = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (15)$$

Схема измерений с точным измерением напряжения приведена на рис. 4.

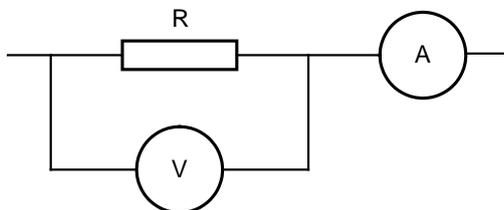


Рис. 4

В этом режиме измерений напряжение U на сопротивлении R совпадает с показаниями вольтметра U_V :

$$U = U_V, \quad (16)$$

а сила тока I в сопротивлении R равна:

$$I = I_A - \frac{U_V}{R_V}, \quad (17)$$

где, I_A – показания амперметра, $R_V = 2500$ Ом – внутреннее сопротивление вольтметра.

Сопротивление R вычисляется по формуле:

$$R = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (18)$$

1.1.4 Порядок выполнения работы

1. Включить шнур питания прибора в розетку с напряжением 220 В и нажать кнопку [6] (см. рис. 2).

2. Выбрать режим измерений с помощью кнопки [8] при нажатой кнопке [7].

3. Перемещая кронштейн [3], выбрать участок провода [1] и по шкале на колонне [2] определить его длину l .

4. Ручкой потенциометра [9] установить одно из значений силы тока I_A по шкале амперметра [5] и по шкале вольтметра [4] определить напряжение U_V .

5. Измерения напряжения U_V провести для пяти различных значений силы тока I_A в интервале от 100 до 250 мА и результаты записать в табл. 1.

Таблица 1

Режим	с точным измерением _____				
l , мм					
I_A , мА					

$U_V, \text{В}$					
$I, \text{мА}$					
$U, \text{В}$					

6. Для одного из значений силы тока I_A провести измерения напряжения U_V для пяти различных значений длины l в интервале от 100 до 500 мм и результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

Режим	с точным измерением _____				
$I_A, \text{мА}$					
$l, \text{мм}$					
$U_V, \text{В}$					
$I, \text{мА}$					
$U, \text{В}$					
$R, \text{Ом}$					

1.1.5 Обработка результатов измерений

1. По показаниям амперметра I_A и вольтметра U_V вычислить, согласно формулам (13) – (15) или (16) – (18), в соответствии с выбранным режимом измерений, силу тока I , напряжение U , сопротивление R и результаты записать в табл. 1 и 2.

2. Построить по данным табл. 1 вольтамперную характеристику, т.е. график зависимости I от U . Экспериментальным подтверждением закона Ома является линейная зависимость I от U .

3. Проверить пропорциональность сопротивления провода его длине, построив по данным табл. 2 график зависимости R от l .

4. Вычислить угловой коэффициент k прямой $R = k \cdot l$ и погрешность δ_k по формулам:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n l_i^2}, \quad (19)$$

$$\delta_k = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i^2}{\sum_{i=1}^n l_i^2} - k^2}. \quad (20)$$

5. Определить удельное сопротивление ρ и погрешность δ_ρ , как

$$\rho = k \cdot S, \quad (21)$$

$$\delta_\rho = \rho \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta_S}{S}\right)^2}, \quad (22)$$

где, $S = 0,102 \pm 0,003 \text{ мм}^2$ – площадь поперечного сечения провода.

Сравните полученное значение со значением $1,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для нихрома, из которого изготовлена проволока.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Дайте определения силы и плотности тока.
2. Сформулируйте закон Ома в локальной и интегральной форме.
3. Дайте определения разности потенциалов, электродвижущей силе и напряжению.
4. От чего зависит электрическое сопротивление провода?

1.2 Измерение сопротивлений при помощи моста Уитстона

Приборы и принадлежности: магазин сопротивлений, реохорд, набор неизвестных сопротивлений, микроамперметр постоянного тока, источник постоянного тока, ключ.

Цель работы: определить методом мостиковой схемы неизвестные два сопротивления по отдельности, а также при их последовательном и параллельном соединении.

1.2.1. Введение

Напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов, когда на этом участке не приложена ЭДС (однородный участок цепи).

Ом Г. экспериментально установил, что сила тока на участке цепи (не содержащем источника тока) прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению проводника R .

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5)$$

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для цилиндрического проводника сопротивление R прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S .

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (6)$$

ρ – удельное электрическое сопротивление, характеризующее материал проводника.

При последовательном соединении проводников их сопротивления складываются

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (7)$$

а при параллельном суммируются обратные значения сопротивлений

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим неоднородный участок 1-2, где действующую ЭДС на участке 1-2



Обозначим ε , а приложенную на концах участка разность потенциалов – $(\varphi_1 - \varphi_2)$, тогда в формулу (5) для закона Ома следует подставлять напряжение, определяемое формулой (4).

$$I = \frac{\varepsilon + \varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad (9)$$

где (9) – запись закона Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.

Для замкнутого участка цепи $\varphi_1 = \varphi_2$. С учетом этого получим выражение закона Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (10)$$

где, r – внутреннее сопротивление источника тока, а R – сопротивление внешней части цепи (сопротивление нагрузки).

1.2.2 Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Расчет разветвленных цепей можно произвести с помощью двух правил Кирхгофа. Любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех проводников с током, называется узлом. При этом ток, входящий в узел, считается положительным, а ток, выходящий из узла отрицательным.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна 0.

$$\sum_k I_k = 0. \quad (11)$$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

Второе правило гласит, что в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, сумма произведений сил токов на сопротивление соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре.

$$\sum_i I_i \cdot R_i = \sum_k \varepsilon_k. \quad (12)$$

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:

1) выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи; действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получится положительным, то

его направление было выбрано правильно, отрицательным $\square\square$ его истинное направление противоположно выбранному;

2) выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться; произведение $I_i \cdot R_i$ положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода и наоборот; ЭДС, действующие по выбранному направлению обход считаются положительными, против отрицательными;

3) составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин.

1.2.3 Описание приборов и метода измерений

В данной работе используется мост постоянного тока (мост Уитстона, рис. 5).

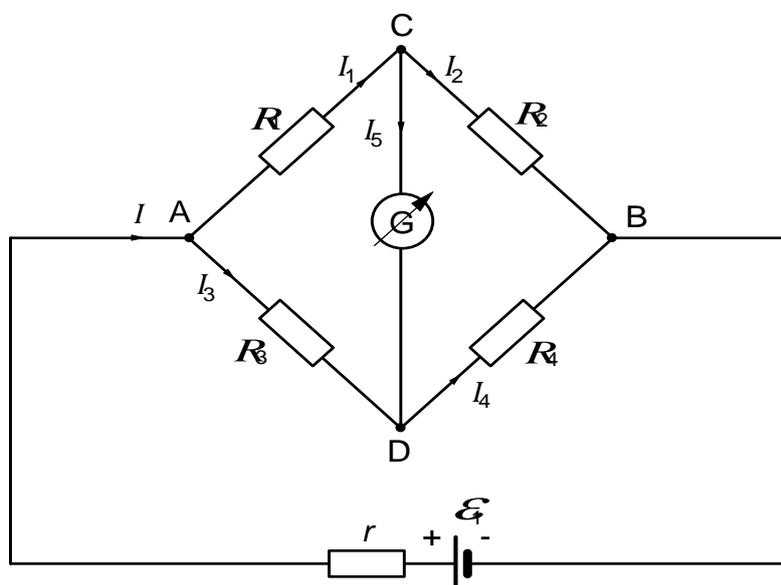


Рис.5

Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 образуют плечи моста Уитстона. Между точками А и В моста включен источник постоянного тока с ЭДС ε_1 и внутренним сопротивлением r .

Для узлов А, С и D, применяя первое правило Кирхгофа, получим

$$\begin{aligned} I - I_1 - I_3 &= 0 \\ I_1 - I_2 - I_5 &= 0 \\ I_3 + I_5 - I_4 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Для контуров ACBA, ACDA и CBDC согласно второму правилу Кирхгофа, можно записать:

$$\begin{aligned} I \cdot r + I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 &= \varepsilon_1 \\ I_1 \cdot R_1 + I_5 \cdot R_5 - I_3 \cdot R_3 &= 0 \\ I_2 \cdot R_2 - I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot R_5 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Если известны все сопротивления и ЭДС, то решая шесть уравнений (13, 14), можно найти неизвестные токи.

1.2.4 Метод измерений

Если нужно найти неизвестное сопротивление, то на практике используют обычно реохордный мост Уинстона (рис. 6), где сопротивления R_3 и R_4 представляют собой длинную однородную проволоку (реохорд) с большим удельным сопротивлением.

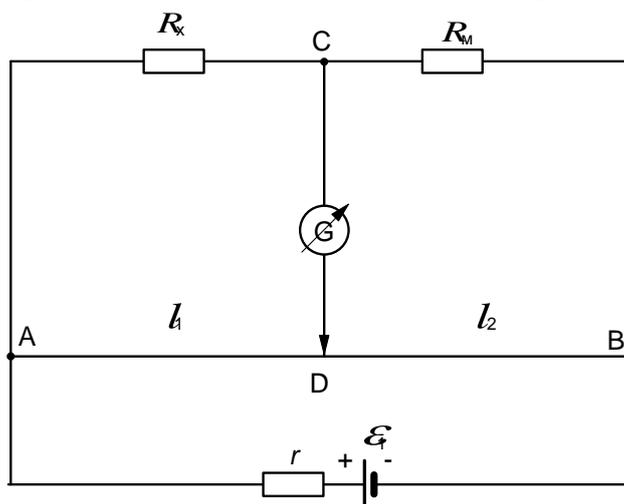


Рис. 6

Изменяя известные сопротивления R_M (магазин сопротивлений) R_3 и R_4 (плечи реохорда), можно добиться того, чтобы ток через микроамперметр был равен нулю. Тогда из уравнений (13) найдем

$$I_1 = I_2, \quad I_3 = I_4,$$

а из уравнений (14) получаем:

$$I_1 \cdot R_1 = I_3 \cdot R_3 \quad \text{и} \quad I_2 \cdot R_2 = I_4 \cdot R_4.$$

Взяв отношения последних выражений, получим

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}. \quad (15)$$

Заменив $\frac{R_3}{R_4}$ через длины реохорда $\frac{l_1}{l_2}$ можно вычислить неизвестное сопротивление R_x по формуле

$$R_x = R_m \cdot \frac{R_3}{R_4} = R_m \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (16)$$

1.2.5 Порядок выполнения работы

1. Соедините приборы по схеме (рис. 6).

2. Установите на магазине сопротивлений (МС) первое значение сопротивления $R_{m1} = 2$ Ом. Подайте питание от источника напряжения постоянного тока. Плавно перемещая ползунок реохорда, добейтесь установления стрелки микроамперметра на нуль и запишите значения плеч реохорда l_1 и l_2 , при которых выполняется условие

$$\frac{R_x}{R_m} = \frac{l_1}{l_2}$$

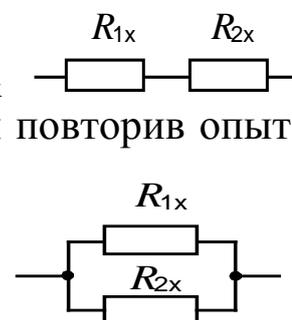
и найдите неизвестное сопротивление по формуле:

$$R_x = R_m \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

3. Повторите опыт при других значениях сопротивлений магазина МС (5, 10 и 20 Ом).

4. При выключенном тумблере источника питания вместо первого неизвестного сопротивления R_{1x} подключите другое неизвестное сопротивление R_{2x} и повторите опыт.

5. Включите в схему (участок 1-2) R_{1x} и R_{2x} последовательно (отключив источник питания) и повторив опыт,



определите общее сопротивление $R_{\text{послед}}$.

6. Включите в схему R_{1x} и R_{2x} параллельно и повторив опыт определите $R_{\text{паралл}}$.

7. Вычислите по формулам (7 и 8) общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении и сравните вычисленные результаты со средними значениями R_x , полученными в опыте.

Таблица

Измеряемая величина	№ измерения	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_x , Ом	Среднее значение R_x
R_{1x} , Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				
R_{2x} , Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				
$R_{\text{послед}}$, Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				
$R_{\text{паралл}}$, Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				

Контрольные вопросы

1. Какие законы постоянного тока используются в этой работе?
2. В чем заключается метод измерений сопротивлений мостиком постоянного тока?
3. Какова роль реохорда?
4. От чего зависит сопротивление проводников?

1.3. Снятие вольтамперной характеристики вакуумного диода

Цель работы: изучение термоэлектронной эмиссии и снятие вольтамперной характеристики вакуумного диода.

1.3.1. Введение

Вакуумный диод – простейшая электронная лампа с двумя электродами – анодом и катодом. Условное обозначение диода показано на рис. 7.

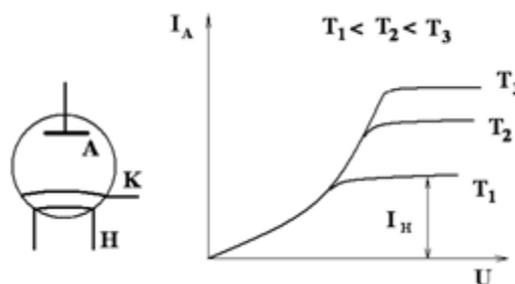


Рис. 6

Основными деталями диода являются: катод К, с которого при нагревании происходит термоэлектронная эмиссия (цилиндрическая трубка, покрытая слоем окислов щелочноземельных металлов, внутри которой помещена изолированная нить накала Н для подогрева катода, и анод А (металлический цилиндр, имевший общую ось с катодом). Электроды диода помещены в стеклянный баллон, из которого откачан воздух до давления ($10^{-7} - 10^{-6}$) мм рт. ст.

Работа вакуумного диода основана на использовании явления термоэлектронной эмиссии. При нагревании катода электроны испускаются с его поверхности и образуют электронное облако. Чем выше температура катода, тем больше электронов вблизи катода. При отсутствии электрического поля количество электронов, покидающих поверхность катода, равно количеству возвратившихся электронов.

При подключении диода к источнику питания между электродами возникает электрическое поле.

При прямом включении диода, когда потенциал анода выше потенциала катода, электроны под действием поля перемещаются к аноду и через лампу течет ток. С увеличением потенциала анода относительно катода сила тока вначале возрастает, так как увеличивается число электронов, достигающих анода. Затем величина тока перестает зависеть от напряжения, так как все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. Такой ток называют током насыщения. Чем выше температура катода, тем больше этот ток.

При обратном включении диода, когда потенциал анода ниже потенциала катода, электроны возвращаются к катоду, и ток через лампу не течет. Таким образом, диод пропускает ток лишь в одном направлении, т.е. обладает односторонней проводимостью.

Зависимость силы тока от разности потенциалов на электродах при постоянной температуре катода называется вольтамперной характеристикой диода (см. рис. 7).

Если поддерживать температуру накаливаемого диода постоянной, вольтамперная характеристика не является линейной, т.е. для вакуумного диода не выполняется закон Ома.

В области малых положительных значений напряжения зависимость термоэлектронного тока от напряжения описывается "законом трех вторых":

$$I_A = CU^{3/2},$$

где, C – коэффициент, зависящий от геометрических размеров и формы электродов, параметров катода, а также от взаимного расположения электродов.

При увеличении анодного напряжения ток возрастает и достигает некоторого максимального значения, называемого током насыщения. Ток насыщения I_H зависит от температуры катода. Плотность тока насыщения, характеризующая эмиссионную способность, зависит от материала катода и увеличивается с повышением температуры T в соответствии с формулой:

$$j_{нас} = AT^2 \exp(-e\phi/kT),$$

где, $e\phi$ – работа выхода электронов из металла,
 k – постоянная Больцмана,

A – константа.

Семейство вольтамперных характеристик при различных температурах катода представлено на рис. 7.

Свойства диода характеризуются такими его параметрами как крутизна анодной характеристики S_i и сопротивление диода переменному току R_i :

$$S_i = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_A}, R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{1}{S_i}.$$

Параметры диода определяются на приблизительно линейном участке вольтамперной характеристики.

1.3.2 Порядок выполнения работы

Измерения проводятся по схеме, приведенной на рис. 8, в которую входят вакуумный диод, источник постоянного тока ИП, вольтметр, миллиамперметр, блок питания цепи накала.

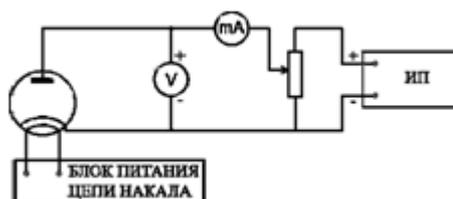


Рис. 6

Задачей работы является измерение анодного тока в зависимости от напряжения на аноде. Данные измерений заносятся в таблицу.

Таблица

U_A									
I_A									

По данным измерений строится вольтамперная характеристика диода.

Из обработки вольтамперной характеристики вычисляется крутизна анодной характеристики и сопротивление переменному току.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия вакуумного диода?
2. Какова основная причина нелинейности вольтамперной характеристики вакуумного диода?
3. Что такое ток насыщения? Как он зависит от температуры катода?

1.4 Определение вольтамперной характеристики полупроводникового диода

Приборы и принадлежности: блок питания, миллиамперметр, амперметр, вольтметр, переменный резистор, полупроводниковый диод.

Цель работы: снятие вольтамперной характеристики диода в фиксированном диапазоне напряжений; определение его параметров.

1.4.1. Введение

Существующие в природе твердые тела делят на аморфные и кристаллические. Используемые полупроводники относятся к кристаллическим телам и имеют пространственную решетку, в узлах которой располагаются атомы и связь между ними поддерживается за счет ковалентных электронов, то есть внешних электронов вращаются вокруг двух атомов и взаимно притягивающих их. Полупроводники имеют промежуточное значение параметра удельного сопротивления по сравнению с металлом 10^{-8} Ом·м и диэлектриком 10^6 Ом·м. Наиболее перспективными являются такие полупроводники как кремний, германий, селен, теллур и др. Собственная проводимость полупроводника обусловлена тем, что под действием тепла и излучений (электромагнитного, корпускулярного) возникают свободные электроны которые из валентной зоны уходят в зону проводимости. Под действием внешнего поля эти свободные электроны двигаются в полупроводнике, создавая ток проводимости. Незанятые электроном валентные зоны создают положительный заряд, который принято называть дыркой. Если есть вакансия валентной связи атома, то она может быть заполнена за счет валентного электрона соседнего атома и при этом по-

ложительный заряд переместится в пространстве. Перемещение положительного заряда называют дырочной проводимостью полупроводника. При приложении внешнего поля в полупроводнике возникает движение электронов и дырок, что создает собственную проводимость, которая может составлять величину $10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

В процессе движения электронов и дырок может происходить рекомбинация (исчезновение зарядов). Скорость рекомбинации и генерации зарядов полупроводника стабильны и равны в стационарном состоянии и увеличиваются с увеличением температуры. Отличие проводимости полупроводника и металла заключается в том, что при повышении температуры в полупроводнике значительно увеличивается число свободных электронов, а у металлов этого не происходит. С другой стороны при увеличении температуры повышается интенсивность колебаний атомов и это приводит к уменьшению проводимости металлов, а у полупроводников определяющим фактором повышения проводимости является повышение концентрации свободных электронов. Проводимость полупроводников можно повысить путем введения примеси, имеющую отличную от полупроводника валентность. Так например: введение $10^{-3} \%$ примеси мышьяка изменяет проводимость германия в 10^6 раз. Если вводить примесь с увеличенной по сравнению с полупроводником валентностью, то, получим полупроводник с избытком свободных электронов и основным носителем заряда будет электрон. Такие полупроводники называют полупроводниками n-типа. Если валентность примеси меньше, то полупроводник имеет основными носителями дырки и его называют полупроводник p-типа.

При соединении двух полупроводников с различной проводимостью в приграничной области происходит взаимная диффузия основных носителей, что приводит к созданию запирающего слоя, который препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок в смежную зону, и устанавливается динамическое равновесие. Толщина этого слоя невелика и составляет величину порядка $10^{-7} - 10^{-6}$ м. На рис. 9 представлена схема создания запирающего слоя.

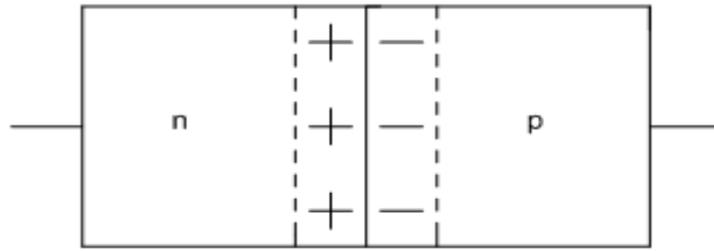


Рис. 9

При приложении к полупроводнику разности потенциалов соответствующих полю запирающего слоя толщина этого слоя увеличивается, и течет малый ток, а при приложении потенциала противоположного знака запирающий слой уменьшается и исчезает, и при этом течет значительный ток.

Таким образом, запирающий слой обладает вентиляльным эффектом, то есть односторонней проводимостью.

Аналитическое выражение для тока через $p-n$ переход имеет вид

$$I \approx I_0 \cdot \exp\left(\frac{qU}{kT} - 1\right),$$

где, I_0 – обратный ток через переход.

В идеализированном случае в $p-n$ переходе потерь нет и вольтамперная характеристика имеет плавный вид, а в реальных условиях имеется резкое увеличение обратного тока при больших напряжениях, которое называется пробоем. На рис.10 приведены вольтамперные характеристики для идеального (пунктирная кривая) и реального случаев.

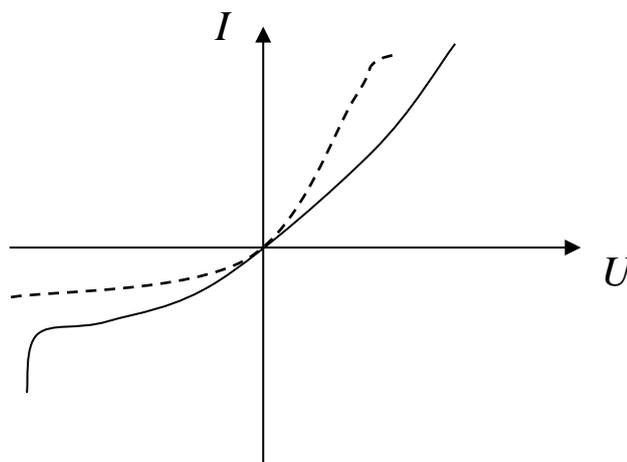


Рис. 10

К достоинствам полупроводникового диода относятся: малые габариты, надежность и др., а к недостаткам – сильная зависимость параметров от температуры. При выборе диода для конкретной схемы необходимо учитывать такие его характеристики, как наименьшее пробивное напряжение, ток пробоя, наибольший прямой ток. Эти параметры необходимо учитывать, так как нельзя допускать превышения рассеиваемой энергии выше допустимой, то есть $P > P_{\max}$. Целью данной работы является снятие вольтамперной характеристики, а также определение прямого и обратного сопротивления на линейном участке характеристики.

1.4.2 Порядок выполнения работы

1. Собрать установку по схеме, приведенной на рис. 11.

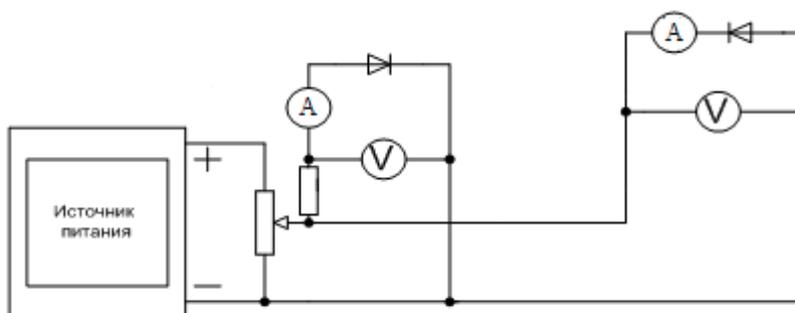


Рис. 11

Изменяя напряжение в пределах до 36В, записать показания приборов в табл.1 и 2.

Таблица 1

$U_{\text{пр}}, \text{В}$									
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$									

Таблица 2

$U_{\text{обр}}, \text{В}$								
$I_{\text{обр}}, \text{мкА}$								

2. По данным таблицы 1 и 2 построить вольтамперную характеристику диода.

3. Вычислить сопротивление на прямом и обратном участке характеристики по формуле:

$$R = \Delta U / \Delta I$$

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводник и от чего зависит его собственная проводимость?

2. Что происходит при добавлении в полупроводник примеси?

3. Что происходит при соединении двух полупроводников с разной проводимостью?

2. Магнетизм

2.1 Изучение распределения магнитного поля вдоль оси соленоида

2.1.1 Введение

Источником и объектом действия магнитного поля являются движущиеся заряды (электрические токи). Покоящиеся заряды магнитного поля не создают и на них магнитное поле не действует.

Сила, действующая на движущийся в магнитном поле точечный заряд, выражается формулой:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

где вектор \vec{B} не зависит от величины заряда q и от скорости \vec{v} его движения. Он характеризует только магнитное поле, в котором движется заряд, и называется магнитной индукцией. Сила \vec{F}_m перпендикулярна как скорости \vec{v} , так и индукции \vec{B} (для положительного заряда направление силы определяется правилом правого винта), а ее величина пропорциональна синусу угла между этими векторами. Когда векторы \vec{B} и \vec{v} коллинеарные, сила \vec{F}_m обращается в нуль.

На элемент объема dV проводника с током плотностью \vec{j} в магнитном поле действует сила

$$d\vec{F} = \vec{j}dV \times \vec{B}, \quad (2)$$

называемая силой Ампера. Если ток течет по тонкому проводу, то

$$\vec{j}dV = Id\vec{l},$$

где, I – сила тока в проводе,

$d\vec{l}$ – элемент его длины, причем направление вектора $d\vec{l}$ совпадает с направлением тока. Сила Ампера, действующая на линейный элемент тока, равна

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \quad (3)$$

Сила, действующая на провод конечной длины, находится интегрированием выражения (3) по всей длине провода.

Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции, согласно которому магнитные индукции полей отдельных зарядов векторно складываются, т.е. каждый заряд возбуждает магнитное поле, совершенно не зависящее от других зарядов.

Закон, описывающий порождение магнитного поля элементом тока, называется законом Био–Савара. Для объемных токов он выражается формулой

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{j} \times \vec{r}}{r^3} dV, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента тока dV к точке, в которой определяется магнитная индукция, а для линейных токов:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) верны лишь для постоянных токов. Индукция магнитного поля, создаваемого всеми элементами тока, находится интегрированием этих выражений. Для замкнутого линейного тока

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}. \quad (6)$$

Воспользуемся формулой (6) для вычисления магнитной индукции на оси кругового тока (рис.12).

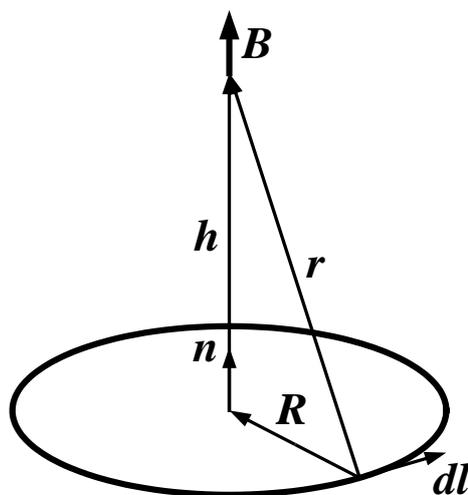


Рис.12

Представим радиус-вектор \vec{r} как $\vec{r} = \vec{R} + \vec{h}$. При интегрировании его модуль $r = \sqrt{R^2 + h^2}$ не изменяется, поэтому

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} \left(\oint d\vec{l} \times \vec{R} + \oint d\vec{l} \times \vec{h} \right). \quad (7)$$

Поскольку \vec{h} – постоянный вектор, то

$$\oint d\vec{l} \times \vec{h} = \left(\oint d\vec{l} \right) \times \vec{h} = 0,$$

так как $\oint d\vec{l} = 0$. Первый интеграл в (7) вычисляется следующим образом:

$$\oint d\vec{l} \times \vec{R} = \oint \vec{n} R \cdot d\vec{l} = \vec{n} R \oint d\vec{l} = \vec{n} 2\pi R, \quad (8)$$

где \vec{n} – единичный вектор, перпендикулярный плоскости, в которой находится круговой ток, а его направление связано с направлением тока правилом правого винта. Таким образом,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \vec{n}. \quad (9)$$

Найдем теперь индукцию магнитного поля на оси прямого круглого соленоида (катушки) радиуса R и длиной L , содержащего N витков тонкого провода, плотно прилегающих друг к другу, если по виткам течет ток силой I . На рис. 13 показано сечение соленоида.

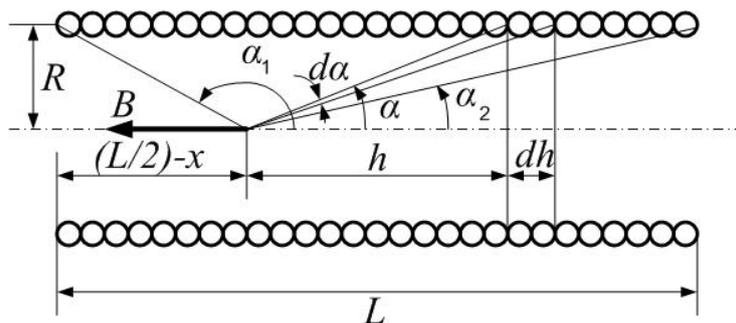


Рис. 13

Каждый виток создает поле, индукция которого на оси соленоида определяется в соответствии с формулой (10). Плотность намотки равна N/L . На малый участок соленоида длиной dh приходится $(N/L)dh$ витков, индукция магнитного поля которых на расстоянии h от них вычисляется как

$$d\vec{B} = \vec{n} \frac{\mu_0 NI}{2L} \frac{R^2 dh}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \quad (10)$$

Так как $h = R/\operatorname{tg} \alpha$ и $\sqrt{R^2 + h^2} = R/\sin \alpha$, то $dh = -Rd\alpha/\sin^2 \alpha$ и

$$d\vec{B} = -\vec{n} \frac{\mu_0 NI}{2L} \sin \alpha d\alpha = \vec{n} \frac{\mu_0 NI}{2L} d(\cos \alpha). \quad (11)$$

В пределах соленоида угол α изменяется от α_1 до α_2 , так что магнитная индукция внутри соленоида на его оси равна

$$\vec{B} = \vec{n} \frac{\mu_0 NI}{2L} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (12)$$

где

$$\cos \alpha_1 = -\frac{(L/2) - x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) - x]^2}}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{(L/2) + x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) + x]^2}}, \quad (13)$$

а x – координата, отсчитанная от центра соленоида. Таким образом, величина индукции магнитного поля соленоида в точке с координатой x на его оси равна

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left\{ \frac{(L/2) + x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) + x]^2}} + \frac{(L/2) - x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) - x]^2}} \right\}. \quad (14)$$

В середине соленоида ($x = 0$) магнитная индукция достигает максимального значения

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 NI}{L} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (2R/L)^2}}. \quad (15)$$

Для бесконечно длинного соленоида $\alpha_1 = \pi$, а $\alpha_2 = 0$ и, следовательно,

$$B_{\infty} = \frac{\mu_0 NI}{L}. \quad (16)$$

На рис. 14 представлен график распределения магнитного поля вдоль оси соленоида. По оси ординат отложено отношение величины индукции поля B к ее величине B_{∞} в соленоиде бесконечно большой длины.

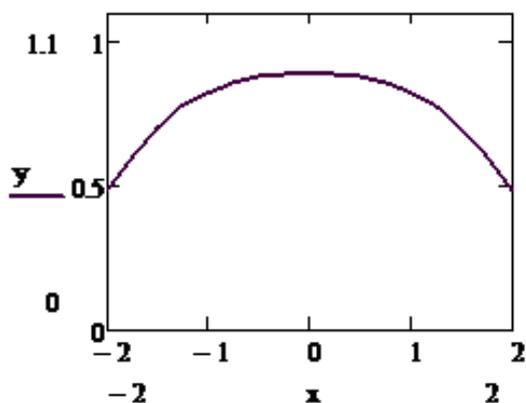


Рис. 14

По оси абсцисс отложена координата x , отнесенная к радиусу R соленоида. График построен для соленоида, длина которого в четыре раза больше его радиуса ($L = 4R$).

В центре соленоида индукция магнитного поля весьма близка к значению (16) и почти не меняется, пока расстояние до ближайшего конца соленоида остается больше его радиуса. На концах соленоида индукция поля примерно в два раза меньше, чем в середине.

Целью настоящей лабораторной работы является экспериментальная проверка распределения магнитного поля вдоль оси соленоида. Для измерения магнитной индукции используется датчик Холла. Наряду с этим определяется концентрация носителей тока в датчике Холла.

2.1.2. Экспериментальная установка и методика измерений

Датчик Холла представляет собой прямоугольную пластинку, вдоль которой течет ток с плотностью \vec{j} (рис. 15).

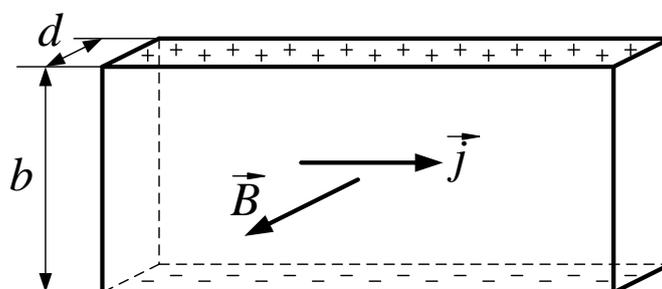


Рис. 15

В магнитном поле с индукцией \vec{B} , направленной перпендикулярно вектору \vec{j} , на носители тока действует сила Лоренца (1), под действием которой заряды стремятся сместиться в направлении силы. В результате на соответствующей грани пластинки образуется избыток зарядов того же знака, что и знак зарядов, осуществляющих ток, а на противоположной грани – избыток зарядов противоположного знака. Ситуация, изображенная на рис. 15, соответствует отрицательно заряженным носителям тока. Между противоположно заряженными гранями возникает разность потенциалов и такое электрическое поле \vec{E} , которое нейтрализует действие магнитного поля. В установившемся состоянии сила, действующая на носители тока с зарядом e со стороны электрического поля, равна по величине силе Лоренца:

$$eE = evB. \quad (17)$$

Следовательно, поперечная разность потенциалов равна

$$U = Eb = vBb, \quad (18)$$

где b – ширина пластинки. Возникновение поперечной разности потенциалов в проводнике с током в магнитном поле называется эффектом Холла. Среднюю скорость v носителей тока можно выразить через плотность тока j , так как,

$$j = nev, \quad (19)$$

где n – концентрация носителей тока. С учетом (19) выражение (18) принимает вид:

$$U = RjBb, \quad (20)$$

Где $R = 1/ne$ – *постоянная Холла*. Принимая во внимание, что сила тока в пластине $i = jS$, где $S = bd$ – площадь поперечного сечения, а d – толщина пластины, перепишем (20) в виде

$$U = R \cdot \frac{iB}{d}. \quad (21)$$

Таким образом, при заданной силе тока холловская разность потенциалов пропорциональна индукции магнитного поля. На этом и основан метод измерения магнитной индукции датчиком Холла.

Эффект Холла используется также для определения концентрации носителей тока, которая рассчитывается по формуле

$$n = \frac{iB}{eUd}. \quad (22)$$

Как показывают измерения, у металлов концентрация носителей тока (электронов) оказывается, примерно равна концентрации атомов. Обычно у металлов концентрация атомов, а, следовательно, и свободных электронов близка к $n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Концентрация носителей тока в полупроводниках изменяется в широких пределах от 10^{19} до 10^{25} м^{-3} .

Основной частью установки является кассета [1] с соленоидом, вдоль оси, которого может перемещаться шток [2] с датчиком Холла (рис. 16). На штоке через 10 мм нанесены деления, с помощью которых ведется отсчет перемещения датчика Холла. На передней панели кассеты имеются два гнезда [3], к которым подключается вольтметр для измерения холловской разности потенциалов, и разъем [4], через который подается питание на соленоид и датчик Холла от источника постоянного тока [5].

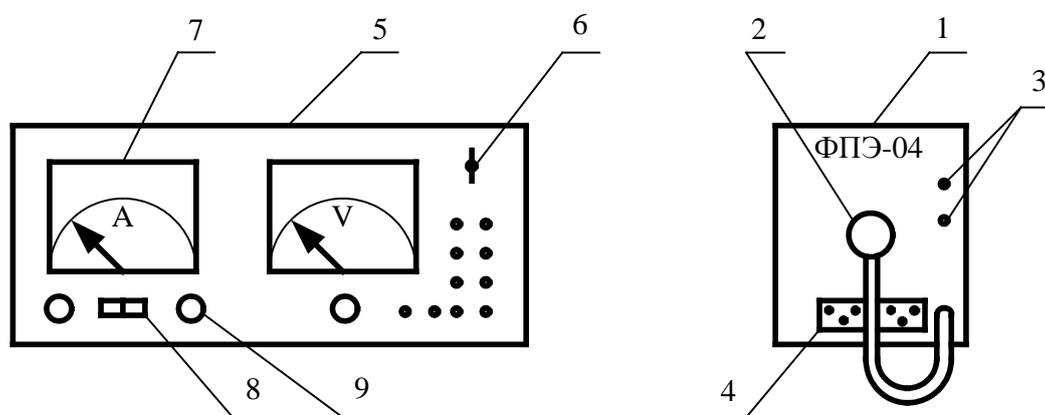


Рис.16

Тумблером [6] осуществляется подключение источника питания к сети. Напряжение на соленоид подается через канал $5 \div 25 \text{ В}$. Контроль силы тока в соленоиде осуществляется амперметром [7]. Подключение амперметра к каналу $5 \div 25 \text{ В}$ происходит при нажатии кнопки [8]. Ручка [9] служит для плавного регулирования выходного напряжения в канале. Питание датчика Холла осуществляется постоянным током $i = 90 \text{ мА}$. Датчик

Холла представляет собой германиевую пластинку толщиной $d = 0,2$ мм. Соленоид имеет длину $L = 168$ мм, диаметр $2R = 85$ мм и число витков $N = 2700$.

2.1.3 Порядок выполнения работы

1. Подключить к кассете с соленоидом вольтметр и источник питания. Включить приборы в сеть с напряжением 220 В.

2. Установить силу тока I питания соленоида и ее значение записать в табл.1.

3. Перемещая шток с датчиком Холла в соленоиде, снять показания вольтметра U на разных расстояниях x датчика от центра соленоида. Результаты измерений записать в таблицу.

Таблица

I, A							
$x, мм$	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40
$U, В$							
$x, мм$	-30	-20	-10	0	10	20	30
$U, В$							
$x, мм$	40	50	60	70	80	90	100
$U, В$							

4. По данным таблицы построить график зависимости U от x .

5. Вычислить по формуле (15) значение магнитной индукции B_{\max} в центре соленоида.

6. По полученному значению B_{\max} и соответствующему ему значению холловской разности потенциалов U найти согласно формуле (22) концентрацию n свободных электронов (заряд электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл) в датчике Холла.

Результат измерения:

$$n =$$

Контрольные вопросы

1. Как определяется направление и величина силы, действующей на движущийся заряд в магнитном поле?

2. Чему равна сила, действующая на виток с током в однородном магнитном поле?

3. Как связана индукция магнитного поля движущегося заряда с напряженностью его электрического поля?

4. Сформулируйте закон Био-Савара и получите выражение для индукции магнитного поля прямолинейного тока.

5. В чем заключается и как объясняется эффект Холла?

2.2. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона

Цель работы – измерение отношения e/m для электрона методом магнетрона.

2.2.1. Общие сведения

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила, которую называют магнитной:

$$\vec{F} = q[\vec{V}, \vec{B}],$$

где q – заряд частицы, \vec{V} – ее скорость; \vec{B} – индукция магнитного поля.

Направлена эта сила перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \vec{V} и \vec{B} . Модуль магнитной силы $F = qVB\sin\alpha$, где α – угол между векторами \vec{V} и \vec{B} .

Траектория движения заряженной частицы в магнитном поле определяется конфигурацией магнитного поля, ориентацией вектора скорости и отношением заряда частицы его массе.

Если имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то сила, действующая на заряженную частицу, называется силой Лоренца и определяется так:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{V}, \vec{B}]),$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля.

2.2.2. Приборы и оборудование

ФПЭ-03 – кассета;

ИП – источник питания;

РА – амперметр.

2.2.3 Метод измерения

Существуют различные методы определения отношения e/m , в основе которых лежат результаты исследования движения электрона в электрическом и магнитном полях. Один из них – *метод магнетрона*. Называется он так потому, что конфигурация полей в нем напоминает конфигурацию полей в магнетронах – генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот.

Сущность метода состоит в следующем: специальная двух-электродная лампа, электроды которой представляют собой коаксиальные цилиндры, помещается внутри соленоида так, что ось лампы совпадает с осью соленоида. Электроны, вылетающие из катода лампы, при отсутствии тока в соленоиде движутся радиально к аноду. При подключении тока к соленоиду в лампе создается магнитное поле, параллельное оси лампы, и на электроны начинает действовать магнитная сила

$$\vec{F} = -e[\vec{V}, \vec{B}], \quad (1)$$

где e – величина заряда электрона;

\vec{V} – скорость электрона;

\vec{B} – индукция магнитного поля.

Под действием этой силы, направленной в каждый момент времени перпендикулярно вектору скорости, траектория электронов искривляется. При определенном соотношении между скоростью электрона и индукцией магнитного поля электроны перестают поступать на анод, и ток в лампе прекращается. Рассмотрим подробнее движение электронов в лампе при наличии магнитного поля. Для описания этого движения воспользуемся цилиндрической системой координат (рис. 17), в которой положение электрона определяется расстоянием его от оси лампы r , полярным углом φ и смещением вдоль оси Z . Электрическое поле, имеющее только радиальную компоненту, действует на электрон с силой, направленной по радиусу от катода к аноду.

Магнитная сила, действующая на электрон, не имеет составляющей параллельной оси Z . Поэтому электрон, вылетающий из катода без начальной скорости (начальные скорости электронов, определяемые начальной температурой катода, много меньше скоростей, приобретаемых ими при движении в электрическом поле лампы), движется в плоскости, перпендикулярной оси Z .

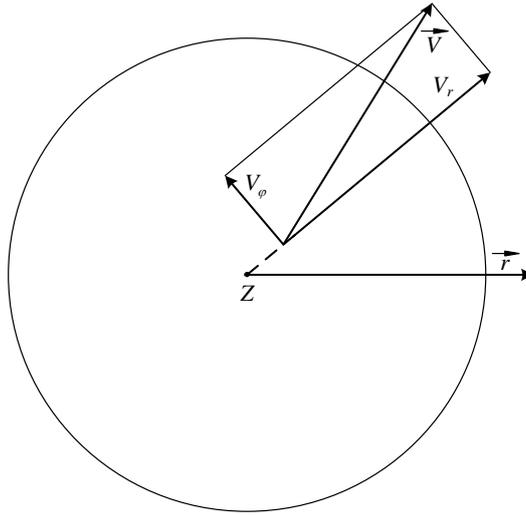


Рис. 17

Момент импульса электрона L_z относительно оси Z .

$$L_z = mV_\varphi r, \quad (2)$$

где $V_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}$ – составляющая скорости, перпендикулярная радиусу r .

Момент \vec{M} сил, действующих на электрон относительно оси Z , определяется только составляющей магнитной силы, перпендикулярной \vec{r} . Электрическая сила и составляющая магнитной силы, направленные вдоль радиуса \vec{r} , момента относительно оси Z не создают. Таким образом:

$$M_z = reV_r B, \quad (3)$$

где $V_r = \frac{dr}{dt}$ – радиальная составляющая скорости электрона.

Согласно уравнению моментов:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (4)$$

Проектируя (4) на ось Z , получаем:

$$\frac{d(mV_\varphi r)}{dt} = er \frac{drB}{dt}$$

или

$$\frac{d(mV_\varphi r)}{dt} = \frac{1}{2} eB \frac{d(r^2)}{dt} \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) дает:

$$mV_{\varphi}r = \frac{1}{2}eBr^2 + const .$$

Константу найдем из начальных условий:

при $r = r_k$ (r_k – радиус катода) $V_{\varphi} = 0$.

Тогда $const = -\frac{1}{2}eBr_k^2$ и

$$V_{\varphi} = \frac{eB}{2mr} \cdot (r^2 - r_k^2). \quad (6)$$

Кинетическая энергия электрона равна работе электрического поля:

$$\frac{m(V_{\varphi}^2 + V_r^2)}{2} = eU, \quad (7)$$

где U – потенциал относительно катода точки поля, в которой находится электрон. Подставляя в (7) значение V_{φ} из (6), получаем:

$$eU = \frac{m}{2} \left[V_r^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B^2}{r^2} (r^2 - r_k^2)^2 \right]. \quad (8)$$

При некотором значении индукции магнитного поля $B_{кр}$, которое называет критическим, скорость электрона вблизи анода станет перпендикулярной радиусу \vec{r} , т.е. $V_r = 0$.

Тогда уравнение (8) примет вид:

$$eU_a = \frac{m}{8} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B_{кр}^2}{r_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2,$$

где U_a – потенциал анода относительно катода (анодное напряжение);

r_a – радиус анода.

Отсюда находим выражение для удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2} \right)^2}. \quad (9)$$

Индукция магнитного поля соленоида, длина L которого соизмерима с диаметром D , находится по формуле

$$B_{\text{кр}} = \mu_0 n i_{\text{кр}} \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N i_{\text{кр}}}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (10)$$

где, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, – магнитная постоянная;

N – число витков соленоида;

$i_{\text{кр}}$ – ток в обмотке соленоида.

Таким образом, экспериментально определив $B_{\text{кр}}$, можно вычислить величину e/m . Для нахождения $B_{\text{кр}}$ в лампе следует установить разность потенциалов между анодом и катодом и постепенно наращивать ток в соленоиде, что увеличивает магнитное поле в лампе. Если бы все электроны покидали катод со скоростью, равной нулю, то зависимость величины анодного тока от величины индукции магнитного поля имела бы вид, показанный на рис. 18 (пунктирная линия). В этом случае при $B \leq B_{\text{кр}}$ все электроны, испускаемые катодом, достигали бы анода, а при $B \geq B_{\text{кр}}$ ни один электрон не попадал бы на анод. Однако, некоторая некоаксиальность катода и анода, наличие остаточного газа в лампе, падение напряжения вдоль катода, неоднородность поля соленоида по высоте анода и т.д. приводят к тому, что критические условия достигаются для разных электронов при различных значениях B . Все же перелом кривой останется достаточно резким и может быть использован для определения $B_{\text{кр}}$.

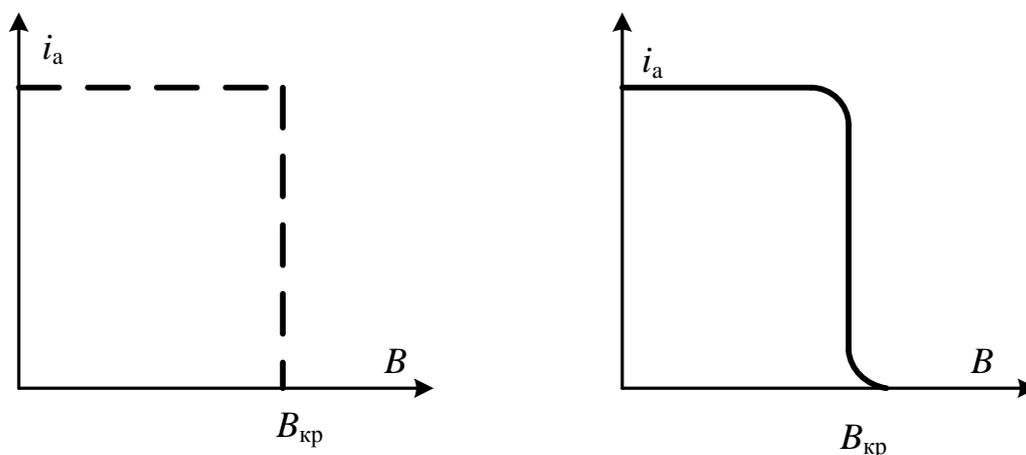


Рис. 18

2.2.4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь установки (рис. 19). Для этого соединить гнезда на лицевой панели кассеты с соответствующими гнездами источника питания ИП и измерительного прибора РА.

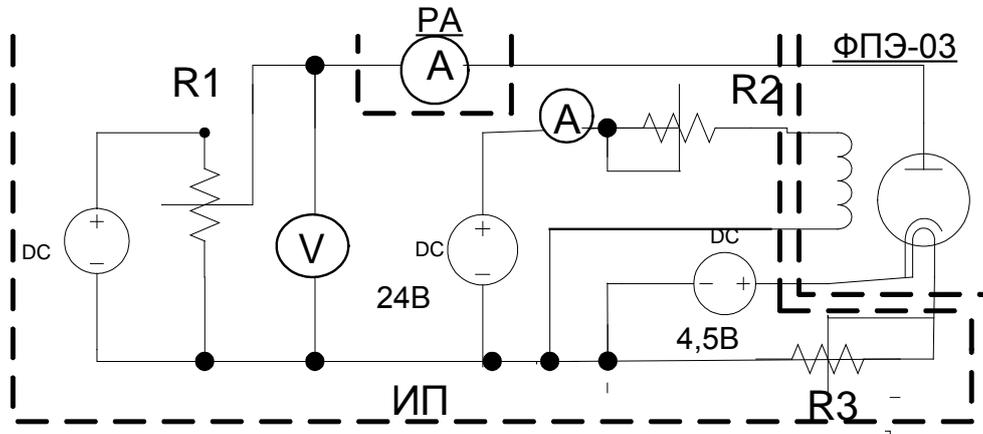


Рис. 19

2. Установить анодное напряжение $U_a = 50$ В по вольтметру ИП.

3. Установить ток накала катода $I_k = 0,45$ А. Подождать стабилизации значения анодного тока i_a как результат установления температурного режима лампы.

4. Изменяя ток в соленоиде i_c от минимального значения до максимального через 0,1 А при постоянном анодном напряжении U_a и токе накала катода I_k , снять сбросовую характеристику, т.е. зависимость анодного тока i_a от тока в соленоиде i_c . Значения анодного тока, определяемые по прибору РА, и значения тока в соленоиде, определяемые по показаниям амперметра ИП, занести в табл. 1.

5. Повторить п.п. 2 и 3 при двух других значениях анодного напряжения $U_a > 50$ В. Результаты измерений занести в таблицу 1.

6. Для каждого значения анодного напряжения повторить сбросовую характеристику, откладывая по оси ординат значения анодного тока, а по оси абсцисс – значения тока в соленоиде. Критическое значение тока в соленоиде определить по точке перегиба сбросовой характеристики (на участке ее спада) (как показано на рис. 18). Занести полученные значения в табл. 2.

7. Для каждого критического значения тока в соленоиде рассчитать по формуле (10) индукцию магнитного поля с использованием следующих значений параметров установки.

$L, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	N	$r_a, \text{ м}$	$r_k, \text{ м}$
0,168	0,06	2520	0,001	0,0005

8. Вычислить e/m по формуле (9) для каждого значения критического поля в соленоиде и определить ее среднее значение.

9. Вычислить среднеарифметическую погрешность полученной величины e/m .

Таблица 1

$U_a = \dots B$		$U_a = \dots B$		$U_a = \dots B$	
i_c	i_a	i_c	i_a	i_c	i_a

Таблица 2

U_a	$i_{кр}$	$B_{кр}$	e/m

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода магнетрона для определения отношения e/m ?

2. Влияет ли на величину $B_{кр}$ изменение направления тока в соленоиде на противоположное?

3. Зависит ли величина e/m от величины анодного напряжения

4. Рассмотреть движение электронов в однородном магнитном поле в двух случаях:

а) скорость электрона \vec{V} параллельна \vec{B} ;

б) скорость электрона \vec{V} направлена под углом α к полю.

2.3. Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, ключ, реостат, двойной переключатель,

Цель работы: изучить магнитное поле Земли; определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли.

2.3.1. Введение

Магнитное поле в каждой точке пространства характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} . Графически магнитное поле можно изобразить, если ввести представление о линиях магнитной индукции (иногда их называют силовыми линиями магнитного поля). Линии магнитной индукции – воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} в этих точках поля. Линии магнитной индукции замкнутые (в отличие от линий напряженности электрического поля).

На электрический заряд величиной q , движущийся со скоростью \vec{v} в магнитном поле с индукцией \vec{B} , действует сила Лоренца, модуль которой равен

$$F_{\text{л}} = qvB\sin\alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Направление силы $\vec{F}_{\text{л}}$ определяется правилом левой руки: расположим руку так, чтобы линии магнитной индукции (т.е. вектор \vec{B}) входили в ладонь, а направление четырех пальцев совпало с направлением вектора скорости заряда. Тогда направление отогнутого в сторону большого пальца совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд (на отрицательный заряд действует сила противоположного направления).

На прямой проводник с силой тока I и длиной l , помещенный в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} , действует сила Ампера, направление которой определяется правилом левой руки, а модуль равен: $F_{\text{А}} = IlB\sin\alpha$,

где α – угол между вектором \vec{B} и направлением тока в проводнике.

На участок длиной l одного из двух параллельных прямых бесконечных проводников, расположенных на расстоянии R друг от друга, по которым текут токи с силами токов, I_1 и I_2 , действует сила притяжения (отталкивания) при одинаковых (противоположных) направлениях токов, модуль которой равен:

$$F = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{R} l,$$

Где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ – относительная магнитная проницаемость однородной изотропной среды, в которой находятся проводники с током.

Направление тока в проводе и направление линий магнитной индукции связаны правилом правого винта. Величина магнитной индукции поля, созданного током I , протекающим по тонкому прямому бесконечному проводнику на расстоянии r от проводника:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Величина магнитной индукции в центре кольца радиуса R , по которому протекает ток I , равна:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Как известно, Земля обладает магнитным полем. Магнитное поле Земли, искривляющее траекторию заряженных частиц, предохраняет ее от "солнечного ветра" – мощного потока заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Силовые линии магнитного поля Земли \vec{B}_3 изображены на рис. 20.

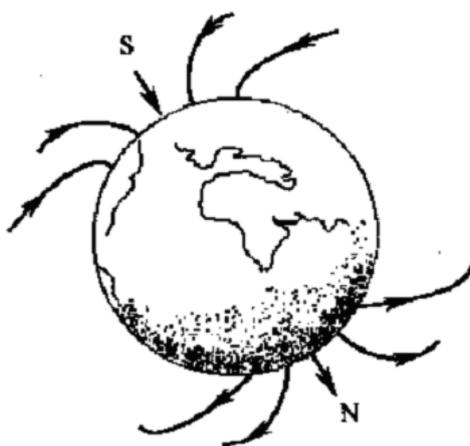


Рис. 20

Если поместить в магнитное поле Земли легкую магнитную стрелку, которая может поворачиваться только вокруг вертикальной оси, то она под действием горизонтальной составляющей поля, отклонится на некоторый угол и установится по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли.

Следует иметь в виду, что магнитные полюса Земли не совпадают с ее географическими полюсами. Географические полюса Земли определяются ее осью вращения, тогда как магнитные полюса Земли – это две точки на ее поверхности, в которых \vec{B}_3 – вертикальна. В связи с этим плоскость магнитного меридиана не совпадает с плоскостью географического меридиана. Под плоскостью магнитного меридиана, в какой-нибудь точке на земной поверхности, понимают плоскость, проходящую через эту точку и магнитные полюса Земли. Механическое действие вертикальной составляющей поля будет уравниваться реакцией опоры и нас в дальнейшем интересоваться не будет.

Существующие в настоящее время теории земного магнетизма можно разбить на две группы:

1. Теории, объясняющие наличие магнитного поля электрическими токами, циркулирующими на больших глубинах в жидком ядре Земли.

2. Теории, основанные на предположении, что земная кора содержит в разных своих участках различное количество магнитных пород. Однако происхождение магнитного поля Земли в настоящее время еще не выяснено.

2.3.2 Описание экспериментальной установки

Способность магнитной стрелки (лежащей в горизонтальной плоскости) отклоняться под действием горизонтальной составляющей $\vec{B}_{3г}$ магнитного поля Земли используется в приборе, называемом тангенс–гальванометр, который представляет собой плоскую вертикальную катушку большого радиуса R с некоторым числом витков N провода. В центре катушки установлена геодезическая буссоль. Магнитная стрелка буссоли может свободно вращаться вокруг вертикальной оси. Концы стрелки перемещаются по шкале, разделенной на градусы. Когда тока в катушке нет, магнитная стрелка буссоли направлена вдоль магнитного меридиана Земли.

Когда через катушку тангенс–гальванометра пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол α . Это объясняется тем, что на магнитную стрелку буссоли действуют два поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока в катушке тангенс–гальванометра. Под действием этих полей магнитная стрелка займет положение равновесия (рис. 21), при котором ось стрелки будет совпадать с вектором \vec{B} – векторной суммой $\vec{B}_{3г}$ и $\vec{B}_к$ (поле катушки).

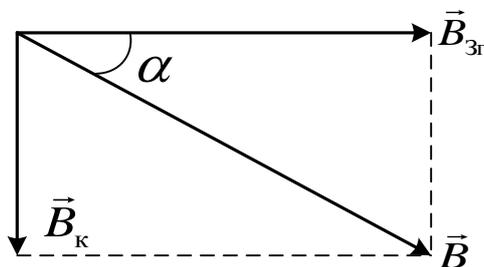


Рис. 21

Из треугольника на рис. 21 имеем:

$$B_{3г} = \frac{B_к}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

С другой стороны индукция магнитного поля тока в центре витков катушки равна:

$$B_к = \mu\mu_0 \frac{NI}{2R},$$

где I – сила тока в катушке,

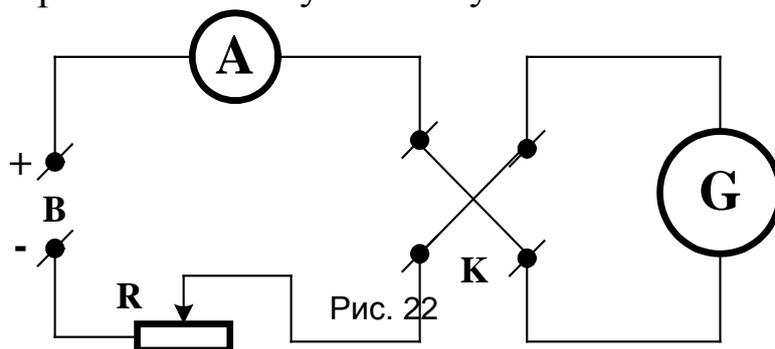
R – радиус витков,
 N – число витков катушки,
 μ – относительная магнитная проницаемость воздуха
 (практически равна 1), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

В результате:

$$B_{\text{зг}} = \mu\mu_0 \frac{NI}{2R \cdot \text{tg}\alpha}. \quad (1)$$

Формула (1) является расчетной.

Для измерения используют схему



G – тангенс-гальванометр, R – реостат;
 K – ключ; A – амперметр; B – источник тока.

2.3.3 Порядок выполнения работы

1. Собрать установку по схеме рис. 22. Число витков катушки и радиус витков указаны на установке.

2. Установить плоскость витков катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли.

3. Включить установку. Перемещая ползунок реостата, установить некоторое значение силы тока I . Выждав, пока магнитная стрелка буссоли придет в равновесие, отсчитать угол отклонения стрелки из первоначального положения равновесия α_+ .

Отсчет производят по концу стрелки, указывающему на север. Результат занести в таблицу.

4. Не меняя величину тока в цепи, с помощью переключателя, измерить угол отклонения магнитной стрелки α_- .

5. Для каждой силы тока найти и занести в таблицу среднее значение угла отклонения стрелки

$$\alpha = \frac{\alpha_+ + \alpha_-}{2}.$$

6. Повторить измерения еще для двух значений тока, указанных преподавателем. Для каждой силы тока по формуле (1) рассчитать $B_{зг}$, используя соответствующее значение угла отклонения α .

7. Найти среднее значение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли:

Таблица

№	I	α_+	α_-	α	$tg\alpha$		$\overline{B_{зг}}$
1							
2							
3							

Контрольные вопросы

1. Что характеризует вектор индукции магнитного поля Земли?
2. Как можно определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли?
3. Поясните принцип действия тангенс–гальванометра.
4. Почему следует ориентировать катушку тангенс–гальванометра в направлении магнитного меридиана?
5. Чему равна напряженность магнитного поля в центре кругового тока?

2.4. Изучение намагничивания ферромагнетика

Цель работы – наблюдение петель гистерезиса; измерение зависимости намагниченности и относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля; оценка остаточной намагниченности и коэрцитивной силы.

2.4.1. Введение

Магнетиками называются вещества, способные намагничиваться под действием внешнего магнитного поля. Намагниченное вещество создает магнитное поле \vec{B}' , которое накладывается на

внешнее поле \vec{B}_0 (поле, созданное макроскопическими токами). Оба поля в сумме дают результирующее поле $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$.

Степень намагничивания магнетика характеризуется магнитным моментом единицы объема. Эта величина называется намагниченностью и определяется выражением:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_m, \quad (1)$$

где \vec{p}_m – магнитный момент молекул; суммирование распространяется на все молекулы в физически бесконечно малом объеме ΔV . В магнетиках закон полного тока для магнитного поля принимает вид

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I + I_{\text{мол}}), \quad (2)$$

где I – алгебраическая сумма макроскопических токов, сцепленных с контуром L ,

$I_{\text{мол}}$ – молекулярный ток, сцепленный с контуром и обусловленный движением электронов в молекулах вещества (гипотеза Ампера).

Молекулярный ток определяет намагниченность магнетика, причем циркуляция вектора намагниченности равна алгебраической сумме сцепленных с контуром молекулярных токов

$$\oint_L \vec{J} d\vec{l} = I_{\text{мол}}. \quad (3)$$

С учетом (3) закон полного тока (2) можно представить в виде:

$$\oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \right) d\vec{l} = I. \quad (4)$$

Физическая величина, стоящая под знаком интеграла в выражении (4), определяется только макроскопическими токами и называется напряженностью магнитного поля:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}. \quad (5)$$

Отсюда магнитная индукция в магнетике:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}). \quad (6)$$

В изотропных магнетиках намагниченность \vec{J} совпадает по направлению с напряженностью магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (7)$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества (может зависеть от напряженности магнитного поля).

С учетом (7) выражение (6) можно записать в виде:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (8)$$

где $\mu = 1 + \chi$ – магнитная проницаемость.

В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости все магнетики подразделяются на диа-, пара- и ферромагнетики. У диамагнетиков χ отрицательна и мала по абсолютной величине (порядка 10^{-5}). У парамагнетиков χ положительна, но тоже невелика (порядка 10^{-3}). У ферромагнетиков положительна и может достигать очень больших значений (порядка 10^5). Кроме того, в отличие от диа- и парамагнетиков, для которых χ не зависит от напряженности магнитного поля, магнитная восприимчивость ферромагнетиков является функцией H .

При намагничивании ферромагнетиков имеет место магнитный гистерезис (зависимость намагниченности от предшествующего состояния). При циклических изменениях величины и направления напряженности внешнего магнитного поля эта зависимость характеризуется кривой, называемой петлей гистерезиса (рис. 23).

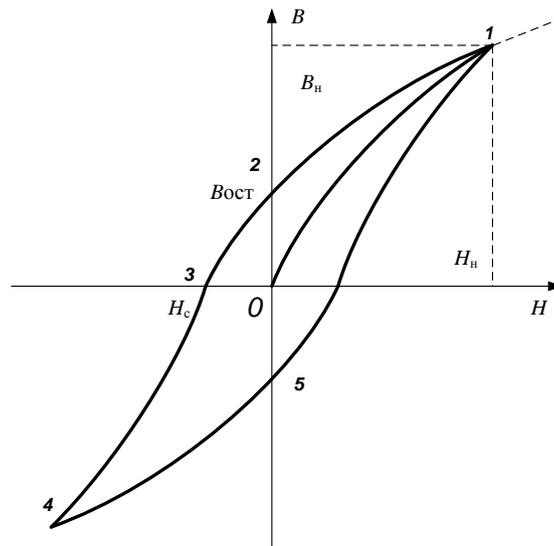


Рис. 23. Кривая намагничивания ферромагнетика

Для ферромагнетиков характерна существенно нелинейная зависимость намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля и большое значение магнитной проницаемости μ (десятки и сотни тысяч). В сильных полях наступает магнитное насыщение, и намагниченность не зависит от напряженности поля.

Если ферромагнетик был первоначально размагничен ($H = 0, B = 0$), то его намагничивание происходит по основной кривой намагничивания 0-1. В точке 1 напряженность H_H и магнитная индукция B_H соответствуют состоянию магнитного насыщения. Размагничивание происходит по кривой (1-2-3-4). При $H = 0$ намагниченность ферромагнетика не исчезает и характеризуется величиной, которая называется остаточной магнитной индукцией. Значение напряженности H_c , при которой магнитная индукция обращается в нуль, называется коэрцитивной силой.

Под действием переменного магнитного поля магнитная индукция изменяется по кривой 1—2—3—4—5—1. Эта кривая называется *предельной петлей гистерезиса*. Петли гистерезиса, лежащие внутри этой кривой, называются *частными циклами*.

Магнитная проницаемость μ (а следовательно, и магнитная восприимчивость χ) ферромагнетика зависит от напряженности магнитного поля H . При намагничивании ферромагнетика магнитная проницаемость $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$ сначала резко возрастает с

увеличением напряженности магнитного поля, достигает максимального значения (несколько раньше, чем наступает насыщение ферромагнетика) и стремится к единице при $H \rightarrow \infty$.

2.4.2 Описание экспериментальной установки

Для исследования намагничивания ферромагнетика используется установка, схема которой приведена на рис. 24. Суть эксперимента заключается в независимом определении напряженности магнитного поля в ферромагнетике с помощью закона полного тока и определении магнитной индукции в ферромагнетике на основе использования закона электромагнитной индукции.

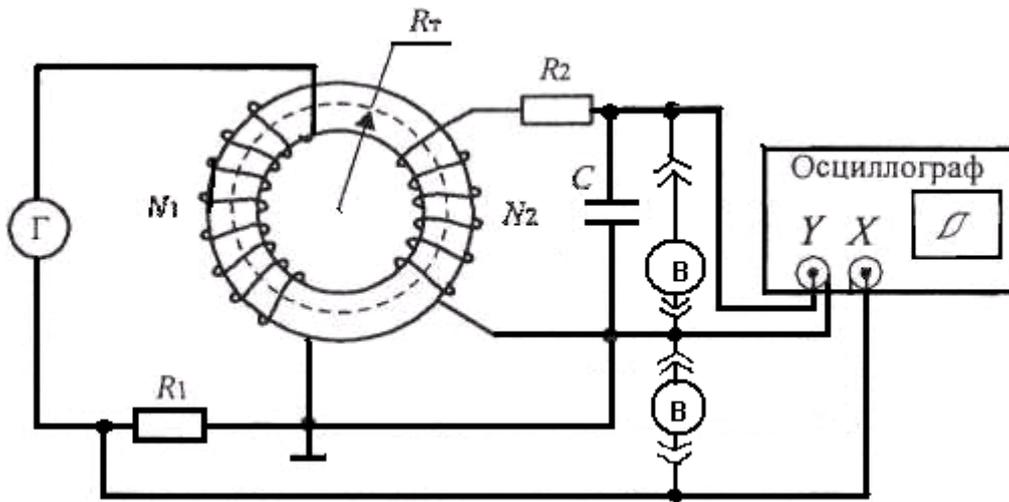


Рис. 24. Схема экспериментальной установки

Исследуемый образец представляет собой тороид с площадью поперечного сечения S и радиусом осевой линии R_T . На образец намотана первичная обмотка, создающая магнитное поле в ферромагнетике и содержащая N_1 витков, и вторичная (измерительная) обмотка, содержащая N_2 витков. Напряжение на первичную обмотку подается с выхода низкочастотного генератора G через резистор R_1 . Напряженность магнитного поля в образце может быть определена из закона полного тока следующим образом:

$$H = \frac{I_1 N_1}{2\pi R_T}, \quad (6)$$

где R_T – радиус осевой линии тороида.

Магнитную индукцию в исследуемом образце удобно определять с помощью ЭДС электромагнитной индукции, возникающей при изменении магнитного потока в измерительной катушке:

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

где $\Phi = SN_2 B$ – магнитный поток через измерительную обмотку, плотно охватывающую образец.

Подставляя значение магнитного потока в (7), после интегрирования найдем:

$$B = -\frac{1}{SN_2} \int \varepsilon dt. \quad (8)$$

Таким образом, для определения B нужно проинтегрировать сигнал, наведенный в измерительной обмотке изменяющимся магнитным полем.

Для интегрирования сигнала применяется цепочка, состоящая из резистора R_2 и конденсатора C . Цепочка RC выполняет функцию интегрирования, если $\varepsilon \gg U_c$. При выполнении этого условия сила тока в измерительной обмотке $I_2 \sim \varepsilon/R_2$ и:

$$U_c = \frac{q}{C} = -\frac{1}{C} \int I_2 dt = -\frac{1}{CR_2} \int \varepsilon dt. \quad (9)$$

Из (8) с учетом (9) получим выражение для магнитной индукции:

$$B = \frac{U_c R_2 C}{SN_2}. \quad (10)$$

Для наблюдения петель гистерезиса используется электронный осциллограф, на горизонтальные пластины которого подается напряжение с резистора R_1 (пропорциональное напряженности магнитного поля в образце), а на вертикальные – с конденсатора C (пропорциональное магнитной индукции).

Количественное измерение эффективных значений напряжений $U_{\text{эф}}$ производится вольтметром. Амплитудные значения, необходимые для расчетов по формулам (6), (10), равны

$$I_1 = 1,4 \cdot U_{\text{эф}R_1} / R_1 \quad \text{и} \quad U_c = 1,4 \cdot U_{\text{эф}C}.$$

2.4.3 Порядок выполнения работы

1. Проверьте соответствие соединения приборов принципиальной схеме установки.

2. Включите генератор, осциллограф и измерительные приборы.

3. Установите частоту генератора 1 кГц.

4. Регулируя выходное напряжение генератора, получите на экране осциллографа устойчивое изображение предельной петли гистерезиса.

5. С помощью вольтметра измерьте напряжения $U_{\text{эф}R_1}$ на резисторе R_1 и $U_{\text{эф}C}$ на конденсаторе C . Результаты измерений запишите в табл.1.

6. Перенесите на кальку изображение предельной петли гистерезиса. Оцените из графика напряжения U_y и U_x , соответствующие значениям остаточной магнитной индукции $B_{ост}$ и коэрцитивной силы H_c .

Таблица 1

Параметр	Значение	Единица измерения
S	0,000036	m^2
C	0,47	мкФ
N_1	100	ВИТКОВ
N_2	200	ВИТКОВ
R_1	100	Ом
R_2	24	КОм

Таблица 2

№	$U_{эфR1}, B$	$U_{эфC}, B$	I_1, A	$U_{C,,} B$	$H, A/m$	$B, Tл$	$M, A/m$	m

$$U_y =$$

$$U_x =$$

2.4.4 Обработка результатов измерений

1. По формулам (6), (10), (4) и (5) рассчитайте напряженность магнитного поля H , магнитную индукцию B , намагниченность J и магнитную проницаемость μ . Результаты запишите в таблицу 2.

2. Рассчитайте остаточную магнитную индукцию и коэрцитивную силу.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «намагниченность».
2. Напишите выражение, связывающее магнитную индукцию, намагниченность и напряженность магнитного поля.
3. Как по графику зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля найти значение намагниченности при насыщении ферромагнетика?

4. Каков характер зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля в ферромагнетике? Что такое магнитный гистерезис?

5. Каков характер зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля в ферромагнетике? Что означает насыщение ферромагнетика?

6. Как характеризуют магнетик остаточная магнитная индукция и коэрцитивная сила?

7. Каков характер зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в ферромагнетиках.

Литература

Трофимова Т.А. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2004. .

Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Высшая школа, 1998, т. II.

3. Электромагнитные колебания

3.1 Изучение простейших линейных цепей переменного тока

Цель работы: определение коэффициента передачи и фазового сдвига силы тока относительно входного напряжения в зависимости от частоты.

3.3.1 Общие сведения о линейных цепях переменного тока

Электрическая цепь переменного тока представляет собой ряд соединенных между собой в той или иной последовательности элементов, в которых протекают токи под действием одного или нескольких источников ЭДС (изменяющихся со временем, как правило, по гармоническому закону:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t + \alpha).$$

Источники ЭДС являются активными элементами цепи; к пассивным элементам относятся резистор, конденсатор, катушка индуктивности. В установившемся режиме силы тока и напряжения на всех участках цепи под воздействием гармонической ЭДС изменяются также по гармоническому закону.

При теоретическом анализе цепей реальные элементы заменяются идеализированными: активным ем R , емкостью C и индуктивностью L ; они представлены на принципиальной электрической схеме. Например, активным сопротивлением называется идеализированный резистор, полностью (и необратимо) преобразующий энергию проводника в тепло. Аналогично определяется емкость и индуктивность (энергия источника преобразуется в энергию электрического и магнитного полей соответственно, причем это преобразование является обратимым – вследствие чего данные элементы называются **реактивными**).

Каждый элемент цепи (и цепь в целом) характеризуется своим сопротивлением: активным R , реактивным X (емкостным X_C или индуктивным X_L), а также полным Z . Любое из них представля-

ет собой отношение **амплитудных** значений соответствующих напряжений U_0 и сил токов I_0 (относятся к данному элементу или ко всей цепи):

$$R = \frac{U_{0R}}{I_0} \quad X_C = \frac{U_{0C}}{I_0} \quad X_L = \frac{U_{0L}}{I_0} \quad Z = \frac{\varepsilon_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Цепь называется линейной, если значения величин всех ее элементов (R, C, L) постоянны и не зависят от значений силы тока и напряжения (то же можно сказать и о сопротивлениях элементов). В линейной цепи имеет место прямая пропорциональная зависимость тока от напряжения (т.е. выполняется закон Ома). В противном случае цепь называется нелинейной.

Главной отличительной особенностью цепей переменного тока (по сравнению с цепями постоянного тока) является наличие **фазовых сдвигов** между током и напряжением (как на каждом элементе, так и во всей цепи в целом). Свойства элементов цепи в этом аспекте представлены в таблице 1.

Таблица 1

$$U = U_0 \cos \omega t$$

$$i = I_0 \cos(\omega t + \Delta \varphi)$$

	Цепь содержит:	Фазовый сдвиг силы $\Delta \varphi$	Сопротивление
1	ТОЛЬКО активное сопротивление R	0	R
2	ТОЛЬКО емкость C	$-\frac{\pi}{2}$ ток опережает	$X_C = 1 / \omega C$
3	ТОЛЬКО индуктивность L	$+\frac{\pi}{2}$ ток отстает	$X_L = \omega L$

$\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота.

В структурном отношении электрические цепи подразделяются на двухполюсники и четырехполюсники. Двухполюсником называется выделенная часть цепи, имеющая электрический контакт с остальными элементами цепи (не включенными в эту выделенную часть) в двух точках (называемых полюсами).

Соответственно четырехполюсник имеет две пары полюсов – вход и выход (рис. 25).

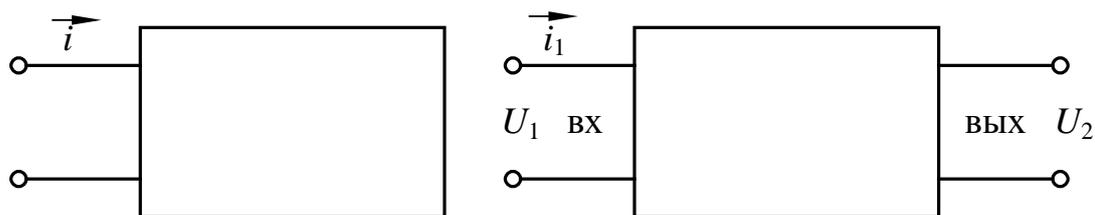


Рис. 25

Свойства двухполюсника характеризуется его входным сопротивлением (а более полно – входной вольтамперной характеристикой $i = f(U)$). Основным параметром четырехполюсника является его коэффициент передачи по напряжению, представляющий собой отношение амплитуд выходного и входного напряжений:

$$K = \frac{U_{02}}{U_{01}} = f(v)$$

Если в состав четырехполюсника входят реактивные элементы, сопротивление которых зависит от частоты, то коэффициент передачи также зависит от частоты; эта зависимость называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

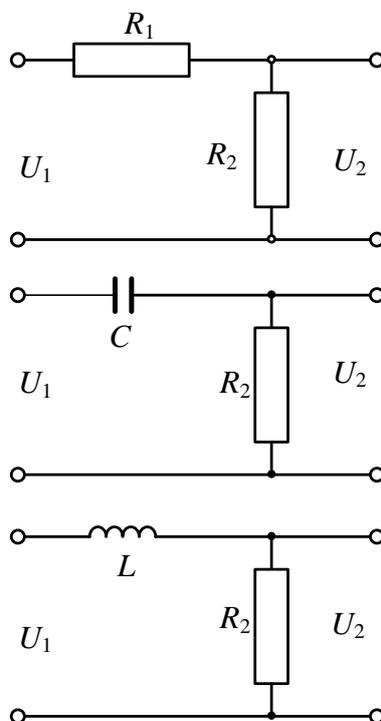


Рис. 26

В данной лабораторной работе изучаются простейшие линейные четырехполюсники, представляющие собой последовательное соединение двух элементов (рис. 26).

Входное напряжение U_1 , подается на оба элемента (т.е. является общим); выходное U_2 снимается с одного из них – а именно во всех трех случаях выходным является напряжение на активном сопротивлении R_2 .

Для каждого четырехполюсника должны быть определены:

а) АХЧ. $K = f(\nu)$, т.е. зависимость коэффициента передачи от частоты входного напряжения.

$$K(\nu) = \frac{U_{02}}{U_{01}} = \frac{I_0 \cdot R_2}{I_0 \cdot \sqrt{(R_2)^2 + X^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (X/R)^2}}, \quad (1)$$

где, I_0 , U_{01} , U_{02} – амплитуда силы тока входного и выходного напряжений соответственно;

X – сопротивление реактивного элемента цепи, т.е. емкости или индуктивности ($X = X_C = 1/\omega C$ или $X = X_L = \omega L$);

б) фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ силы тока относительно входного напряжения, который определяется формулой:

$$|\Delta\varphi(\nu)| = \arccos\left(\frac{R_2}{Z}\right), \quad \cos(|\Delta\varphi(\nu)|) = \frac{R_2}{\sqrt{(R_2)^2 + X^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (X/R_2)^2}}. \quad (2)$$

Предельные значения (при $\nu \rightarrow 0$ или $\nu \rightarrow \infty$) коэффициента передачи и фазового сдвига, как это следует из формул 1, 2, определяется предельным значением реактивного сопротивления X :

при $X \rightarrow 0$ $K \rightarrow 1$, $\cos|\Delta\varphi| \rightarrow 1$, $\Delta\varphi \rightarrow 0$;

при $X \rightarrow \infty$ $K \rightarrow 0$, $\cos|\Delta\varphi| \rightarrow 0$, $\Delta\varphi \rightarrow \pi/2$.

Физически это объясняется тем, что при предельных значениях частоты сопротивление одного из элементов цепи становится пренебрежимо малым по сравнению с сопротивлением другого. Таким образом, для данных четырехполюсников:

$$0 \leq K \leq 1 \quad (\text{т.е. } 0 \leq U_{02} \leq U_{01})$$

$$0 \leq |\Delta\varphi| \leq 90^\circ.$$

В цепи с емкостью $\Delta\varphi > 0$ в цепи с индуктивностью $\Delta\varphi < 0$.

На рисунке 27 представлена упрощенная блок-схема лабораторной установки (источник питания не показан), которая содержит:

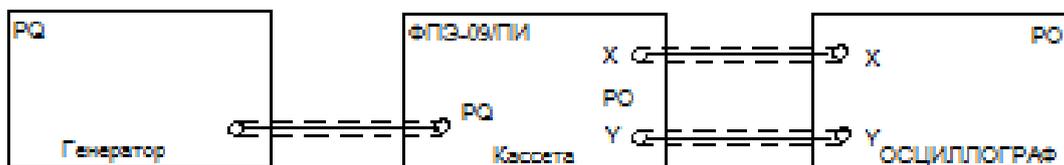


Рис. 27

– кассету ФПЭ-09/ПИ, в которой собраны изучаемые цепи (переключения одного из элементов в которых осуществляются нажатием кнопки), а также коммуникатор, позволяющий на экране однолучевого осциллографа наблюдать одновременно два синусоидальных напряжения (входное и выходное);

– генератор PQ, являющийся источником гармонически изменяющейся ЭДС, частота, которой может перестраиваться в широких пределах;

– осциллограф PO, служащий для измерения амплитуд входного и выходного напряжений, периода колебаний и временного сдвига выходного напряжения относительно входного.

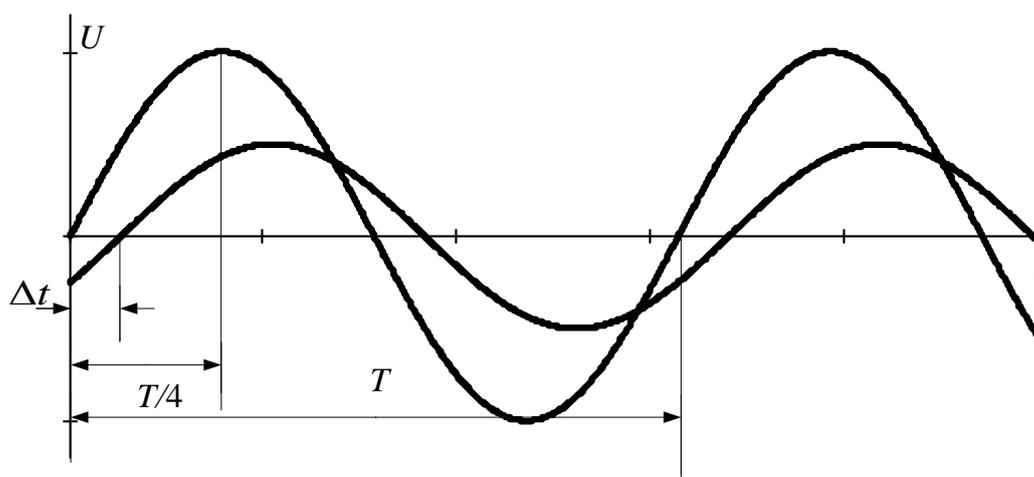


Рис.28

Все измерения в работе выполняются с помощью осциллографа, на экране которого представлены осциллограммы входного и выходного синусоидальных напряжений (рис. 28).

Непосредственно измеряются (при каждом значении частоты ν):

- амплитуда входного напряжения U_{01} ;
- амплитуда выходного напряжения U_{02} (обе – в делениях вертикальной шкалы экрана осциллографа);
- сдвиг по времени Δt выходного напряжения относительно входного (количество делений шкалы развертки времени, укладываемых в интервале между максимальными значениями этих напряжений);
- период T колебаний этих напряжений (также в делениях шкалы осциллографа).

Фазовый сдвиг выходного напряжения относительно входного находится по формуле: $\Delta\varphi = 360^\circ \cdot \Delta t / T$, т.к. выходным напряжением во всех исследуемых четырехполюсниках является напряжение на активном сопротивлении, пропорциональное силе тока ($U_2 = i_2 \cdot R_2$), искомый фазовый сдвиг тока совпадает с найденным фазовым сдвигом выходного напряжения (оба – относительно входного напряжения).

Интервал значения частоты, в котором проводят измерения, выбирают самостоятельно таким образом, чтобы значения коэффициента передачи при крайних значениях частот были близки к предельным (например, равны 0,1 и 0,9 – чему соответствуют значения амплитуды выходного напряжения U_{02} , равные $0,1U_{01}$ и $0,9U_{01}$).

Внутри этого интервала следует провести измерения еще при трех значениях частоты, выбираемых так, чтобы отличие значений коэффициента передачи при соседних значениях частоты составляло не менее $0,2 \div 0,025$.

Данные измерения и вычислений заносятся в таблицу:

Таблица

ν кГц	U_{01}			U_{02}			K	$ \Delta t $ [дел]	T [дел]	$ \Delta\varphi $ [град]
	U_{01} [дел]	K_y [В/дел]	U_{01} [В]	U_{02} [дел]	K_y [В/дел]	U_{02} [В]				

Примечание: для каждой из цепей с реактивными элементами (RC и RL) таблица заполняется в отдельности.

Результаты работы представляются в виде графиков

$$K = f(\nu) \text{ и } \Delta\varphi = f(\nu).$$

Контрольные вопросы

1. Напишите выражение для емкостного сопротивления, для индуктивного сопротивления. Какова их зависимость от частоты?

2. В чем суть метода векторных диаграмм?

Постройте векторную диаграмму для цепи, содержащей последовательно соединенные: а) R и C ; б) R и L .

3. Определить с помощью векторной диаграммы для RC и LC цепи полное сопротивление Z и сдвиг фаз между токами и напряжением.

4. Получите выражение для коэффициентов передачи цепей, состоящих из: а) R и L ; б) R и C .

5. Каков характер коэффициента передачи цепей RC и RL в зависимости от частоты?

Каковы предельные значения коэффициента передачи на низких и высоких частотах?

6. Каковы предельные значения фазового сдвига при низшей и наивысшей частотах в цепях RC и RL ?

7. С помощью какого электронного прибора выполняются измерения в данной работе? Что именно измеряется непосредственно?

8. Какой считается сдвиг по времени выходного напряжения относительно входного?

9. Какие величины должны быть определены по данным измерений и как именно?

3.2 Линейные избирательные цепи

Цель работы: определение параметров последовательного резонансного контура: резонансной частоты, полосы пропускания, добротности.

3.2.1. Введение

Линейной избирательной цепью переменного тока является четырехполюсник, содержащий реактивные элементы, коэффи-

циент передачи которого определенным образом зависит от частоты. Такие четырехполюсники, предназначенные для передачи с входа на выход колебаний одних частот и значительного ослабления колебаний других частот, называются электрическими фильтрами.

По виду АЧХ различают:

– **полосовые фильтры**, пропускающие колебания, частота которых лежит в интервале $\nu_1 \div \nu_2$ (и не пропускающие колебаний других частот); АЧХ идеального полосового фильтра, очевидно, должна была бы иметь прямоугольную форму (рис. 29) – что реально неосуществимо; фильтр характеризуется абсолютной шириной полосы пропускания $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1/2$ и значением центральной частоты полосы $\nu_{ц} = (\nu_1 + \nu_2)/2$;

– **заграждающие фильтры**, не пропускающие колебания в пределах полосы заграждения шириной $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$;

– **фильтры низких частот**, пропускающие колебания, частота которых лежит в интервале от 0 до некоторой граничной частоты $\nu_{гр}$; **фильтры высших частот**, пропускающие колебания, частота которых выше граничной.

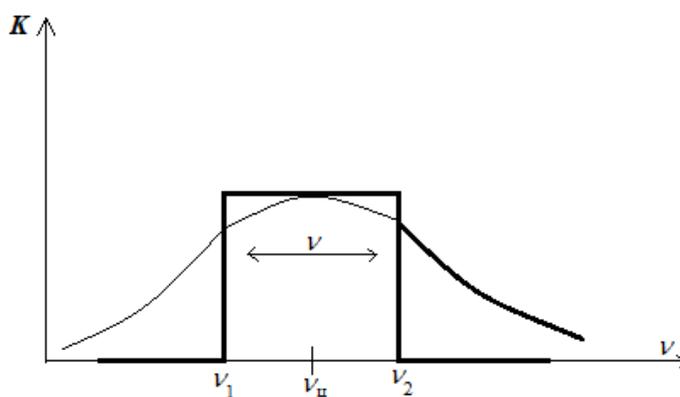


Рис. 29

Зависимость коэффициента передачи от частоты $K(\nu)$ называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

Коэффициент передачи $K = U_{02} / U_{01}$ – отношение выходного и входного напряжений.

Простейшим полосовым фильтром является последовательный резонансный контур, изображенный на рис. 30а, в виде четырехполюсника: приложенная к контуру ЭДС рассматривается

как входное напряжение U_1 ; выходным напряжением U_2 является напряжение на емкости.

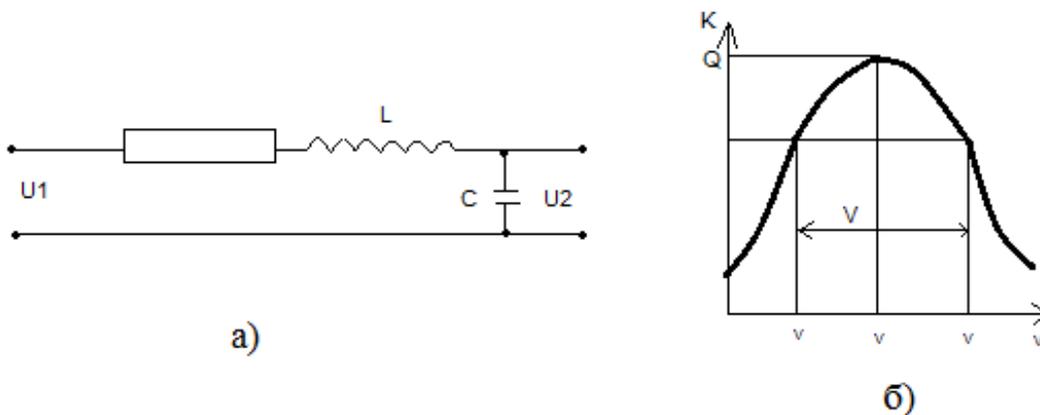


Рис. 30

АЧХ такого четырехполюсника совпадает по виду частотной зависимости с резонансной кривой напряжения на емкости:

$$K(\nu) = \frac{U_{02}}{U_{01}} = \frac{U_{0C}}{U_{01}} = \frac{X_C \cdot I_0}{Z \cdot I_0} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{1}{\omega C R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}}$$

где, $X = X_L - X_C$ – полное реактивное сопротивление контура, обращающееся в нуль при резонансной частоте.

$$\text{Поэтому, } K(\nu_P) = 1 / \omega_P C R = \sqrt{\frac{L}{C}} / R = \rho / R = Q$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – волновое сопротивление контура, а Q – добротность контура (величина, обычно много больше единицы), являющаяся его важнейшим параметром, характеризующим количественное свойство частотной избирательности.

На рисунке 30б приведена АЧХ последовательного контура, построена в соответствии с приведенной формулой для $K(\nu)$. Откуда видно, что амплитуда напряжения, частота которого равно резонансной, возрастает на выходе Q раз по сравнению с амплитудой на входе – в то время как при других значениях частоты амплитуда возрастает в меньшее число раз (или уменьшается). В этом по существу и состоит свойство частотной избирательности; причем в реальной цепи (в отличие от идеального

полосного фильтра) с входа на выход передаются колебания всех частот, но в разной мере.

За полосу пропускания по уровню половинной мощности условно принимается интервал частот, в пределах которого коэффициент передачи по напряжению уменьшается не более, чем в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с его максимальным значением при резонансной частоте (являющейся в данном случае центральной частотой полосы пропускания).

Абсолютной шириной полосы пропускания $\Delta\nu$ является разностью граничных частот этого интервала: $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$.

Количественной мерой избирательности является, однако, не абсолютная, а относительная ширина полосы пропускания:

$$h = \frac{\Delta\nu}{\nu_p}$$

Чем меньше h – тем уже и острее кривая АЧХ.

Как показывает анализ формулы для $K(\nu)$ относительная полоса пропускного обратно пропорциональна добротности контура:

$$h = \frac{1}{Q}$$

Полосные фильтры применяются в радиоэлектронных устройствах для выделения нужного сигнала из смеси мешающих сигналов, отличающихся от него значением несущей частоты ν_H

В частности, перестраиваемый резонансный контур является входным устройством любого приемника, с помощью которого производится настройка на некоторую станцию; для этого резонансная частота контура должна быть сделана равной несущей частоте этой станции:

$$\nu_p = \nu_H$$

Добротность контура должна быть такой, чтобы спектр модулированного сигнала укладывался в полосу пропускания контура, т.е. $\Delta\nu = \Delta\nu_c$

где, $\Delta\nu_c$ – ширина спектра модулированного сигнала

В данной лабораторной работе определение параметров последовательного резонансного контура (резонансной частоты ν_p , абсолютной ширины полосы пропускания $\Delta\nu$, относительной ширины полосы пропускания h , добротности Q) производится с

помощью резонансной кривой силы тока. Для выполнения измерений используется электронный осциллограф, на экране которого наблюдается осциллограмма силы тока в контуре – для чего на вход Y осциллографа подается напряжение со специально включенного в контур измерительного активного сопротивления R_1 .

Центральным узлом лабораторного стенда является кассета ФПЭ-11/10, в которой смонтированы катушка индуктивности контура ($L = 100\text{мГн}$) и измерительный резистор R_1 ; на передней панели кассеты имеются гнезда для переключения:

- конденсатора C и резистора R контура, смонтированных в отдельных кассетах МС (магазин сопротивлений) и МЕ (магазин емкостей);
- генератора PQ гармонической ЭДС звуковых частот (подаваемой на контур);
- осциллографа РО (гнездо Y , соединенное с измерительным резистором R_1 , подключается к входу Y ; гнездо X , подключаемое к входу X , служит для подачи на осциллограф напряжения синхронизации от генератора PQ).

Схема описанных соединений представлена на рис. 31.

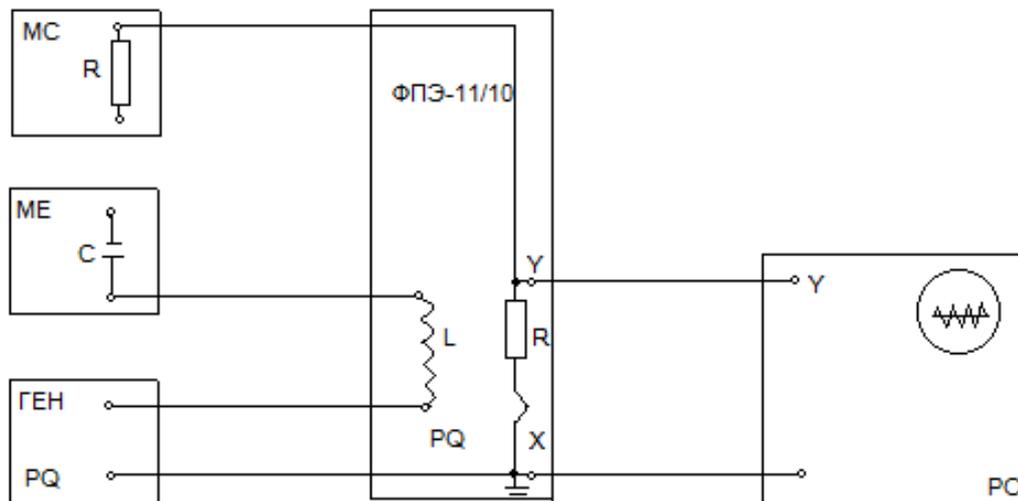


Рис. 31

Измерения и расчеты выполняются в следующем порядке:

1. Установить переключателями магазинов МЕ и МС значения емкости и активного сопротивления контура $C = 10^{-3}$ мкФ и $R = 0$ Ом; рассчитать значение резонансной частоты по формуле:

$$\nu_p = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$$

Получить на экране осциллографа изображение гармонического напряжения на измерительном активном сопротивлении R_1 , изменяя его частоту ручкой перестройки генератора, определить значение резонансной частоты ν_p и сравнить с ранее вычисленным.

2. Для определения абсолютной ширины полосы пропускания:

а) снять резонансную кривую силы тока $I_0 = f(\nu)$; данные измерений занести в таблицу:

ν , кГц									
U_{01} , В									
I_0 , мА									
β									

где U_{01} , –амплитуда напряжения на измерительном активном сопротивлении R_1 .

б) рассчитать для каждого значения частоты (включая резонансную) амплитудное значение силы тока в контуре, а также величину $\beta = (I_0 / I_{OP})^2$ квадрата относительной силы тока и построить график $\beta(\nu)$;

в) проведя на этом графике прямую $\beta = 0.5$ спроектировать точки ее пересечения с кривой $\beta(\nu)$; на ось частот и найти значения граничных частот полосы пропускания ν_1 и ν_2 .

3. Далее по формулам, приведенным ранее, найти

- абсолютную ширину полосы пропускания;
- относительную ширину полосы пропускания;
- добротность контура.

4. Все вышеописанные измерения и вычисления выполнить, установив другое значение емкости контура C (при том же значении активного сопротивления $R = 0$); а затем – при одном из значений емкости C и другом значении сопротивления R (порядка 100-200 Ом).

Контрольные вопросы:

1. Нарисуйте схему последовательного резонансного контура.
2. Что такое добротность контура, от чего она зависит.
3. Нарисуйте простейшую схему фильтра низких частот.
4. Нарисуйте простейшую схему фильтра высоких частот.

3.3 Изучение релаксационных колебаний

Цель работы: снятие вольтамперной характеристики неоновой лампы и изучение релаксационных колебаний (измерение периода T).

Приборы и принадлежности: неоновая лампа, набор сопротивлений, набор емкостей, осциллограф, звуковой генератор, источник питания, миллиамперметр.

3.3.1. Введение

Релаксационными называются колебания, резко отличающиеся по форме от гармонических, т.е. представляющие собой периодическую последовательность импульсов различной формы (прямоугольной, пилообразной и т.п.). Их генерация основана на использовании переходных процессов в линейных цепях, содержащих реактивные элементы, и свойствах электронных приборов, работающих в ключевом режиме. В данной лабораторной работе в качестве такого используются газонаполненная (неоновая) лампа – двухэлектродный электровакуумный прибор, рабочей средой которого является разреженный газ.

1. Электропроводимость газа обусловлена ионизацией, т.е. расщеплением электрически нейтральных атомов и молекул на положительные и отрицательные ионы (обычно – на одновалентный положительный ион и электрон), которые под действием приложенного к электродам напряжения движутся в противоположных направлениях. Если постоянная концентрация ионов поддерживается только благодаря действию внешних ионизирующих факторов (космического, радиоактивного или рентгеновского излучения, сильного нагрева) протекания тока носит название несамостоятельного газового разряда (который тут же прекращается по прекращении действия ионизирующего фактора).

Электрический разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, называется **самостоятельным**. Для его осуществления необходимо, чтобы в процессе самого разряда в газе непрерывно образовывались ионы; это имеет место при достаточно большом напряжении на электродах, когда ускоряемые им ионы и электроны имеют достаточную энергию для расщепления (при столкновении) молекулы газа. Возникающий

при некотором значении напряжения U_3 (напряжение зажигания) самостоятельный разряд сохраняется и при более низком напряжении (вплоть до значения U_1 – напряжение гашения).

Идеализированная вольтамперная характеристики неоновой лампы представлена на рис. 32. При $U < U_3$ сила тока пренебрежимо мала. При $U = U_3$ она скачкообразно возрастает, и при дальнейшем увеличении напряжения возрастает приблизительно линейно. При обратном изменении напряжения до $U_1 < U_3$ сила тока убывает также приблизительно линейно, а при $U = U_1$, (рис. 32) скачком падает до нуля.

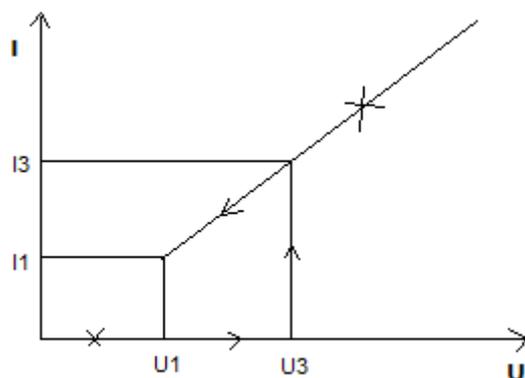


Рис. 32

2. Принципиальная схема генератора релаксационных колебаний приведена на рисунке 33.

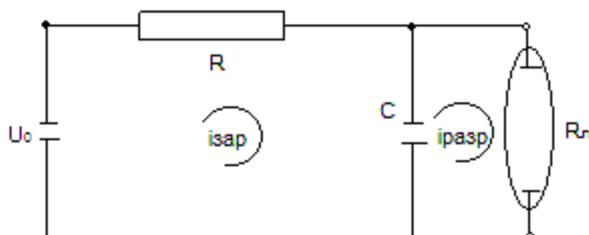


Рис. 33

Он представляет собой последовательно соединенные активное сопротивление и емкость, параллельно которой включена неоновая лампа. В непроводящем состоянии ее сопротивление бесконечно велико, и емкость заряжается через сопротивление до напряжения, равного U_3 . При $U_c = U_3$ лампа зажигается, ее сопротивление в проводящем состоянии R_L становится пренебрежимо малым по сравнению с R , и емкость быстро разряжается до напряжения $U_c = U_1$. Далее процесс заряда и разряда периодиче-

ски повторяются (рис.34). Период колебания, очевидно, вен, т.к. длительность процессов заряда $t_{зар}$ и разряда $t_{разр}$ пропорционально постоянным времени τ цепей заряда и разряда соответственно ($\tau_{зар} = RC$, $\tau_{разр} = RLC$, $\tau_{зар} \ll \tau_{разр}$), можно считать:

$$T \approx t_{зар} \approx \tau_{зар} \approx RC$$

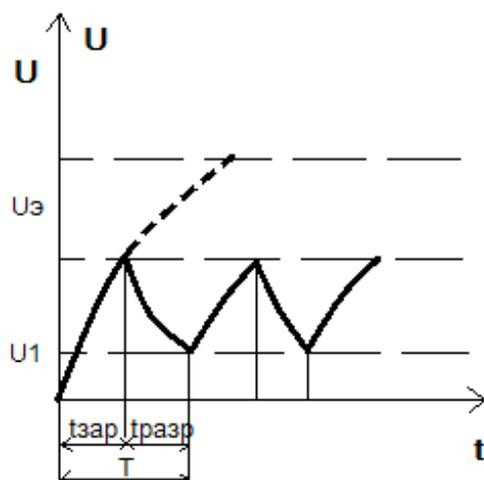


Рис. 34

3.3.2 Выполнение работы

1. Схема лабораторной установки предоставлена на (рис. 35).

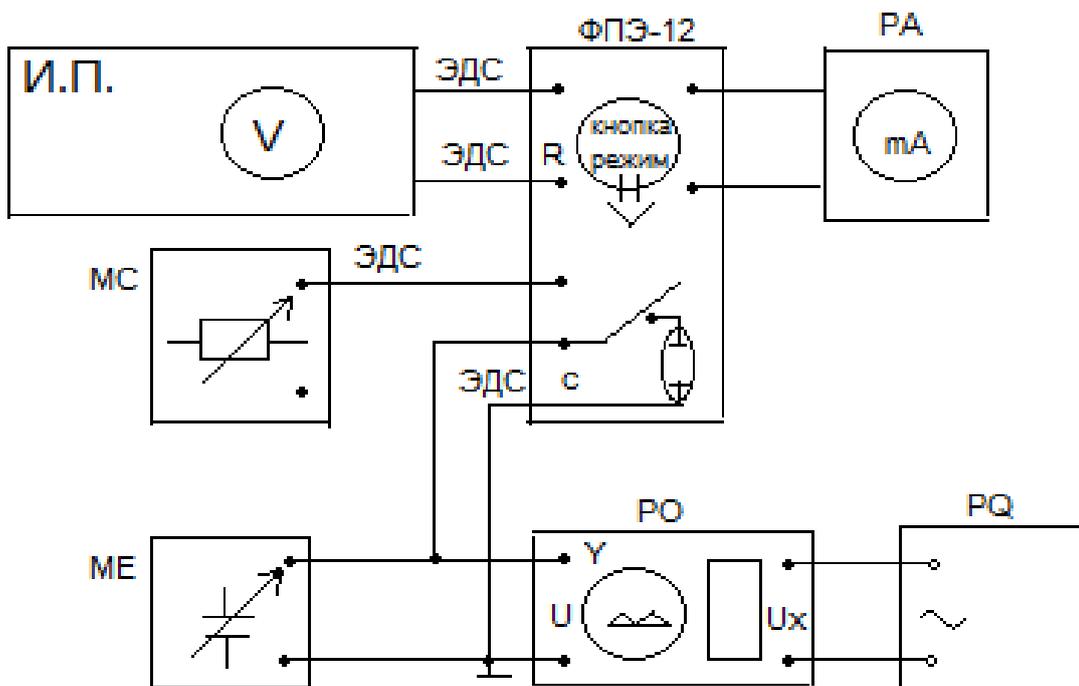


Рис. 35

В ее состав входит источник питания ИП (источник постоянной ЭДС), магазина сопротивлений и емкости МС и МЕ, осциллограф РО, генератор гармонического напряжения РQ, миллиамперметр РА и кассета ФПЭ-12, в которой находится неоновая лампа, и выполнены необходимые соединения составных частей установки как для снятия вольтамперной характеристики (эти соединения на схеме не показаны), так и для получения и изучения релаксационных колебаний.

2. Снятие вольтамперной характеристики неоновой лампы производится при отжатой кнопке РЕЖИМ на панели кассеты.

а) меняя ручкой регулирования ИП напряжение на электродах лампы (в пределах 0-11 В, через 10 В), измерить значение силы тока I сперва при увеличении напряжения, а затем при его уменьшении.

Данные занести в таблицу:

U_0 [В]											
$I_{\text{пря}}$ [мА]											
$I_{\text{обр}}$ [мА]											

б) для более точного определения напряжений U_z и гашения U_r , выполнить повторные измерения с шагом 1-2 В в интервалах, включающих это значение; зафиксировать также соответствующие значения силы тока I_z и I_r ;

в) результаты измерений предоставить в виде графика.

3. При нажатой кнопке РЕЖИМ реализуется схема релаксационного генератора, совпадающая с изображением на (рис. 33).

Требуется измерить период колебаний и их амплитуду (используя C_U вертикальной шкалы экрана осциллографа).

Определить периода T с помощью осциллограммы релаксационных колебаний, поступающих на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ осциллографа через вход Y. Длительность измеряемого интервала (в данном случае T) определяется по рас-

стоянию l на экране между точками на начала и конца интервала (см. рисунок 34):

$$T = l \cdot C_T \text{ [мс/мм]},$$

где, C_T – цена деления шкалы развертки времени (может изменяться ручкой переключения длительности развертки).

Измерения периода выполнить при значениях $R = 10^6 \text{ Ом}$, $C = 10^{-3} \text{ мкФ}$, затем повторить при другом значении емкости и сравнить с результатом расчета.

Контрольные вопросы

1. Какие колебания называются релаксационными?
2. Что такое несамостоятельный и самостоятельный газовый разряд?
3. Какой механизм возникновения самостоятельного разряда?
4. Нарисуйте вольтамперную характеристику газонаполненной лампы и объясните ее ход?
5. Нарисуйте принципиальную схему релаксационного генератора. Как работает генератор релаксационных колебаний? (Покажите цепь, по которой течет ток во время заряда конденсатора и во время его разряда).

4. Электротехника и основы электроники

4.1 Однофазные выпрямительные устройства

4.1.1 Введение

Однофазные выпрямительные устройства предназначены для преобразования переменного напряжения в постоянное и служат источниками электропитания всех остальных электронных устройств.

1. Однофазное выпрямительное устройство может содержать (рис. 36):

- трансформатор,
- собственно выпрямитель,
- сглаживающий фильтр,
- стабилизатор выпрямительного напряжения.

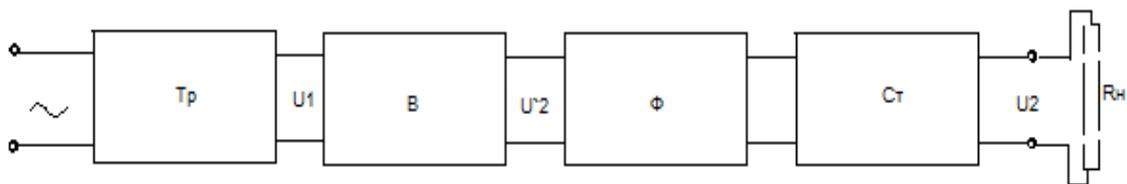


Рис. 36

Электронные устройства, подключенные к источнику питания, представлены на (рис. 36) эквивалентным нагрузочным сопротивлением R_H .

1.1. Трансформатор преобразует входное переменное напряжение (220 В 50 Гц) в выходное напряжение U_1 .

1.2. Выпрямитель преобразует входное периодическое напряжение (U_1) в однополярное периодическое напряжение (рис. 39а), содержащее постоянную составляющую (иначе называемую средним значением выпрямленного напряжения).

Основной величиной, характеризующей работу выпрямителя, является коэффициент пульсаций, представляющий собой отношение амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения к его постоянной составляющей:

$$P = \frac{U_0 \text{ осн.гарм.}}{U_2}$$

(основной гармоникой называется та часть переменной составляющей выпрямленного напряжения, которая имеет наименьшую частоту и наибольшую амплитуду).

Выпрямитель состоит из одного или нескольких вентилях – электронных приборов, обладающей односторонней проводимостью.

Наиболее часто вентилем служит полупроводниковый диод, состоящий из одного p - n перехода.

p - n переход образуется в зоне контакта примесных полупроводников с разными типами электропроводности – дырочной и электронной (p - и n - типа). Это показано на (рис. 37), на котором также представлена вольтамперная характеристика p - n перехода. Односторонняя проводимость обусловлена тем, что при приложенном к p - n переходу прямого напряжения (плюс внешнего источника ЭДС – к p -области) ток обусловлен движением основных носителей заряда (дырок p -области и электронов n -области), и сила тока велика.

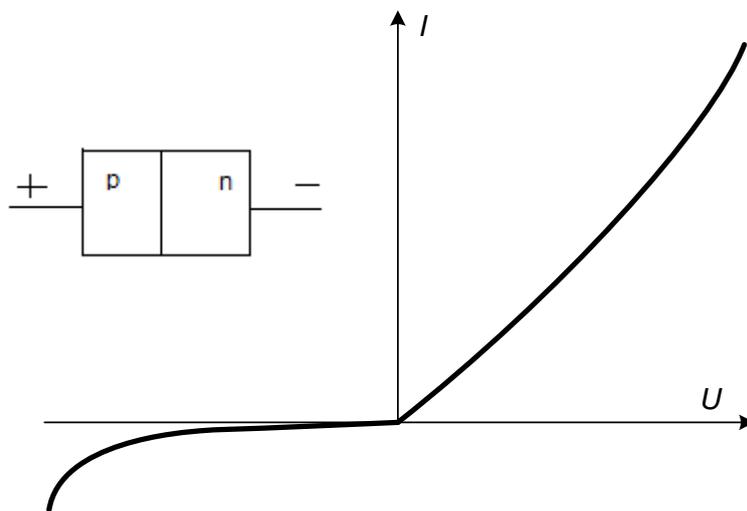


Рис. 37

При запирающем напряжении (обратной полярности) сила тока через p - n переход мала, т.к. ток обусловлен (рис. 37) движением неосновных носителей.

Выпрямители подразделяются на однополупериодные и двухполупериодные.

1.3. Сглаживающий фильтр служит для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения: уменьшения его переменной составляющей и увеличения постоянной.

Основной величиной, характеризующей действие фильтра, является коэффициент сглаживания: отношение коэффициентов пульсаций на входе и на выходе фильтра.

Полученное непосредственно с фильтра напряжение для электропитания электронных устройств использоваться не может, т.к. для однополупериодного выпрямителя коэффициент пульсаций $P_1=1,57$ а для двухполупериодного $P_1=0,67$, в то время как его допустимое значение не должно превышать 10^{-4} - 10^{-5} .

Простейшим сглаживающим фильтром является конденсатор большой емкости, включенный параллельно сопротивлению нагрузки.

2. Однополупериодный выпрямитель состоит из одного вентиля (рис.38), который будем считать идеальным: обладающим бесконечно большим сопротивлением при заперном напряжении, а при прямом – малым сопротивлением, имеющим постоянное значение ($R_{1н} \gg R_{1д}$); соответственно, вольтамперная характеристика представляет собой линейную зависимость (рис. 39а).

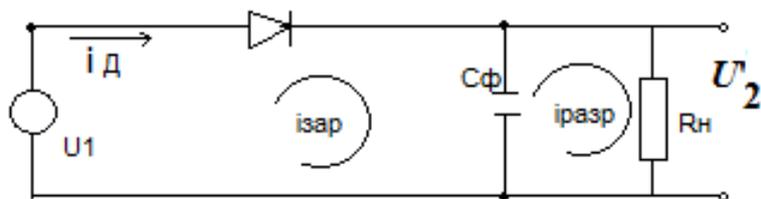


Рис. 38

2.1. Рассмотрим вначале работу устройства до фильтра. Спроектируем переменное напряжение с выхода трансформатора на идеализированную вольтамперную характеристику (рис39а). На нагрузочном сопротивлении напряжение имеет форму однополярных полупериодов (т.е. одного выпрямителя) - для чего будем проектировать на вольтамперную характеристику значения выходного (выпрямленного) напряжения U_1 и строить график силы тока через диод и график напряжения на нагрузочном сопротивлении $U'_2 = U_R = i_D R_n$, вид которой представлен

на рис.39. Среднее значение выпрямленного напряжения рассчитывается по формуле

$$U_2 = 1/T \int_0^T U_2' dt$$

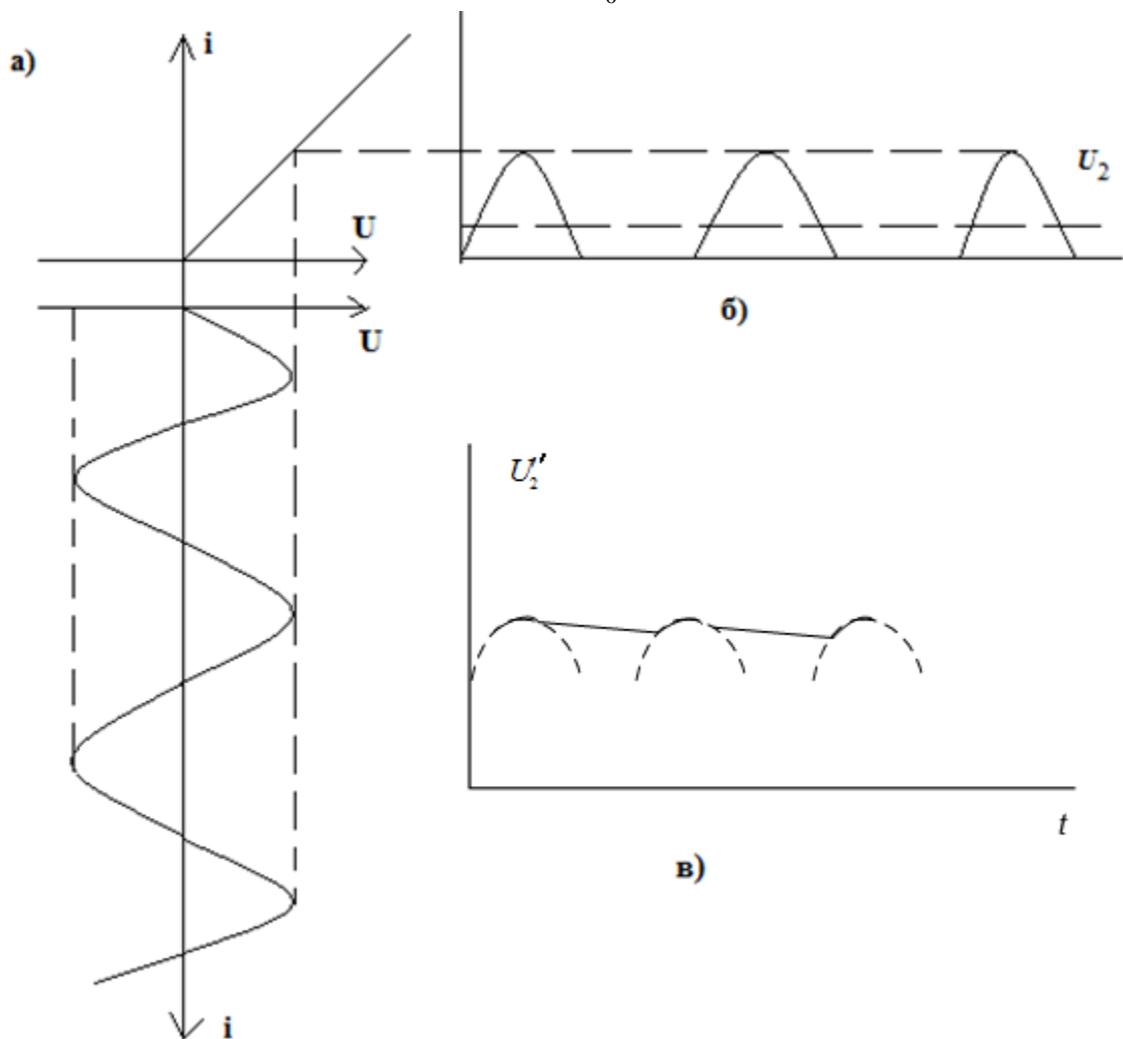


Рис. 39

2.2. При наличии сглаживающего фильтра, ток через диод протекает в течение той части положительного полупериода, когда входное напряжение U_1 превышает напряжение на конденсаторе фильтра ($U_1 > U_c$), являющееся в то же время напряжением на нагрузочном резисторе, т.е. выходным выпрямленным напряжением U_2 (рис.39б). На положительном полупериоде к диоду приложено прямое напряжение. В течение незначительного интервала времени конденсатор быстро заряжается, а всю остальную часть периода конденсатор медленно ($R_H \gg R_D$) разряжается через нагрузочное сопротивление. Можно считать, что $\tau_{\text{разр}}$

приблизительно равно периоду. Условие сглаживания пульсаций имеет вид:

$$\tau_{\text{разр}} = R_H \cdot C_{\phi} \gg T$$

3. Двухполупериодный выпрямитель (рис. 40) состоит из двух однопериодных (называемых плечами), поочередно (со сдвигом во времени на $T/2$) работающих на общее нагрузочное сопротивление – причем так, чтобы ток через него протекал все время в одном направлении. На этом же рисунке представлены эпюры напряжений.

При положительном напряжении в точке a ток протекает через диоды D_1, D_3 , а при отрицательном напряжении в точке a ток протекает через диоды D_2, D_4 .

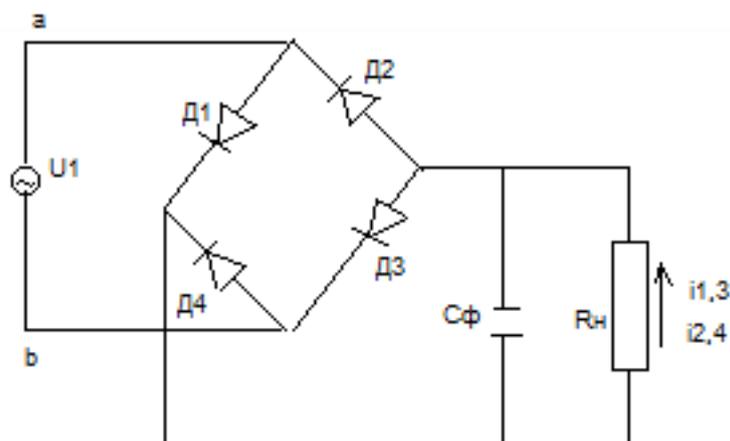


Рис. 40

Напряжение на сопротивлении R_H $U'_2 = i_R R_H$ (в отсутствии фильтра) имеет вид положительных полуволн, следующих с удвоенной частотой выпрямляемого напряжения, т.е. дважды за период (рис. 41).

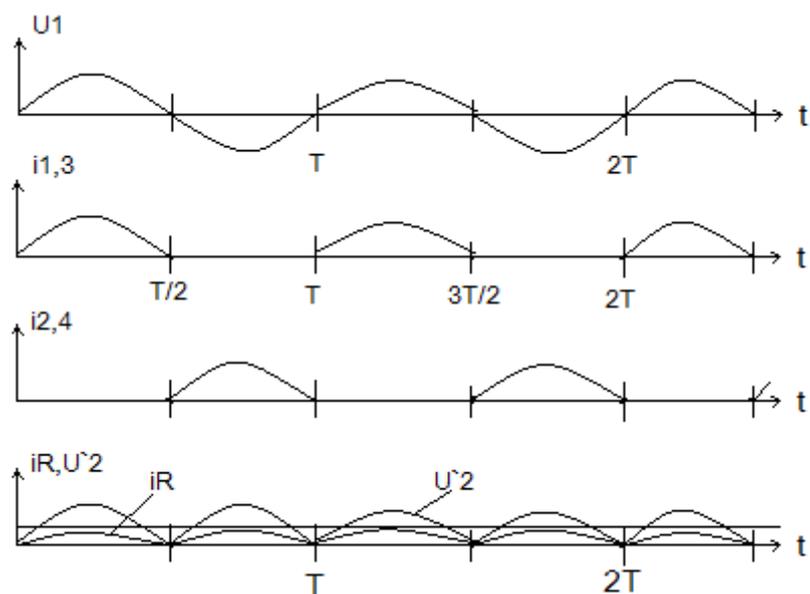


Рис. 41

Благодаря этому значение постоянной составляющей выпрямленного напряжения больше, чем в однополупериодном выпрямителе (и соответственно значение коэффициента пульсаций – меньше); кроме того, частота основной гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения равна удвоенной частоте выпрямляемого напряжения, что облегчает выполнение условия сглаживания: при наличии фильтра импульсы тока через диод, подзаряжающие конденсатор, следуют дважды за период – и соответственно фактическое время разряда конденсатора $T/2$ (а не T , как в однополупериодной схеме).

4. Лабораторная установка представляет собой включаемый в сеть стенд, внутри которого выполнены все соединения отдельных частей выпрямительного устройства во всех рассматриваемых вариантах. На передней панели размещены измерительные приборы:

- Вольтметр переменного напряжения pV_1 , измеряющий напряжение на вторичной обмотке трансформатора U_1 ;
- Вольтметр постоянного напряжения pV_2 , входные контакты которого присоединены к гнездам 17,18,19,20 (т.е. выведены наружу);
- миллиамперметр pA , измеряющий силу тока в нагрузочном резисторе.

На передней панели также находятся:

- гнезда для подключения измерительных приборов (осциллографа, вольтметра) к основным точкам схемы;

– переключатели элементов сглаживающего фильтра (SA3 и SA4).

Выпрямители и фильтры разных типов смонтированы в виде сменных плат, устанавливаемых на передней панели стенда.

2. Выполнение работы

– установите с помощью лаборанта на передней панели стенда сменные платы со схемами заданных для исследования выпрямителя и фильтра;

– срисуйте полную схему полученного выпрямительного устройства и сопоставить ее с приведенными в данных МУ;

– сделайте заготовки для зарисовки осциллограмм (в виде необходимого количества координатных систем – произведя разбивку осей времени на полу периоды).

1. Следует получить и зарисовать осциллограммы:

– напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_1 ;

– силы тока через диод i_D ;

– напряжения на нагрузочном резисторе U_2 (или U_2').

Перечисленные осциллограммы должны быть получены для однополупериодного и для двухполупериодного выпрямителей, как без фильтра, так и с фильтром. Для их получения осциллограф должен подключаться к соответствующим гнездам на передней панели стенда.

Для получения осциллограмм при отключенном фильтре переключатель SA4 устанавливается в верхнее положение, а переключатель SA3 – в среднее (нейтральное). Для включения сглаживающего конденсатора переключатель SA3 нужно установить либо в верхнее, либо в нижнее положение.

Для получения осциллограмм силы тока служат специально включенные вспомогательные измерительные активные сопротивления $R_{изм.1} - R_{изм.2}$ (осциллограмма напряжения на которых подобна осциллограмме силы тока, т.к. $U_R = i \cdot R$).

2. Определить коэффициент пульсаций для однополупериодного выпрямителя без фильтра и с фильтром, а также коэффициент сглаживания при разной величине емкости фильтра (переключатель SA3); для этого измерить постоянную и переменную

составляющие выпрямленного напряжения подключенным к гнездам 14-15 вольтметром (для измерения постоянной составляющей можно воспользоваться прибором pV_2).

Примечание: НЕДОПУСТИМО соединение гнезд 7, 8, 15, 16, имеющих нулевой потенциал (\perp корпус прибора) с гнездами 11, 12, 13, 14 (незаземленный конец нагрузочного резистора).

Контрольные вопросы

1. Для чего служат однофазные выпрямительные устройства и в качестве чего применяются?

2. Назовите основные части выпрямительного устройства. Каковы их функции? Что они собой представляют?

Какие величины характеризуют их действие?

3. Перечислите осциллограммы, наблюдаемые в работе.

Для каких случаев (вариантов) их следует получить или зарисовать?

Какое предварительное действие надо выполнить для их качественной зарисовки?

4. Как получают осциллограмму силы тока (что ею является?) в частности – осциллограмму силы тока через диод? i_D ; чем отличаются эти осциллограммы при отсутствии и при наличии сглаживающего фильтра?

5. Для чего служит сглаживающий фильтр?

Сформулируйте условия сглаживания?

6. Что может служить простейшим сглаживающим фильтром?

7. Начертить схему простейшего однополупериодного выпрямителя, и объясните, как он работает без фильтра, расскажите о работе сглаживающего фильтра в этой схеме.

8. Что такое коэффициент пульсаций?

Как он определяется в данной работе?

4.2. Транзисторный сглаживающий фильтр

Приборы и принадлежности: Стенд ЭС 1А, осциллограф.

Цель работы: Освоение работы биполярного транзистора в режиме эмиттерного повторителя. Сравнительное исследование RC - и транзисторного фильтров.

4.2.1. Введение

В настоящее время в радиоэлектронной аппаратуре широко применяют транзисторы и микросхемы, открывающие большие возможности для ее миниатюризации. Однако комплексная миниатюризация невозможна без существенного снижения габаритов и массы вторичных источников питания и, в частности, сглаживающих фильтров. Уменьшить массогабаритные показатели сглаживающих фильтров можно, используя вместо громоздких фильтрующих дросселей и конденсаторов транзисторные фильтры. Преимущества транзисторных сглаживающих фильтров по сравнению с их RLC -прототипами проявляются, особенно при работе в условиях пониженной температуры окружающей среды, когда емкость фильтрующих конденсаторов уменьшается, а также при частоте питающей сети 50 Гц. Однако, имея выигрыш перед RLC -фильтрами по указанным показателям (в 2...9 раз), транзисторные сглаживающие фильтры уступают им в коэффициенте полезного действия (КПД). Если на дросселе индуктивно-емкостного фильтра падает напряжение 1...2В, то в транзисторном фильтре на регулирующем транзисторе – до 3...5В. Рассмотрим несколько известных вариантов транзисторных сглаживающих фильтров.

На рис.42 представлена схема наиболее простого транзисторного фильтра. Принцип его работы заключается в следующем. На коллектор транзистора VT_1 поступает напряжение с большой амплитудой пульсации, а цепь базы питается через интегрирующую цепь R_1C_1 , которая сглаживает пульсации напряжения на базе. Сопротивление резистора R_1 выбирают из условия достаточности тока базы для обеспечения заданного тока в нагрузке. Чем больше постоянная времени $T = R_1C_1$, тем меньше пульсации напряжения на базе. Так как устройство представляет собой эмиттерный повторитель, то на выходе фильтра пульсации будут столь же малыми, как и на базе. Емкость конденсатора

C_1 может быть в несколько раз меньше, чем у конденсатора в LC-фильтре, так как базовый ток намного меньше выходного тока фильтра (коллекторного тока транзистора) – примерно в $h_{21э}$ раз ($h_{21э}$ – коэффициент передачи тока).

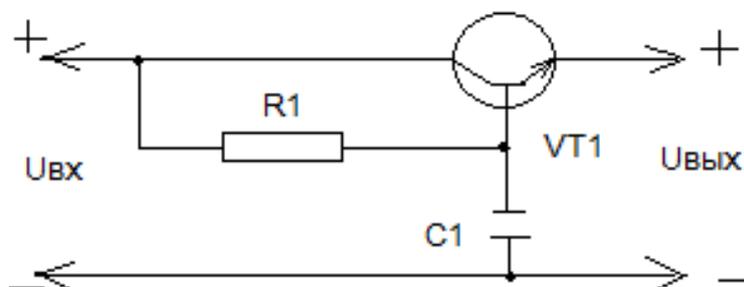


Рис. 42

Преимущество этого фильтра – в простоте. К недостаткам следует отнести, *во-первых*, противоречивые требования к значению сопротивления резистора R_1 (для уменьшения пульсации на выходе фильтра следует увеличивать сопротивление, а для повышения КПД фильтра – уменьшать), *во-вторых*, сильная зависимость параметров фильтра от температуры, времени, значения тока нагрузки, статического коэффициента передачи тока базы транзистора. В таких фильтрах обычно резистор R_1 подбирают опытным путем.

На рис.43 представлена схема фильтра, у которого пульсации выходного напряжения меньше, так как он позволяет увеличить сопротивление резистора R_1 . Такая возможность обусловлена тем, что цепь базы здесь питается от отдельного источника питания с напряжением $U_б$, большим, чем у основного источника ($U_{вх}$). Мощность, выделяющаяся на резисторе R_1 , незначительна, поскольку ток базы мал. Однако, наряду с положительным эффектом уменьшения пульсации, этому фильтру присущи те же недостатки, что и выполненному по схеме на рис. 42. Кроме того, в этом фильтре транзистор может войти в режим насыщения и тогда пульсации со входа будут без какого бы то ни было ограничения переданы на выход фильтра.

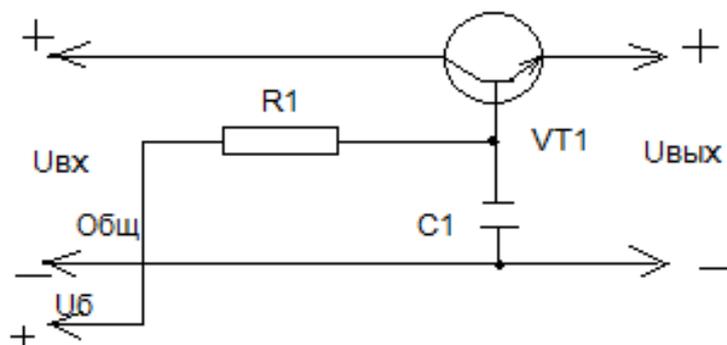


Рис. 43

На рис. 44 представлена схема фильтра, позволяющего избежать зависимости выходных параметров от температуры, времени, нагрузки и коэффициента $h_{21э}$ транзистора. Ток через делитель R_1R_2 выбирают в 5...10 раз большим, чем ток, ответвляющийся в базу. Поэтому выходное напряжение фильтра будет определяться распределением входного напряжения на делителе.

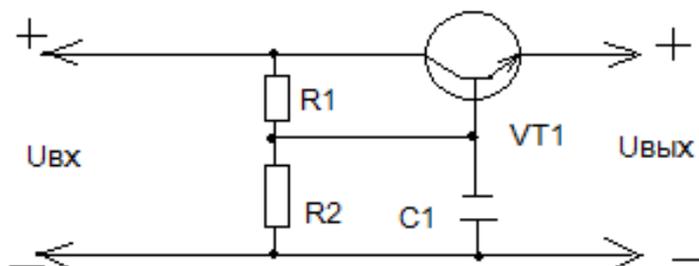


Рис. 44

Недостатки фильтра: меньший КПД по сравнению с собранными по схемам на рис. 42 и 43, необходимость увеличения емкости конденсатора C_1 для получения того же уровня пульсации на выходе, что и у предыдущих фильтров. Для улучшения его фильтрующих свойств применяют N-звенные RC-фильтры в цепи базы транзистора.

На рис. 45 показана схема устройства с двухзвенным RC-фильтром. Здесь сумма значений сопротивления резисторов R_1 и R_2 равна сопротивлению резистора R_1 в предыдущем устройстве, а сопротивление резистора R_3 равно сопротивлению резистора R_2 в фильтре по рис. 44.

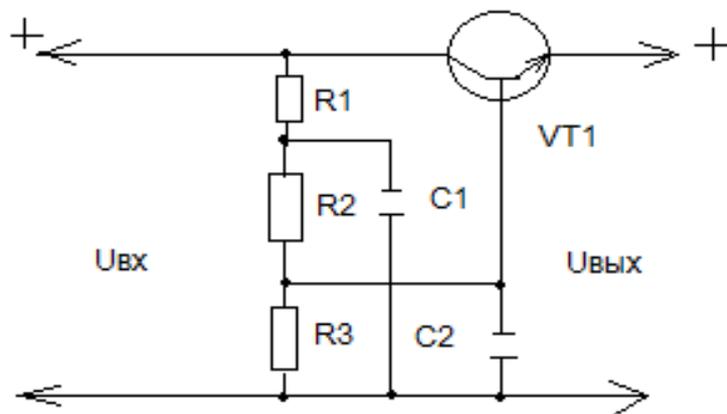


Рис. 45

2. Порядок выполнения работы

1. Включить стенд ЭС 1А/1 и осциллограф.

2. Измерить нагрузочную характеристику RC-фильтра, для чего подключить осциллограф к сопротивлению нагрузки (гнезда 14-15), а переключатели установить в следующие положения:

▲ SA4, ▼ SA3. Измерить осциллографом постоянную U и переменную ΔU при различных токах нагрузки I_H . Результаты занести в таблицу и построить графики зависимостей $U(I_H)$ и $\Delta U(I_H)$.

3. Измерить нагрузочную характеристику транзисторного фильтра, для чего переключатели установить в следующие положения: ▲ SA4, ▼ SA7. С помощью сопротивления R_d получить максимальное значение $U_{\text{вых}}$ и произвести измерения и обработку результатов аналогичные п. 2.

4. Исследовать влияние RC в цепи базы транзистора на характеристики транзисторного фильтра. Для этого, не меняя предыдущих настроек, измерить U и ΔU при двух положениях переключателя SA7.

Контрольные вопросы

1. В чем причина низкого КПД транзисторного сглаживающего фильтра?

2. Чем объясняется уменьшение требований по величине емкости транзисторного сглаживающего фильтра по отношению к емкостному фильтру?

3. Какие факторы определяют величину сопротивления в RC цепи?

4. Что такое нагрузочная характеристика фильтра?

4.3. Исследование логических и импульсных схем

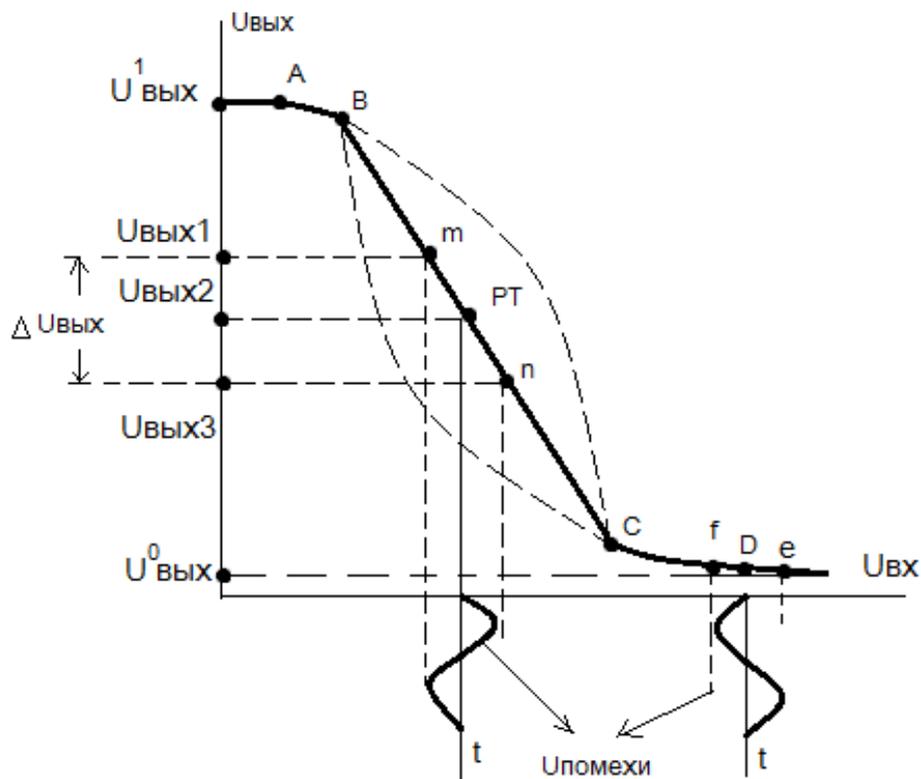
1. Введение

Все электронные схемы делят на два класса:

- а) аналоговые схемы (АС);
- б) цифровые схемы (ЦС).

Особенности режимов цифровых и аналоговых схем можно объяснить, используя передаточную характеристику (рис. 46), которая выглядит одинаково для того и другого класса схем, однако, использование этой характеристики для каждого класса принципиально отличается.

Для транзисторных ключей характерны два устойчивых состояния. На передаточной характеристике этим состояниям соответствуют: точка «А» (транзистор закрыт, на выходе высокий уровень, близкий к напряжению питания) и точка «В» (на выходе низкий уровень напряжения, близкий к нулю).



Аналоговым сигналам соответствует участок «тп».

Если дать сравнительную оценку помехоустойчивости аналоговым схемам и цифровым, то из передаточной характеристики отчётливо видно, что цифровые схемы при воздействии на них сигнала помехи (на рис. 1 – $U_{\text{помехи1}}$) практически не меняют уровня напряжения на выходе ключа.

При воздействии на аналоговую схему сигнала помехи ($U_{\text{помехи2}}$) уровень напряжения на выходе значительно изменился (например, на выходе усилителя напряжения).

Вывод: преимуществом цифровых схем перед аналоговыми, является почти полное отсутствие влияния помех на работу электронного устройства.

Импульсный и ключевой режимы нередко отождествляют. Это справедливо, потому что, когда активные приборы в любом из этих режимов длительное время находятся или в открытом, или в закрытом состоянии, их можно использовать как ключи. Переход из одного состояния в другое происходит за очень короткий промежуток времени.

2. Преимущества импульсного и ключевого режимов

Широкое использование импульсного режима не случайно: например, есть возможность использовать те участки ВАХ транзистора, где наибольшая крутизна. Рассеиваемая мощность на транзисторе возрастает, в основном, в переходных процессах, когда он переходит из одного состояния в другое. Но это достаточно малый промежуток времени, поэтому перегрузки прибора не происходит. В импульсном режиме электронные устройства имеют достаточно высокий КПД, повышается помехоустойчивость электронных схем.

В импульсном режиме информация о сигнале представляется в цифровой форме, что упрощает процесс обработки информации.

3. Краткие сведения о форме и параметрах импульса

Вообще под импульсом понимают кратковременное отклонение напряжения или тока от некоторого постоянного уровня, в

частности от нулевого. Рассмотрим основные параметры импульса, приведённого на рис. 47.

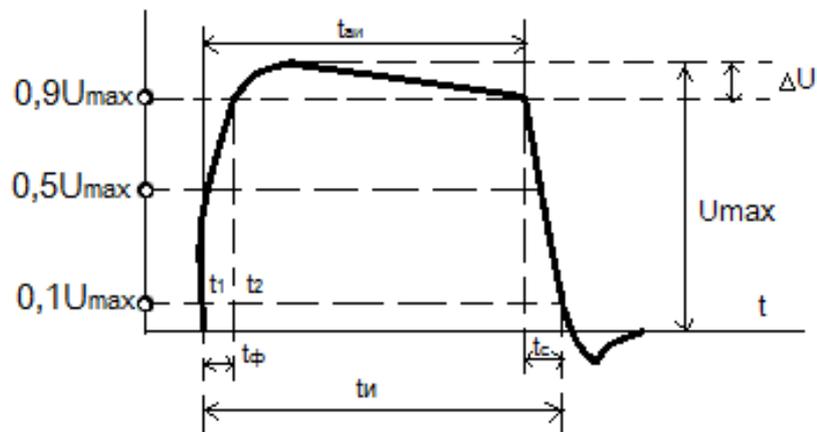


Рис. 47

За активную длительность импульса (t_{au}) принимают промежуток времени, измеренный на уровне, соответствующем половине амплитуды. Иногда длительность импульса измеряют на уровне $0,1U_{\max}$, но чаще – по основанию ($t_{и}$).

Однополярные импульсы характеризуются наибольшим значением напряжения (тока) – амплитудой (U_{\max}) – высота импульса, а разнополярные удобнее характеризовать полным перепадом, равным $2U_{\max}$ (рис. 48а).

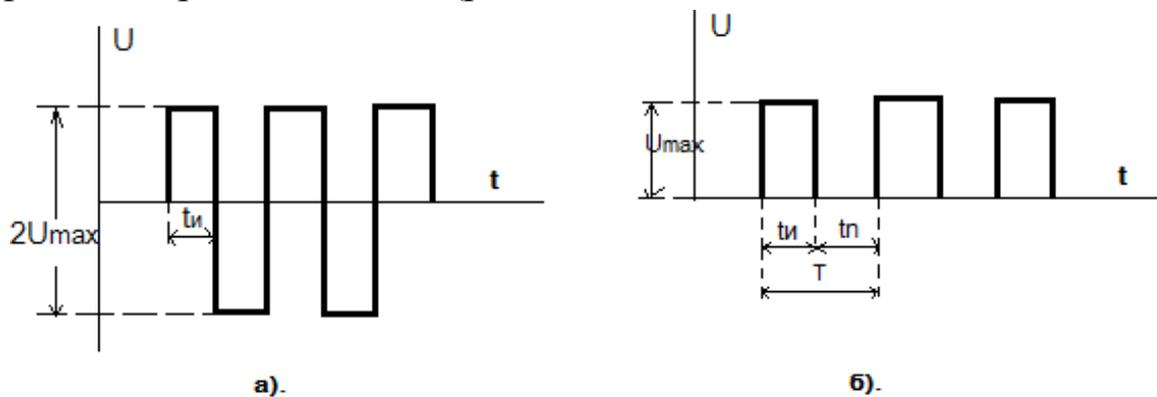


Рис. 48

Импульс имеет нарастающий и спадающий фронты.

Для определения длительности нарастающего фронта импульса пользуются понятием активной длительности фронта ($t_{\phi} = t_2 - t_1$), за которую принимают время нарастания импульса от $0,1 U_{\max}$ до $0,9 U_{\max}$, а длительность среза импульса t_c – от $0,9 U_{\max}$ до $0,1 U_{\max}$.

Иногда фронты импульса характеризуют скоростью нарастания и среза. В этом случае пользуются понятием крутизны (S) фронта или среза и измеряют в в/сек, кв/сек и т.д. Приближённо

$$S \approx \frac{U_M}{t_{\text{ф}}}.$$

Мощность в импульсе – это энергия, выделенная в цепи при прохождении импульса, отнесённая к его длительности

$$P_u = \frac{W}{t_u}, \text{ Вт},$$

Часть периода (T) занимает пауза (t_n) – отрезок времени между окончанием и началом двух соседних импульсов, следовательно, $t_n = T - t_u$ (рис. 48б).

Период повторения импульсов (T) – отрезок времени между началами двух соседних однополярных импульсов (сек, мсек, мксек, нсек) – рис. 48б.

Частота повторения (следования) импульсов – величина, обратная периоду повторения (Γ ц, кГц) – $f_{\text{свт}} = 1/T$

Коэффициент заполнения – отношение длительности импульса к периоду повторения

$$K_{\text{зап}} = t_u / T = T - t_u / T \text{ – величина безразмерная и всегда } < 1.$$

Сквозность импульсов – величина, обратная коэффициенту заполнения.

$$Q = 1 / K_{\text{зап}} = T / t_u \text{ – величина всегда безмерная и всегда } > 1.$$

Форма импульса может быть самой разнообразной (рис. 49).

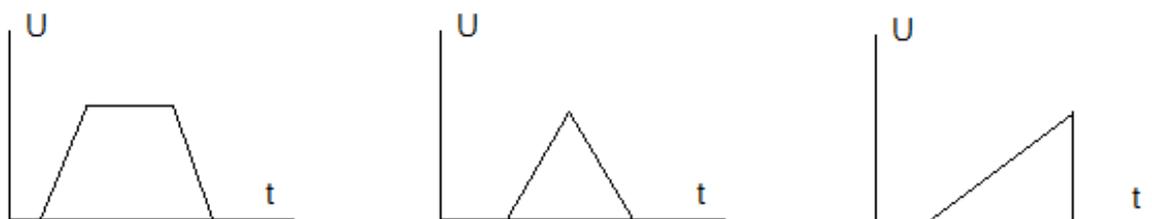


Рис. 49

4. Цифровое представление преобразуемой информации, логические состояния и основные логические функции, выполняемые цифровыми логическими схемами

Сигналы, которыми воздействуют на цифровую схему, характеризуются определённым уровнем напряжения

В цифровых схемах сигнал преобразуется и обрабатывается по закону дискретной функции, а в аналоговых схемах – по закону непрерывной функции.

Для описания алгоритмов работы цифровых схем необходим соответствующий математический аппарат. Такой аппарат был разработан ирландским учёным-математиком Д. Булем. Этот аппарат получил название *булевой алгебры* или *алгебры логики*. Под алгеброй логики понимается математическая система, которая оперирует двумя понятиями (высказываниями) – событие истинно (слон огромный, мышь маленькая) и событие ложно (слон маленький, мышь огромная).

Следовательно, анализ комбинационных устройств и цифровых автоматов проще всего проводить с помощью алгебры логики, оперирующей только двумя понятиями (высказываниями): *истинным (логическая 1) и ложным (логический 0)*. В результате функции, отображающие информацию, принимают в каждый момент времени только значения 0 или 1. Такие функции называются *логическими*. *Логические функции* «Y» нескольких переменных ($X_0; X_1 \dots X_{n-1}$) определяют характер логических операций, в результате которых набору входных переменных ставится в соответствие переменная Y

$$Y = f(X_0 \dots X_{n-1}).$$

Есть условные понятия *положительной логики* и *отрицательной логики*.

Если логическому 0 соответствует напряжение низкого уровня, а логической 1 – высокого, то такую логику принято называть *положительной*. Если же за логический 0 принимаем напряжение высокого уровня, а за логическую 1 – напряжение низкого уровня, то такую логику называют *отрицательной*.

Мы будем рассматривать примеры только с положительной логикой.

**Основные логические функции,
выполняемые цифровыми логическими схемами:**

а) *Операция логического умножения – конъюнкция.*

Таблица 1

X_1	X_2	$Y=X_1 \cdot X_2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

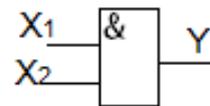


Рис. 50 операция 2 И



Рис. 51 операция 2 И-НЕ

При логическом умножении входные переменные соединяют союзом «И». Такую операцию обозначают символом « \wedge » или знаком умножения (\cdot), а читается как « X_1 и X_2 », то есть эта операция несёт информацию о том, что сложное высказывание истинно лишь тогда, когда истинны все простые высказывания. В нашем случае функция $Y = X_1 \cdot X_2$ принимает значение логической 1 только при равенстве единице (ЛГ₁) всех переменных на входах цифровой логической схемы. Если хотя бы одна переменная принимает значение логического 0, то и выходная функция будет равна 0.

Наиболее наглядно функция преобразования характеризуется *таблицей истинности* (табл. 1). Графическое обозначение двухвходового логического элемента, выполняющего операцию конъюнкции, дано на рис.50.

б) *Операция логического сложения (дизъюнкция).*

При логическом сложении два или более высказываний соединяют союзом «ИЛИ». Обозначают эту операцию или символом « \vee », или знаком сложения ($+$), а читается как « X_1 или X_2 », то есть эта операция несёт информацию о том, что сложное высказывание истинно, если истинно хотя бы одно из простых высказываний, или же истинны оба высказывания. Функцию логического сложения охарактеризуем таблицей истинности (табл. 2).

Графическое обозначение двухвходового логического элемента, выполняющего операцию *дизъюнкции*, показано на рис. 52.

Таблица 2

X_1	X_2	$Y=X_1+X_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

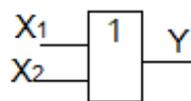


Рис. 52 операция 2 ИЛИ

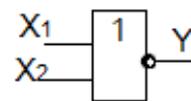


Рис. 53 операция 2 ИЛИ-НЕ

В нашем случае (двухвходовой логический элемент) высказывание $Y = X_1 + X_2$ истинно, если будет истинно хотя бы одно из высказываний, входящих в её состав.

в) операция логического отрицания (функция инверсии «НЕ»)

Эту операцию можно называть операцией инверсии, так как значение выходной функции противоположно входной переменной. Эту операцию обозначают (χ), а читается она как «не X».

Функцию логического отрицания охарактеризуем таблицей истинности (табл. 3). Графическое обозначение одновходового логического элемента, выполняющего операцию логического отрицания, дано на рис. 54. Конъюнкцией, дизъюнкцией, инверсией (отрицанием) можно выразить любые другие более сложные операции над высказываниями (см. рис. 51 и рис. 53).

Таблица 3	
X	Y
1	0
0	1

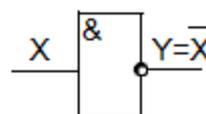


Рис. 54. Операция «НЕ»

Операцию логического отрицания проще показать на схеме ключа на транзисторе, включенного по схеме с ОЭ: из трёх схем включения биполярного транзистора лишь схема с ОЭ изменяет фазу входного сигнала на выходе на противоположную (рис. 55).

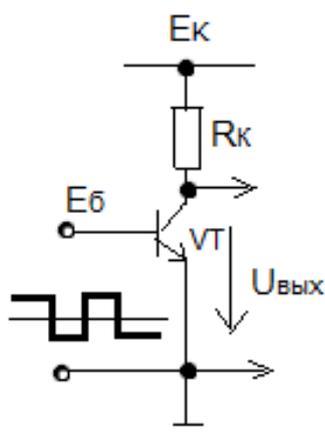


Таблица 4

$x(U_{вх}=\pm Eб)$	$Y=\bar{X} (U_{вых})$
1	0
0	1

Рис. 55

Если на входе ключа действует высокий уровень напряжения, то на его выходе формируется низкий уровень. И, наоборот: на входе низкий уровень напряжения сопровождается высоким уровнем на выходе ключа (табл. 4). Следовательно, операция «НЕ» означает, что результирующее высказывание будет истинно, если исходное высказывание ложно (и наоборот).

Диапазон напряжений высокого и низкого уровней зависит от типа микросхем.

Например, для ТТЛ элементов уровень логического нуля на входе $U_{вх}^0$ составляет примерно 0,6...0,9В, а уровень $U_{вых}^0 \approx 0,4$ В. Уровень логической единицы на входе, $U_{вх}^1 = 2$ В, а на выходе $U_{вых}^1 = 2,4$ В. Высокий уровень на выходе КМОП элемента $U_{вых}^1 \approx E_n - (10...20)$ мВ, а $U_{вых}^0 \approx 0$. Напряжение источника питания зависит также от типа микросхем.

Электронные схемы, которые выполняют логические операции, называются *логическими элементами*. С помощью перечисленных выше логических элементов, выполняющих логические функции И, ИЛИ, НЕ, создаются довольно сложные цифровые интегральные схемы, способные выполнить любую сложную логическую операцию. Такие схемы принято называть *базовыми*. На рис. 51-54 показаны одноходовые и двухходовые логические элементы. Количество входов у логических элементов может быть гораздо больше. В интегральной схемотехнике используются элементы «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ», причём каждый из этих элементов способен выполнить все виды логических операций. Например, если соединить входы элемента «И-НЕ», схема будет

выполнять операцию «НЕ». Современные технологии позволяют получить множество базовых элементов, которые различаются между собой, прежде всего схмотехнической реализацией, напряжением питания, параметрами и т.д.

5. Теоретическое обобщение по теме

До настоящего времени довольно широко используется транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ) малой и средней степени интеграции. Однако благодаря новым технологиям в области изготовления МОП- и КМОП-логических схем, ТТЛ была основательно потеснена. Современные технологии позволили строить цифровые системы большой (БИС) и сверхбольшой (СБИС) степени интеграции. Лидирующее место принадлежит КМОП-логике, которая даже слегка притормозила развитие довольно перспективных технологий, совмещающих в себе биполярные и МОП-транзисторы (БиКМОП-логика). Такое стремительное развитие логических элементов по КМОП-технологии неслучайно, так как у них:

- входные цепи не потребляют токов, и только с повышением частоты и мощности с этими токами приходится считаться;
- высокая нагрузочная способность при малой потребляемой мощности;
- высокое входное сопротивление позволяет использовать их в микросхемах памяти (накопленный заряд используется для хранения информации).

МОП-транзисторы не нуждаются в дополнительной изоляции между элементами, так как у них канал отделён от затвора диэлектриком. Кроме того, современные технологии позволяют изготавливать «короткоканальные» МОП-транзисторы (с длиной канала 0,06мк). По этим причинам степень интеграции микросхем на МОП-транзисторах гораздо выше, чем на биполярных (СБИС на МОП-транзисторах содержат десятки миллионов МОП-транзисторов).

6. Порядок выполнения работы

1. Включить питание стенда ЭС21.

2. На передней панели стенда соединить выход блока «Логический уровень» с измерительным прибором. Измерить напряжения логических уровней «0» и «1».

3. Соединить выходы блока «Логический уровень» со входами логического элемента И-НЕ, а выход элемента с измерительным прибором $U_{\text{вых}}$. Последовательно изменять входные воздействия и измерить выходные уровни логического элемента. Заполнить таблицу «истинности».

X1	0	0	1	1
X2	0	1	0	1
Y				

4. Аналогично получить таблицу «истинности» для элемента ИЛИ-НЕ.

5. К одному из входов элемента подключить регулируемое напряжение от блока « $U_{\text{вх}}$ ». Изменяя величину $U_{\text{вх}}$, измерить $U_{\text{вых}}$. Построить график передаточной функции.

6. Подключить выход блока «Импульс одиночный» к входу блока «Счетчик импульсов». Последовательным нажатием кнопки блока определить количество импульсов. Повторить измерения с импульсами обратной полярности.

5. ПРИЛОЖЕНИЯ

5.1. Единицы физических величин

Единицы величин в СИ и СГС

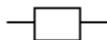
Физическая величина	Формула	Единица измерения
Сила тока	$I = \frac{dQ}{dt}$	А
Электрический заряд	$dQ = Idt$	К

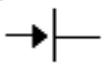
Разность электрических потенциалов	$dU = \frac{dW}{Q}$	В
Энергия – электрическая в конденсаторе – магнитная в индуктивности	$W_{\text{э}} = \frac{CU^2}{2}$ $W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}$	Дж
Напряженность электрического поля	$E = \frac{d\varphi}{dV}$	В/м
Электрическая мощность	$N = \frac{dA}{dt} = U \cdot I$	Вт
Электрическое сопротивление	$R = \frac{U}{I}$	Ом
Электрическая емкость	$C = \frac{Q}{U}$	Ф
Поток магнитной индукции	$d\Phi = -E_{\text{инд}} dt$	Вб
Индуктивность	$L = \frac{\Phi}{I}$	Гн
Магнитная индукция	$B = \frac{dF}{Idl} = \frac{\Phi}{S}$	Тл
Напряженность магнитного поля	$H = \frac{IN}{e}$	А/м
Электрическая постоянная	$\epsilon^0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$	Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu^0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	Гн/м

Десятичные приставки к названиям единиц

Э – экса (10^{18})	М – мега (10^6)	д – деци (10^{-1})	н – нано (10^{-9})
П – пета (10^{15})	к – кило (10^3)	с – санти (10^{-2})	п – пико (10^{-12})
Т – тера (10^{12})	г – гекто (10^2)	м – милли (10^{-3})	ф – фемто (10^{-15})
Г – гига (10^9)	да – дека (10)	мк – микро (10^{-6})	а – атто (10^{-18})

Схемотехнические обозначения

Источник постоянного напряжения	
Сопротивление	

Емкость	
Индуктивность	
Полупроводниковый диод (стрелка указывает направление тока)	
Биполярный транзистор	
Полевой транзистор	

Физические постоянные

Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380622 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Число Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31434 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Нормальное атмосферное давление	$P_n = 1013,25 \text{ гПа}$
Нормальная температура	$T_n = 273,15 \text{ К}$

Формулы для вычисления производных

$\frac{d}{dx}(au) = a \frac{du}{dx}$	$\frac{d}{dx} x^n = nx^{n-1}$	$\frac{d}{dx} \operatorname{tg} x = \frac{1}{\cos^2 x}$
$\frac{d}{dx}(u \pm v) = \frac{du}{dx} \pm \frac{dv}{dx}$	$\frac{d}{dx} e^x = e^x$	$\frac{d}{dx} \operatorname{ctg} x = -\frac{1}{\sin^2 x}$
$\frac{d}{dx}(uv) = v \frac{du}{dx} + u \frac{dv}{dx}$	$\frac{d}{dx} \ln x = \frac{1}{x}$	$\frac{d}{dx} \arcsin x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{d}{dx} \left(\frac{u}{v} \right) = \left(v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx} \right) \frac{1}{v^2}$	$\frac{d}{dx} \sin x = \cos x$	$\frac{d}{dx} \arccos x = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{d}{dx} [u(v)] = \frac{du}{dv} \cdot \frac{dv}{dx}$	$\frac{d}{dx} \cos x = -\sin x$	$\frac{d}{dx} \operatorname{arctg} x = \frac{1}{1+x^2}$

Греческий алфавит

A, α – альфа
 B, β – бэ́та
 Γ, γ – гамма
 Δ, δ – дельта
 E, ε – э́псилон
 Z, ζ – дзета
 H, η – э́та
 Θ, θ – тэ́та
 I, ι – йота
 O, o – омикро́н
 K, κ – ка́ппа
 Λ, λ – ля́мбда
 M, μ – мю́
 N, ν – ню́
 Ξ, ξ – кси́
 Φ, φ – фи́
 Π, π – пи́
 ρ, ρ – ро́
 Σ, σ – си́гма
 T, τ – та́у
 Υ, υ – и́псилон
 X, χ – хи́
 Ψ, ψ – пси́
 Ω, ω – оме́га

5.2 Электронный осциллограф

Электронный осциллограф – один из основных приборов, применяемых в электронике, в первую очередь – для получения осциллограмм, а также для выполнения ряда измерений.

1. Основной составной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка (Э.Л.Т.) с электростатической фокусировкой и отклонением луча (рис. 1), предназначенная для преобразования напряжения в видимое изображение (путем перемещения по экрану узкого электронного пучка).

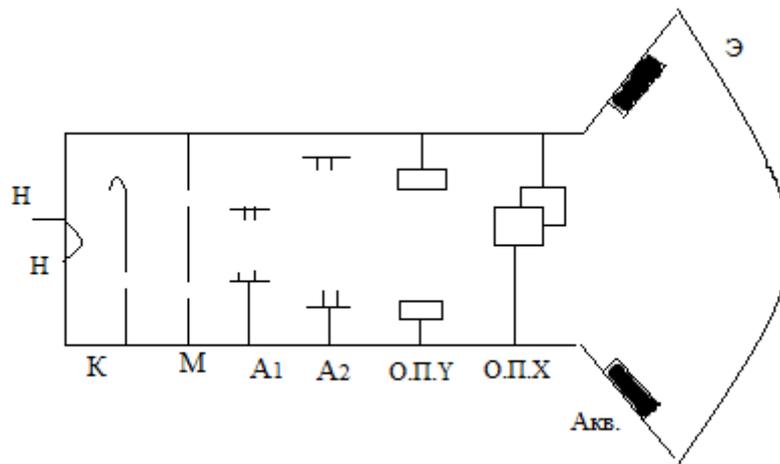


Рис. 56

Она состоит из:

- электронного прожектора (или пушки) - К, М, А₁, А₂;
- отклоняющей системы – О.П.«Х», О.П.«У»;
- люминесцирующего экрана Э, на котором в месте попадания электронов возникает светящееся пятно.

а) Электронный прожектор, состоящий из катода модулятора и двух анодов, осуществляет эмиссию, ускорение и фокусировку электронов (т.е. формирование электронного луча), а также управление силой тока через Э.Л.Т. (путем изменения напряжения на модуляторе М), что приводит к изменению яркости изображения.

б) Отклоняющая система, изменяющая направление движения электронов в двух взаимно перпендикулярных направлениях (и перпендикулярных направлению первоначального движения по оси трубки).

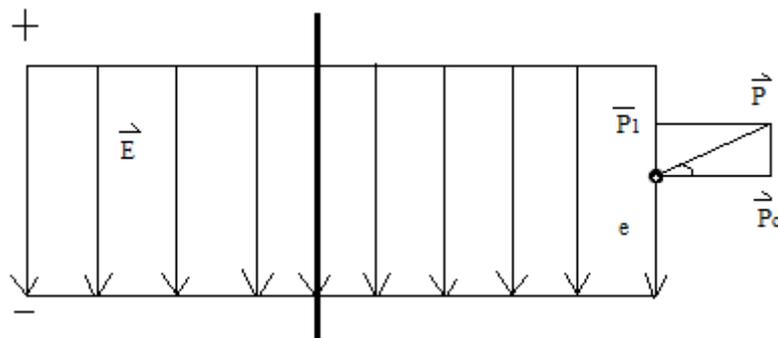


Рис. 57

Под действием электрического поля между пластинами каждой пары электрон приобретает поперечную составляющую импульса P_1 и отклоняется на угол α ; координаты точки на экране (относительно центра), в которую попадает луч, пропорциональна напряжениям на О.П. «X» и О.П. «Y»:

$$x = k \cdot U_x \quad y = k \cdot U_y$$

1. Упрощенная схема осциллографа представлена на рисунке 58:

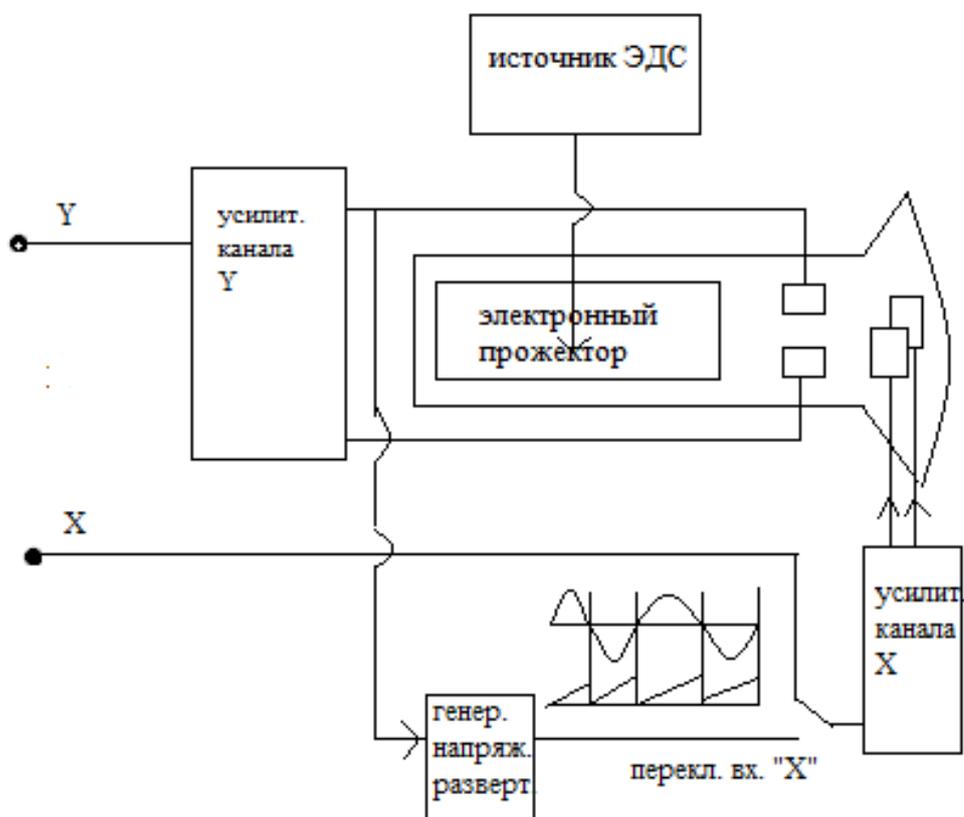


Рис. 58

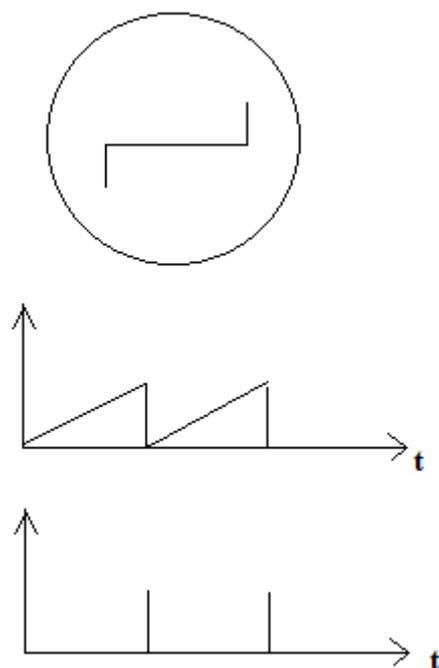


Рис. 59

а) Для получения на экране осциллографа (т.е. графика $U_Y(t)$) наблюдаемое напряжение $U_Y(t)$ через вход «Y» попадает на вертикально отклоняющиеся пластины «Y»; на горизонтально отклоняющиеся пластины «X» поступает пилообразное напряжение развертки (прямо пропорциональное времени, периодическое – рис. 59). В каждый момент времени смещается пятна на экране по горизонтали пропорционально времени, а по вертикали – значению $U_Y(t)$ в этот момент времени; в результате электронный луч вычерчивает график функции $U_Y(t)$. Устойчивое неподвижное положение графика получается при значении периода развертки, кратном периоду наблюдаемого напряжения T :

$$T_{разв} = n \cdot T$$

2. В режиме наблюдения осциллограмм с помощью осциллографа могут быть измерены:

а) амплитуда наблюдаемого напряжения – по величине вертикального отклонения его изображения от линии развертки I_Y :

$$U_0 = I_{Y_{\max}} \cdot C_u$$

где C_u –цена деления шкалы напряжений.

Б) интервал времени (в частности – период T) – по расстоянию I_X между точками начала и конца интервала:

$$\Delta t = I_X \cdot C_t$$

где C_t – цена деления шкалы времени.

В) для получения осциллограммы силы тока на осциллограф должно попадаться напряжение на активном сопротивлении U_R , через которое этот ток протекает (в некоторых случаях – специально включаемого с этой целью в цепь измерительного сопротивления $R_{ИЗМ}$). Так как напряжение на активном сопротивлении прямо пропорционально силе тока ($U_R = R_{ИЗМ} \cdot i$), эти осциллограммы подобны.

3. Как измерительный прибор осциллограф используется также в режиме наблюдения фигур Лиссажу. Для их получения на экране на отклоняющие пластины «X» подается через вход «X» гармоническое эталонное напряжение $U_{Э}(t)$ известной частоты $\nu_{Э}$ (генератор напряжения развертки отключается); на вход «Y» поступает исследуемое напряжение $U_Y(t)$. Вид фигуры определяется соотношением частот ν и $\nu_{Э}$ исследуемого и эталонного напряжений (неподвижная фигура получается при целочисленном их отношении). В простейшем случае равенства частот фигура имеет вид эллипса, положение большой оси которого зависит от разности фаз $\Delta\varphi$ сравниваемых колебаний: при $\Delta\varphi = 90^\circ$ она направлена вертикально или горизонтально (при равенстве амплитуд напряжений наблюдается окружность); при $\Delta\varphi = 0$ или $\Delta\varphi = 180^\circ$ эллипс вырождается в наклонный отрезок прямой (рис. 60).

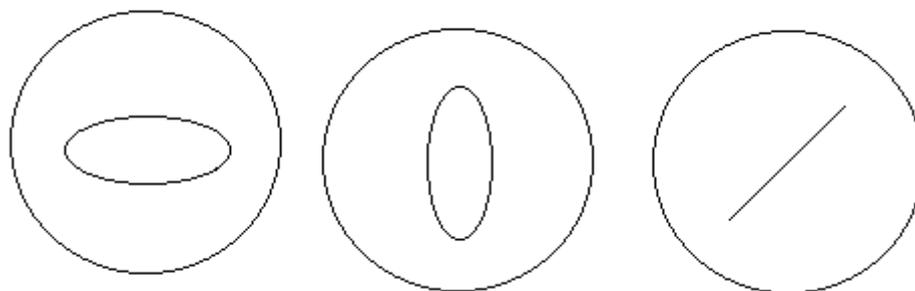


Рис. 60

Таким образом, осциллограф в режиме наблюдения фигур Лиссажу позволяет измерить:

А) частоту исследуемого напряжения (по известной частоте ν_{Σ} эталонного напряжения и определяемому по виду фигур соотношению частот);

Б) фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ одного гармонического напряжения относительно другого гармонического напряжения той же частоты (служащего опорным). Благодаря этому последнему обстоятельству Э.Л.Т. используется в качестве фазочувствительного элемента в аналоговых измерителях фазового сдвига (наиболее точно фиксируемый данным фазочувствительным элементом фазовый сдвиг - $\Delta\varphi = 0$ или $\Delta\varphi = 180^\circ$).

Контрольные вопросы

1. Что собою представляют избирательные цепи и каково их назначение?

2. Каких АЧХ имеют: а) полосовые фильтры; б) заграждающие фильтры; в) фильтры низших частот; г) фильтры высших частот?

3. Что такое последовательный резонансный контур? Какой вид имеет его АХЧ?

4. Что такое добротность контура? Какое свойство контура она характеризует? Как она характеризуется? Как находится в данной работе?

5. Что такое абсолютная полоса пропускания? Что называется полосой пропускания по уровню половинной мощности?

6. Что является мерой избирательности контура? Как избирательность связана с добротностью контура?

7. Какие величины определяются в данной работе? Приведите их буквенные обозначения.

8. Каким электронным прибором производятся измерения в данной работе? Что наблюдается непосредственно?

9. Какие действия надо совершать для определения резонансной частоты контура? По какому признаку она находится?

10. Каковы полученные Вами значения абсолютной и относительной полосы пропускания контура при всех вариантах параметров?

11. К какому типу цепей относится последовательный резонансный контур?

12. Где и для чего применяется резонансный контур?

Литература

1. «Основы промышленной электроники» под редакцией Герасимова В.Г., – М., Высшая школа, 1989 г.
2. «Электроника» (справочник), гл. редактора Коваленко В.В., изд-во Советская Энциклопедия, 1991г.

Учебное издание

Иванов В.П.,
Куприянов Л.Ю.,
Максименко В.В.,
Прокофьев Л.Н.,
Хафизов Р.С.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. МАГНЕТИЗМ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Практикум
для выполнения лабораторных работ*

Специальности:
120301 – « Землеустройство»,
120302 – « Земельный кадастр»,
1200303 – « Городской кадастр»

Редакционно-издательский отдел ГУЗ

Подписано в печать 04.05.16. Сдано в производство 13.02.16.
Формат 60x84¹/₁₆. Объем 6,5 п.л., 5,77 уч.-изд.
Бумага офсетная. Тираж 300. Заказ № _____

Отдел издательства ГУЗ
Москва, ул. Казакова, 15

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. МАГНЕТИЗМ.
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

*Практикум
для выполнения лабораторных работ*

Москва 2017

