

Лабораторная работа № 251

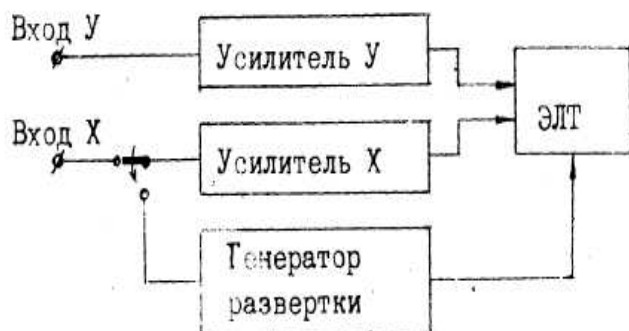
ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Приборы и принадлежности: осциллограф, лабораторная установка, генератор сигналов звуковой частоты.

Краткая теория

Электронный осциллограф предназначен для визуального наблюдения и фотографирования изменений исследуемого электрического сигнала во времени. Кроме того, он может быть использован для измерения амплитуды, частоты, фазы электрического сигнала и т.д.

Упрощенная структурная схема осциллографа приведена на рис. 1. Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), представляющая собой вакуумный баллон, внутри которого помещены электронная пушка, отклоняющая система и экран, покрытый люминофором,



светящимся под ударами электронов (рис. 2).

Рис. 1. Структурная схема осциллографа

Электронная пушка создает пучок электронов, фокусирует и ускоряет его. Она состоит (см. рис.2) из катода 1, подогреваемого нитью накала 2, управляющего электрода 3, фокусирующего анода 4 и ускоряющего анода 5.

Электроны, излучаемые накаленным катодом, проходят через отверстие в управляющем электроде, потенциал которого (отрицательный относительно катода) определяет интенсивность проходящего пучка электронов, а, следовательно, и яркость светящегося пятна на экране ЭЛТ. Затем пучок электронов фокусируется в поле первого анода и ускоряется вторым анодом. В электрических полях электронной пушки электроны разгоняются до скорости порядка 10 м/с.

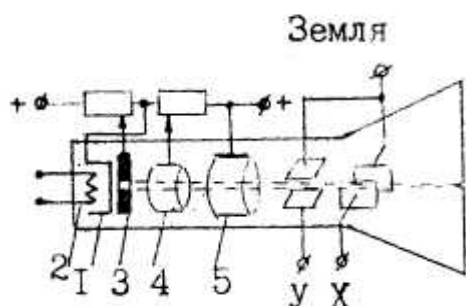


Рис. 2. Схема электронно-лучевой трубки

Процесс фокусировки электронного пучка в ЭЛТ подобен фокусировке световых лучей оптическими линзами, роль которых в ЭЛТ выполняют электростатические поля (электростатические линзы).

Отклоняющая система состоит из двух пар плоских пластин, отклоняющих луч по вертикали (пластины У) и по горизонтали (пластины Х). Если напряжение на отклоняющих пластинах отсутствует, то светящаяся точка находится в центре экрана. Если же подать на одну из пар пластин постоянное напряжение, направление электронного луча изменится, и светящаяся точка на экране сместится на расстояние, пропорциональное поданному напряжению. В случае переменного напряжения электронный луч будет колебаться в плоскости, перпендикулярной плоскости пластин, а на экране появится светящаяся линия.

Осциллограф можно использовать в двух режимах: в первом случае на отклоняющие пластины трубки через усилители Y и X подают два

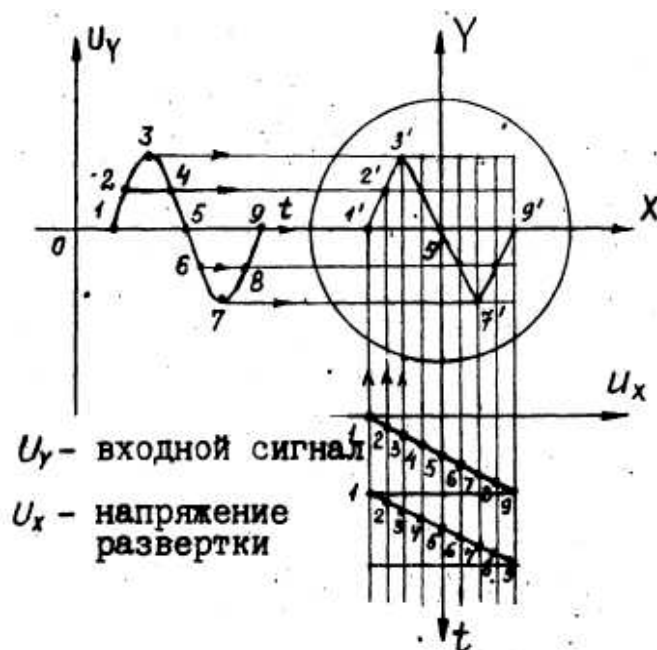


Рис. 3. Схема формирования изображения на экране ЭЛТ

исследуемых сигнала (см. рис. 1). Во втором, наиболее общем случае исследуемый сигнал подается на вход Y, а на вход X подается напряжение от генератора развертки. Под действием пилообразного напряжения развертки луч отклоняется от одного края экрана до другого (рис. 3), а затем быстро возвращается обратно. При совместном воздействии на луч линейного напряжения развертки и напряжения исследуемого сигнала на экране ЭЛТ возникает кривая, соответствующая форме исследуемого сигнала (форме его изменений во времени). Для получения неподвижной картинке исследуемый сигнал должен быть обязательно периодическим, а период развертки должен быть равен целому числу периодов сигнала.

В этом случае за каждый период развертки луч "рисует" одну и ту же картинку. Синхронизация частот развертки и сигнала может производиться либо самим исследуемым сигналом, либо с помощью внешнего источника. Соответственно различают внутреннюю и внешнюю синхронизацию.

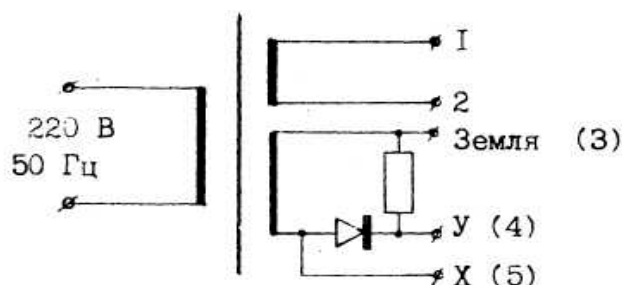
Подготовка осциллографа к работе

1. Подключите осциллограф к сети, включите тумблер "сеть", при этом должна загореться сигнальная лампочка. На экране должна появиться горизонтальная линия. Если линия не появится в пределах экрана, найдите ее совместным вращением ручек "смещ. X" и "смещ. Y" и расположите ее в центре экрана. Затем вращением ручек "яркость" и "фокус" сделайте светящуюся линию четкой и не очень яркой. Осциллограф готов к работе. Целью следующего этапа является приобретение навыков в настройке осциллографа при подаче на его вход сигнала.

2. Включите лабораторную установку (ее электрическая схема показана на рис. 4). Соедините клемму 1 установки с клеммой "вход Y", а клемму 2 - с клеммой "земля" осциллографа. Следует иметь в виду, что "вход X" осциллографа состоит из двух клемм ("вход X" и "земля"), каждая из которых подсоединена к одной из пластин, отклоняющих луч по горизонтали. Аналогично две клеммы ("вход Y" и "земля") имеет вход Y осциллографа. Некоторые типы осциллографов имеют одну клемму "земля", которая является общей для входа X и для входа Y. Ручками "усиление X", "усиление Y", "ослабление" установите желаемую величину изображения синусоидального сигнала ручками "диапазон частот", "частота плавно" и "синхронизация" установите на экране неподвижное изображение сигнала, содержащее желаемое число периодов.

Опишите в отчете действие каждой ручки управления.

ВНИМАНИЕ. В данной лабораторной работе возможно использование осциллографа другого типа, имеющего иное расположение ручек управления и их название. Однако их функциональное назначение одинаково.



Рис, 4. Электрическая схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

Работа состоит из двух частей.

Часть 1. Осциллограф как прибор для наблюдения электрических сигналов

1) *Наблюдение однополупериодного напряжения.*

Соедините клемму "вход У" осциллографа с клеммой 4 установки, а клемму "земля" -с клеммой 3. Зарисуйте осциллограмму однополупериодного выпрямленного напряжения. Объясните ее. Разберите цепь.

2) *Наблюдение вольтамперной характеристики полупроводникового диода.*

Переключатель "диапазоны частот" поставить в положение "выкл". Соедините клеммы 3, 4, 5 установки с клеммами "земля", "вход У", "вход Х" осциллографа, В этом случае на вход Х подается сигнал, пропорциональный напряжению на диоде, а на вход У - току через диод. Осциллограмма будет соответствовать вольтамперной характеристике диода. Зарисуйте и объясните ее. Разберите цепь.

3) *Наблюдение сигнала сложной формы.*

Подключите провод к клемме "вход У" и возьмите его в руки. Переключатель "диапазоны частот" поставьте в положение "2". На экране возникнет кривая напряжения, наводимого на ваше тело электрическими полями в помещении. Обратите внимание, что основная наводка соответствует току силовой сети с частотой 50 Гц.

Часть 2 Определение частоты сигнала и сравнение сигналов двух разных частот.

Развертку отключите. На вход X осциллографа подайте напряжение, изменяющееся с частотой ν_1 , с клемм 1 и 2 лабораторной установки (соедините клемму "вход X" осциллографа с клеммой 1 лабораторной установки, клемму "земля" осциллографа с клеммой 2 лабораторной установки). На вход Y осциллографа подайте напряжение, изменяющееся с частотой ν_2 , с генератора сигналов звуковой частоты (соедините клемму осциллографа "вход Y" с клеммой генератора "600 Ом", а клемму осциллографа "земля" - с клеммой генератора "земля"). Изменяйте частоту генератора до получения одной из фигур Лиссажу (рис. 5). При этом выполняется условие: $\nu_2 = \frac{n}{m}\nu_1$, где m - число точек касания фигуры с вертикальной линией, n -

горизонтальной. Определите частоту напряжения на клеммах 1, 2 установки ν_1 . Величина ν_2 указана на круговой шкале генератора. Зарисуйте фигуры

Лиссажу для случаев $\nu_2 = \frac{1}{2}\nu_1$, $\nu_2 = \frac{2}{3}\nu_1$, $\nu_2 = \frac{3}{2}\nu_1$, $\nu_2 = 3\nu_1$.

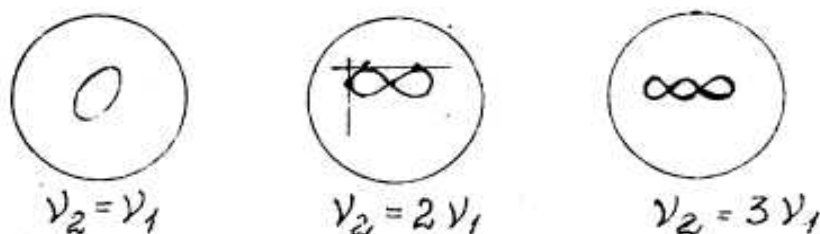


Рис. 5. Вид некоторых фигур Лиссажу на экране осциллографа

Измерение фазы (выполняется по указанию преподавателя).

Схема соединения та же, что и при получении фигур Лиссажу.

Изменяя частоту генератора в небольших пределах около значения $\nu_2 = \nu_1$, получите фигуры, показанные на рис. 6. Сдвиг фаз между колебаниями, поступающими на входы "X" и "Y", находят из формулы: $\sin \varphi = x_0/A = y_0/B$. Обратите внимание на то, что относительный сдвиг фаз двух независимых (не синхронизированных) колебаний не может оставаться постоянным

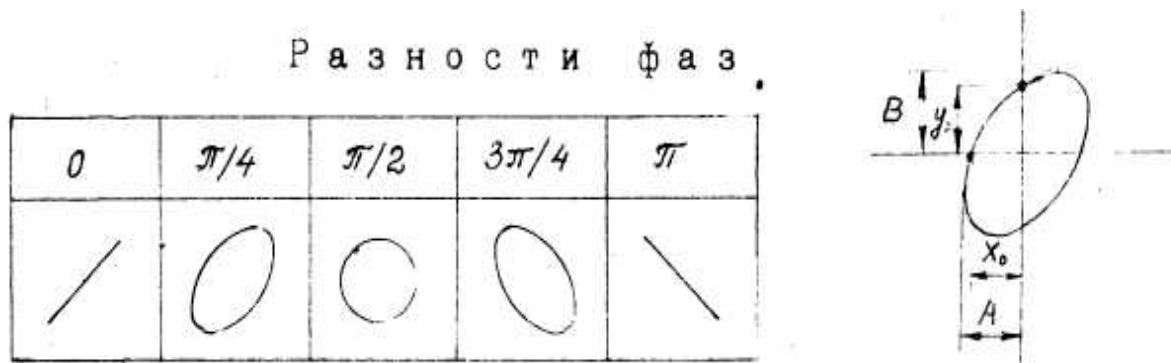


Рис. 6. Вид фигур Лиссажу для равных сравниваемых частот при различных значениях разности фаз

достаточно долгое время.

Контрольные вопросы

1. Укажите последовательность операций для подготовки осциллографа к работе. В каком положении должны находиться основные ручки осциллографа?
2. Что увидим на экране осциллографа, если напряжения на горизонтально отклоняющих пластинах U_x и вертикально отклоняющих пластинах U_y равны:
 - а) $U_x=0, U_y=0$;
 - б) $U_x=1В, U_y=0$;
 - в) $U_x=1В, 50 Гц, U_y=0$.
3. Что будет наблюдаться на экране ЭЛТ, если на входы "X" и "Y" поданы одновременно синусоидальные напряжения с одинаковой частотой и

сдвигом фаз 0° и 90° ? Докажите ответ построением, аналогичным построению на рис.3.

4. Напряжение развертки изменяется по линейному закону $U = kt$, где $k = \text{const}$ (см. рис. 3). По такому же закону изменяется координата X светящейся точки, т. е. $X \sim U$. Какая картина будет наблюдаться на экране?

5. Почему напряжение развертки выбирается линейным?

Литература:

1. Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму. М: МИИГАиК, 2006.
2. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).
3. Трофимова Т.И., Курс физики (любое издание).

Лабораторная работа № 252

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА И ТРАНЗИСТОРА

Приборы и принадлежности: лабораторные стенды, источники питания.

Краткая теория

К полупроводникам относятся элементы, по электрическому сопротивлению занимающие промежуточное положение между металлами и диэлектриками: удельное сопротивление металлов составляет $10^{-8} - 10^{-6}$, диэлектриков - более 10^8 , полупроводников $10^{-2} - 10^6$ Ом/м.

Энергетически возможные состояния электронов в веществе образуют разрешенные зоны, разделенные запрещенными зонами, охватывающими невозможные для электронов значения энергии. Если в верхней из зон, в которой изменяются электроны, все уровни заняты и, кроме того, ширина вышележащей запрещенной зоны ΔE намного больше энергии, теплового движения электронов kT , т.е. $\Delta E \gg kT$, где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, вещество является диэлектриком. Свободные электроны в диэлектрике отсутствуют, и он не проводит электрический ток. Если же запрещенная зона узка, т.е. ΔE превышает kT не более чем в несколько десятков раз, некоторые электроны могут переходить из заполненной зоны на уровни вышележащей, вакантной зоны проводимости. Появляются носители тока - отрицательные (электроны в зоне проводимости) и положительные (дырки, т.е. свободные связи атомов, не заполненные электронами). Такое вещество является полупроводником. Наконец, если в верхней зоне занята лишь часть уровней, либо соседние зоны перекрываются, электроны легко переходят на вакантные уровни и становятся носителями тока, т.е. вещество проводит электрический ток - это металл.

В чистом полупроводнике концентрация свободных электронов равна

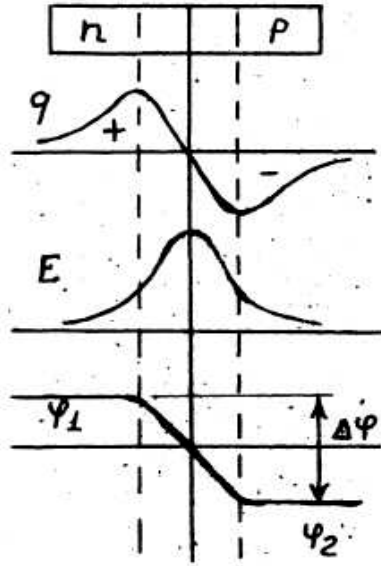


Рис. 1. p-n-переход.

концентрации дырок и растет с повышением температуры. Соответственно увеличивается и проводимость. Широкое применение получили полупроводниковые элементы IУ группы таблицы Менделеева - германий и кремний. Небольшие добавки к ним элементов У группы, например, мышьяка, резко увеличивают концентрацию свободных электронов, поэтому такие примеси называют донорными; а возникающую электронную проводимость -

проводимостью n -типа. Добавление же к кремнию или германию элементов III группы, например, индия, увеличивает концентрацию дырок и такие примеси называют акцепторными (проводимость p- типа). В любом случае примеси увеличивают проводимость полупроводника.

При контакте полупроводников с различными типами проводимости образуется p-n переход, В нем дырки из p-области будут диффундировать в

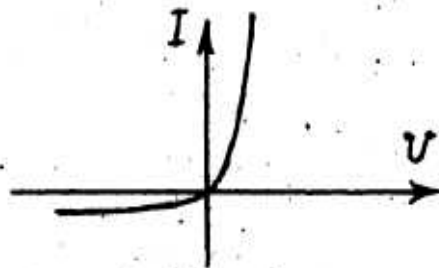


Рис.2. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода

n -область, оставляя в p-области некомпенсированный заряд отрицательных ионов, а электроны будут диффундировать в p-область, оставляя в n-области некомпенсированный заряд

положительных ионов. Вследствие этого в области p-n-перехода образуется двойной электрический слой и возникает электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии электронов и дырок. Изменение плотности электрического заряда q , напряженности поля E и потенциала ϕ вдоль p-n-перехода показано на рис. 1. Величина контактной разности потенциалов для германия примерно равна 0,2 В, для кремния - 0.7 В. Когда к p-n-переходу не приложено внешнее напряжение, то остаточные

диффузионные потоки дырок и электронов, создающие ток в одну сторону, полностью уравновешены встречными дрейфовыми (т.е. под действием электрического поля) потоками дырок и электронов, создающими ток в другую сторону. Суммарный ток через **p-n**-переход при этом равен нулю. Если к **p-n**-переходу приложить внешнее напряжение плюсом к **p**-области и минусом к **n**-области, то внешнее электрическое поле уменьшит напряженность поля в области **p-n**-перехода и диффузионный поток дырок и электронов увеличится, что приведет к появлению значительного тока через **p-n**-переход, как показано на рис. 2 (область положительных значений U). Такая полярность внешнего напряжения называется прямой. Если же внешнее напряжение приложено плюсом к **n**-области, а минусом **p**-области, то внешнее поле увеличит напряженность поля в области **p-n**-перехода, что затрудняет диффузию носителей. Ток через **p-n**-переход резко уменьшается и переход оказывается запертым (см. рис. 2, область отрицательных значений U)

Устройство содержащее **p-n**-переход, называется полупроводниковым диодом. Диоды используются как электрические вентили, пропускающие ток только в одну сторону.

Полупроводниковый триод - транзистор - состоит из трех полупроводниковых зон с различными типами проводимости: либо из двух

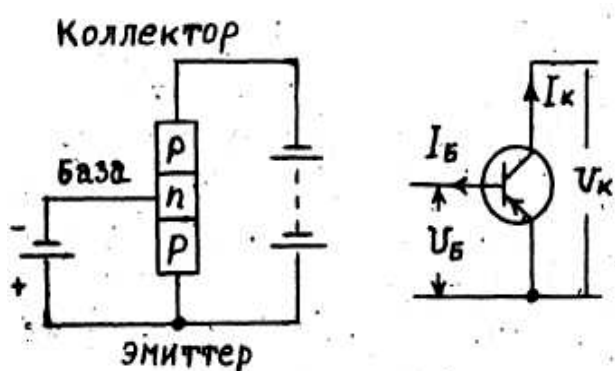


Рис. 3. **p-n-p** транзистор.

p-областей, разделенных **n**-областью (**p-n-p**-транзистор); либо из двух **n**-областей, разделенных **p**-областью (**n-p-n**-транзистор). Транзистор **p-n-p**-типа, показан на рис. 3. Там же указаны названия областей проводимости и соответствующих выводов - эмиттер, база и коллектор.

Принцип действия и характеристики транзистора типа **n-p-n** такие же, только знаки переносимых зарядов, напряжения и направления токов меняются на обратные.

Когда транзистор **p-n-p**- типа работает как усилительный прибор, на базу подается отрицательное относительно эмиттера напряжение, в результате чего эмиттерный переход оказывается смещенным в прямом направлении. На коллектор также подается отрицательное напряжение U_K , большее, чем напряжение на базе: $U_K \gg U_B$. Коллекторный переход оказывается при этом запертым. Поскольку эмиттерный переход открыт, дырки из эмиттера устремляются в базу – возникает эмиттерный ток. Базу транзистора делают очень тонкой, порядка нескольких микрометров, поэтому ток дырок из эмиттера почти полностью достигает коллекторного перехода, захватывается ускоряющим для дырок полем коллектора и создает коллекторный ток. Лишь незначительная часть тока эмиттера (менее 5%) ответвляется в базовый вывод, образуя ток базы. При этом малым изменениям тока базы соответствуют существенно большие изменения токов эмиттера и коллектора, что и дает возможность использовать транзистор как усилитель токов.

В данной работе снимаются характеристики транзистора - графически представленные зависимости между напряжениями на электродах и токами в них. За независимые переменные обычно принимают ток базы I_B и напряжение коллектора U_K , а напряжение базы U_B и ток коллектора I_K определяются как их функции. Зафиксировав поочередно I_B и U_K , можно получить четыре основные характеристики транзистора:

$$U_B = f(I_B, U_K) \Big|_{U_K} - \text{входная характеристика,}$$

$$U_B = f(I_B, U_K) \Big|_{I_B} - \text{характеристика обратной связи по напряжению,}$$

$$I_K = f(I_B, U_K) \Big|_{U_K} - \text{характеристика прямой передачи по току,}$$

$$I_K = f(I_B, U_K) \Big|_{I_B} - \text{выходная характеристика}$$

Все эти характеристики удобно представить на одном чертеже, как показано на рис. 4.

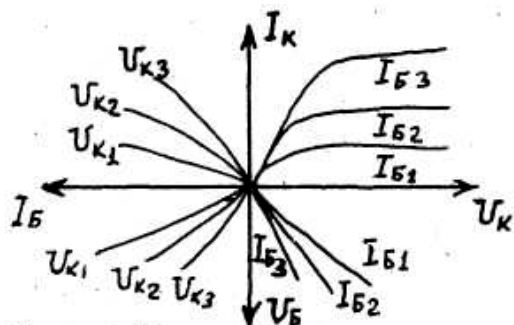


Рис. 4. Характеристики транзистора.

В данной работе требуется найти наиболее важные характеристики прямой передачи по току $I_K = f(I_B, U_K)|_{U_K}$ и выходную характеристику $I_K = f(I_B, U_K)|_{I_B}$.

Необходимо также определить коэффициент передачи тока $h_{21Э}$,

воспользовавшись характеристикой прямой передачи по току.

Техника безопасности. При работе с электрическими установками следует соблюдать общие требования техники безопасности: не подключать к стендам источники питания до проверки схемы преподавателем; не производить подключений цепей, находящихся под напряжением; не оставлять без присмотра включенные стенды и приборы, не прикасаться к неизолированным клеммам и проводникам, находящимся под напряжением. В данной работе используются стенды, рассчитанные на питание от источника постоянного напряжения 12 В. Ни в коем случае нельзя подключать их к сети переменного тока.

Порядок выполнения работы

1. Снятие вольтамперной характеристики полупроводникового диода.

а) Ознакомьтесь со схемой лабораторного стенда (рис. 5). Напряжение на исследуемый диод подается с потенциометра, имеющего среднюю точку. В среднем положении движка потенциометра напряжение на диоде отсутствует. При вращении ручки вправо на диод поступает прямое (отпирающее) напряжение, при вращении ручки влево обратное (запирающее). Для измерения напряжения на диоде и тока, проходящего через диод, служат измерительные приборы стенда.

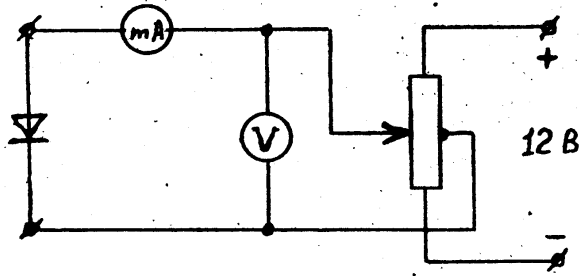


Рис. 5. Схема лабораторного стенда "Полупроводниковый диод".

в) По полученным данным постройте таблицу точек (таблица 1).

б) Подключив стенд к источнику питания (12 В) и изменяя величину приложенного напряжения, измерьте ток через диод. Измерения проводят сначала для прямого направления тока, затем для обратного. Для каждого случая снимают по 5-6

вольтамперную характеристику данного полупроводникового диода (рис. 2). По этой характеристике находят дифференциальное сопротивление диода $R = \Delta U / \Delta I$ при различных напряжениях и строят график зависимости дифференциального сопротивления диода от напряжения. В качестве приращений напряжения ΔU и тока ΔI следует брать разность значений, измеренных в соседних точках.

Таблица 1

Напряжение U, В	- 5,0	- 4,0	- 3,0	- 2,0	- 1,0	0	+1,0	+2,0	+3,0	+4,0	+5,0
Ток диода I, mA											
Сопротивление R, Ом											

2. Снятие характеристик транзисторов.

а) Ознакомьтесь со схемой лабораторного стенда (рис. 6), назначением приборов и ручек управления. Транзистор в стенде включен по схеме с общим эмиттером, обычно используемой в усилительных каскадах. Здесь эмиттер является общим электродом для входной цепи (цепи базы) и выходной цепи (цепи коллектора), откуда схема и получила свое название.

Ток коллектора в этой схеме в несколько десятков, или даже сотен раз (в зависимости от параметра $h_{21Э}$ транзистора) превосходит ток базы, что и обеспечивает усиление по току слабого сигнала, подведенного к цепи базы.

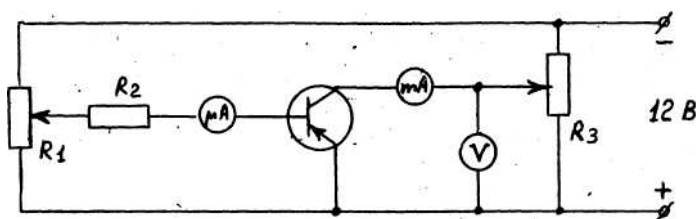


Рис. 6. Схема лабораторного стенда "Транзистор"

б) Поверните обе ручки управления до упора против часовой стрелки и включите питание, строго соблюдая указанную полярность.

в) Установите потенциометром R_1 нулевой ток базы, и, изменяя напряжение коллектора потенциометром R_3 , измеряйте значения коллекторного тока. Результаты запишите в таблицу 2.

г) Такие же измерения проделайте для токов базы 20 мкА, 40 мкА, 60 мкА, 100 мкА, 150 мкА, 200 мкА.

д) По данным таблицы 2 постройте графики зависимостей $I_K(U_K)$ при разных значениях I_B и графики зависимостей $I_K(I_B)$ при разных значениях U_K (см. рис. 4). По этим графикам определите значение коэффициента передачи

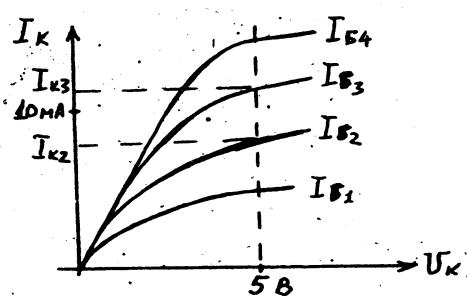


Рис. 7. Определение $h_{21Э}$

тока $h_{21Э}$ при $U_K = 5$ В и $I_K = 10$ мА. По определению $h_{21Э} = \Delta I_K / \Delta I_B$.

Пример определения $h_{21Э}$ дан на рис. 7.

Проводя вертикальную штриховую линию, при $U_K = 5$ В находим токи базы, при которых ток коллектора близок к 10 мА. В данном примере это I_{B2} и I_{B3} .

Далее проводят горизонтальные штриховые линии и находят соответствующие I_{K2} и I_{K3} .

Коэффициент передачи тока находят по формуле $h_{21Э} = \frac{I_{K3} - I_{K2}}{I_{B3} - I_{B2}}$ где все токи

должны быть выражены в одних и тех же единицах, например, в мА.

Таблица 2

Ток базы I_B , мкА	Напряжение коллектора U_K , В							
	0,25	0,5	0,75	1	3	5	7	10
0	Ток коллектора I_K , мА							
20								
40								
....								

Контрольные вопросы

1. Объясните выпрямляющее действие полупроводникового диода.
2. Объясните усилительные действия транзистора.
3. Нарисуйте и объясните вольт-амперную характеристику диода.
4. Нарисуйте и объясните вольт-амперную характеристику прямой передачи тока транзистора.
5. Объясните назначение резистора R_2 в цепи базы транзистора (рис. 6).
6. Как определить коэффициент передачи тока транзистора $h_{21Э}$?

Литература:

1. Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму. М: МИИГАиК, 2006.
2. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).
3. Трофимова Т.И., Курс физики (любое издание).

Лабораторная работа № 253

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ТАНГЕНС-БУССОЛИ

приборы и принадлежности: тангенс-буссоль, амперметр, переменное сопротивление, источник постоянного тока.

Краткая теория:

Основными характеристиками магнитного поля являются векторы напряженности магнитного поля \vec{H} и магнитной индукции \vec{B} , связанные соотношением $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$. Напряженность магнитного поля \vec{H} измеряется в амперах на метр (А/м). Магнитная индукция измеряется в теслах (Тл).

Магнитное поле можно изображать графически с помощью силовых линий - линий, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают с направлением вектора \vec{H} . Особенностью силовых линий магнитного поля является то, что они замкнуты. Такие поля получили название вихревых или соленоидальных полей.

Земля имеет собственное магнитное поле. Направление его вектора напряженности \vec{H} вблизи поверхности Земли определяется его магнитным склонением φ , т.е. углом между вертикальной плоскостью, проходящей через вектор \vec{H}_z , плоскостью географического меридиана и магнитным наклоном i , т.е. углом между вектором H_z и плоскостью горизонта. Величина вектора напряженности магнитного поля Земли обычно характеризуется ее горизонтальной составляющей H_{30} . Величины H_{30} , i и L называются элементами земного магнетизма. Все они подвержены медленным изменениям. В настоящее время для Москвы $H_{30} = 13,5$ А/м, $\varphi = +5^\circ 42'$, $i = 69^\circ 39'$

Для измерения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в данной работе используется тангенс-буссоль, которая содержит магнитную

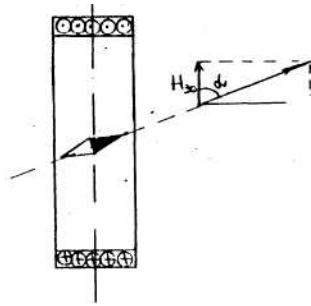


Рис. 1. Тангенс-буссоль

стрелку, помещенную на вертикальной оси в центре большой, вертикально расположенной катушки радиуса R , имеющей N витков.

Под действием горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли стрелка расположится, в плоскости магнитного меридиана. Установим тангенс-Рис, I. Тангенс-буссоль буссоль таким образом (рис. I), чтобы, плоскость витков катушки также совпала с плоскостью магнитного меридиана (вдоль направления магнитной стрелки).

При пропускании по виткам катушки электрического тока возникает "магнитное поле. Его напряженность можно найти, пользуясь законом Био-Савара-Лапласа.

$$dH = \frac{Idl \sin \varphi}{4\pi r^2}$$

где I - ток, протекающий по проводнику бесконечно малой длины dl (произведение Idl называется элементом тока); (φ - угол между направлением элемента тока и радиус-вектором \vec{r} , проведенным от элемента тока к точке, в которой вычисляется поле.

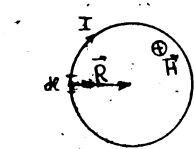


Рис. 2. Круговой виток

Определим напряженность магнитного поля в центре кругового витка с током (рис. 2). В данном случае радиус-вектор R перпендикулярен элементу тока и $\sin \varphi = 1$. Элементарное поле, создаваемое элементом

тока, равно:
$$dH = \frac{Idl}{4\pi R^2}$$

Полное поле в центре витка найдем суммированием элементарных полей, создаваемых всеми элементами тока Idl , которые в данном случае имеют одно и то же направление:

$$H \int dH = \int_0^{2\pi R} \frac{I}{4\pi R^2} dl = \frac{I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{I}{2R}$$

Интеграл взят по всей длине окружности витка с током. Если плоская катушка содержит N витков, то в соответствии с принципом суперпозиции полей, поля отдельных витков складываются. Поэтому в центре катушки магнитное поле имеет напряженность:

$$H = \frac{IN}{2R} \quad (\text{А/м})$$

Направление вектора \vec{H} можно найти, пользуясь правилом правого винта (буравчика). Для тока, показанного на рис. 2, вектор H направлен от нас за рисунок.

Под действием этого поля магнитная стрелка стремится расположиться перпендикулярно плоскости катушки. Таким образом, магнитная стрелка оказывается одновременно под действием двух магнитных полей: горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_{30} и магнитного поля кругового тока катушки H . В результате стрелка повернется на некоторый угол α (меньший 90°) от плоскости магнитного меридиана, как показано на рис. 1. Угол α тем больше, чем больше сила тока I . Из рисунка видно, что $H_{30} = H/\text{tg}\alpha$ откуда находим окончательно:

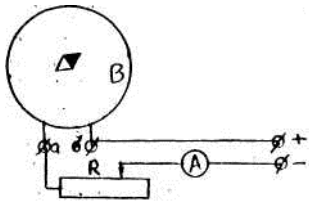
$$H_{30} = \frac{IN}{2R * \text{tg}\alpha}$$

Техника безопасности:

1. Не подключать к собранной схеме источники тока до проверки ее преподавателем или лаборантом.
2. Не производить переключений цепей, находящихся под напряжением.
Не прикасаться к неизолированным частям цепей.
3. Не оставлять без присмотра включенную схему.

Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 3, где В - тангенс-буссоль, А - амперметр, R. - реостат,
2. Установить плоскость витков катушки тангенс-буссоли вдоль



магнитного меридиана» т.е. вдоль направления магнитной стрелки* При этом необходимо следить за тем, чтобы на отклонение стрелки *не влияло близкое соседство железных или других магнитных предметов и проводов с током.

Рис. 3. Схема установки

3. Установить реостат в среднее положение, включить ток и отрегулировать реостатом его силу так, чтобы стрелка отклонилась на угол $\alpha = 30^\circ$. Отсчет угла α производится от плоскости витков,

4. Определить силу тока по амперметру и записать в таблицу 1.

5. Аналогичные измерения произвести при других значениях силы тока. Рекомендуется задавать силу тока такой, чтобы угол α , был равен $45, 60^\circ$.

6. Изменив направление тока в цепи путем переключения проводников на клеммах « а » и «б» тангенс-буссоли, провести измерения согласно пунктам 2-5.

7. Вычислить величину H_{30_i} , используя среднее значение силы тока для данного угла.

8. По вычисленным значениям H_{30_i} , найти среднеарифметическое значение \bar{H}_{30} и рассчитать среднеквадратическую погрешность измерений $m_{\bar{H}_{30}}$.

Вычисляют среднеквадратическую погрешность по формуле

$$m_{\bar{H}_{30}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{H}_{30} - H_{30_i})^2}{n(n-1)}},$$

где n - число измерений; H_{30_i} - вычисленное значение H_{30} в результате i -ГО измерения.

Таблица 1

Угол отклонения	Сила тока, А			H_{30_i} Т	\bar{H}_{30}
	для одного	для другого	Средняя		
30°					
45°					
60°					

Контрольные вопросы

1. Как на основании полученного результата для H_{30} вычислить вертикальную составляющую магнитного поля Земли и получить величину напряженности магнитного поля Земли над Москвой?
2. Расскажите, как с помощью закона Био-Савара-Лапласа найти магнитное поле произвольной системы токов в некоторой точке пространства.
3. Напишите формулы для магнитной индукции на расстоянии r от длинного прямого провода с током I ; в центре кругового витка радиусом R с током I .
4. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля (закон полного тока).
5. Рассчитайте циркуляцию вектора H вдоль силовой линии прямого тока.

6. Литература

1. Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму. М: МИИГАиК, 2006.
2. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).
3. Трофимова Т.И., Курс физики (любое издание).

7. Лабораторная работа № 254

ИЗУЧЕНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

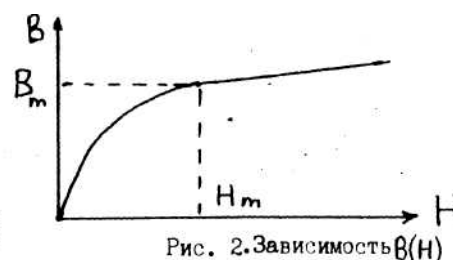
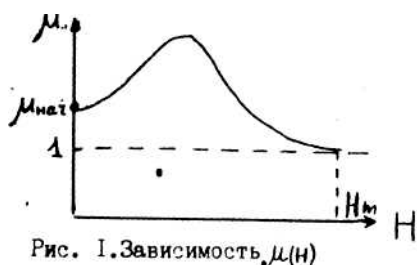
Приборы и принадлежности: лабораторная установка с тороидальным трансформатором на кольцевом сердечнике, осциллограф, генератор сигналов звуковой частоты.

Краткая теория

Многие вещества, будучи помещенными в магнитное поле с индукцией \vec{B}_0 , изменяют величину этого поля, причем $\vec{B} = \mu \vec{B}_0$. Такие вещества называются магнетиками. Безразмерный коэффициент μ называется магнитной проницаемостью и характеризует степень изменения внешнего поля магнетиком. Обычно внешнее поле характеризуется напряженностью магнитного поля $\vec{H} = \vec{B}_0 / \mu_0$ где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, поэтому

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (1)$$

Изменение поля в веществе объясняется наличием дополнительного поля, создаваемого магнитными моментами молекул и атомов. Если величина магнитных моментов молекул не зависит от H , то при внесении в поле эти моменты ориентируются по H и усиливают поле. К таким веществам относятся, например, парамагнетики, для которых $(\mu - 1) \sim 10^{-(2-3)}$. Если же магнитные моменты молекул наводятся внешним полем, то они ориентируются против H и уменьшают поле. В этом случае $\mu < 1$, а такие вещества называют диамагнетиками. Для обоих этих типов магнетиков μ не намного отличается от единицы, а магнитные моменты молекул и атомов создаются в основном за счет орбитального движения электронов (токи Ампера). Для третьего класса



веществ, называемых ферромагнетиками (железо, никель кобальт), при не слишком высоких температурах μ может быть порядка тысячи и более. Это объясняется существованием в них областей с высокой степенью намагниченности за счет упорядоченной ориентации собственных магнитных моментов атомов. Существование таких областей - доменов - соответствует минимальной энергии атомной структуры. При отсутствии намагниченности образца магнитные моменты доменов ориентированы беспорядочно. Если же ферромагнетик помещен во внешнее магнитное поле, то магнитные моменты доменов стремятся повернуться по полю, тем самым увеличивая его. При достаточно большой величине внешнего поля магнитные моменты всех доменов направлены по полю, а ферромагнетик намагничен до насыщения. Из сказанного следует, что магнитная проницаемость ферромагнетика зависит от внешнего поля. Примерная зависимость μ и B от H изображена на рис. 1 и рис. 2.

Ход кривых легко понять, если наряду с формулой (1) использовать соотношение

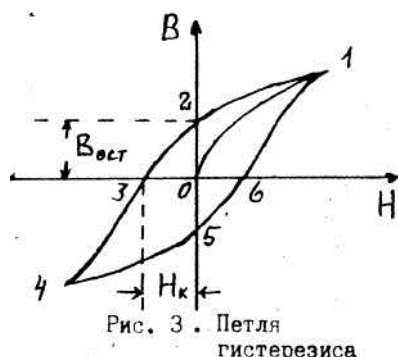
$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}), \quad (1a)$$

где \vec{J} - вектор намагниченности (магнитный момент единицы объема):

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{j}_i}{V}$$

\vec{j}_i - магнитные моменты отдельных доменов.

На участке $H = (0 \div H_m)$ суммарное поле, характеризуемое вектором магнитной индукции \vec{B} , растет довольно быстро, т. к. быстро возрастает \vec{J} .



При $H = H_m$ ферромагнетик намагничивается до насыщения $\vec{J} = const$ и далее B увеличивается довольно медленно, а зависимость от H на этом участке является линейной. Значение H_m зависит от температуры. При определенном для каждого ферромагнетика значении температуры T_k (точка Кюри) происходит разрушение доменов и ферромагнетик превращается в парамагнетик. Если намагнитить ферромагнетик до насыщения (точка 1 на рис. 3), а затем уменьшить напряженность поля до нуля, ферромагнетик будет иметь остаточную намагниченность $B_{ост}$ (точка 2). Чтобы индукция B стала равной нулю (точка 3), необходимо приложить обратное по направлению поле H_k величина которого называется коэрцитивной силой. При дальнейшем увеличении поля H ферромагнетик можно снова намагнитить до насыщения (точка 4). Повторяя весь процесс в обратном направлении, (кривая 4-5-6-1), получим замкнутую петлю гистерезиса. Полученная петля является максимальной. Если намагничивать ферромагнетик, не доводя его до насыщения, то получится семейство петель гистерезиса меньшего размера. Соединив вершины этих петель (точки 1), мы получим кривую намагничивания, показанную на рис. 2.

На перемагничивание ферромагнетика затрачивается энергия, идущая на его нагревание. За один цикл перемагничивания единицы объема ферромагнетика внешние силы совершают определенную работу A . Покажем, что эта работа численно равна площади петли гистерезиса (в единицах B и H , т.е. Тл \cdot А/м). Если по соленоиду или тороиду с

ферромагнитным сердечником идет ток I , то напряженность и индукция магнитного поля в сердечнике могут быть определены по формуле:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{N}}{l}, \quad \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (2)$$

где N - число витков соленоида, l - его длина.

Если ток в обмотке изменяется, то меняются H , B и потокосцепление (суммарный магнитный поток)

$$\Psi = N \cdot \Phi \quad (3)$$

где $\Phi = B S$ - магнитный поток через один виток с площадью S . Согласно общим правилам работа, необходимая для увеличения суммарного магнитного потока на величину $d\Psi$, равна

$$dA' = I \cdot d\Psi. \quad (4)$$

Учитывая, что $I = \frac{H \cdot l}{N}$ и $d\Psi = N \cdot S \cdot dB$, получаем

$$dA' = H \cdot l \cdot S dB \quad (5)$$

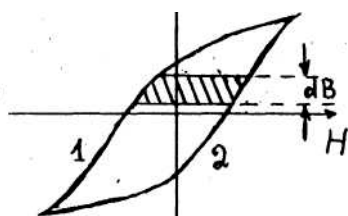


Рис. 4. Работа перемагничивания ферромагнетика

Разделив полученное выражение на объем ферромагнетика lS , получим работу, отнесенную к единице объема

$$dA = H dB \quad (6)$$

Общая работа за один цикл перемагничивания ферромагнетика может быть определена по формуле:

где функции $H_1(B)$ и $H_2(B)$ соответствуют кривым 1 и 2 на графике (рис. 4), величина $[H_1(B) - H_2(B)] \cdot dB$ есть площадь заштрихованной части петли, а площадь всей петли равна интегралу (7).

Целью данной работы является снятие кривой намагничивания и определение работы перемагничивания единицы объема ферромагнетика.

Для наблюдения петли гистерезиса используется установка, схема которой изображена на рис. 5. Образец из исследуемого ферромагнетика (феррита) изготовлен в виде тороида – «бублика» - с двумя обмотками. На первичную обмотку, включенную последовательно с сопротивлением R_1 подается

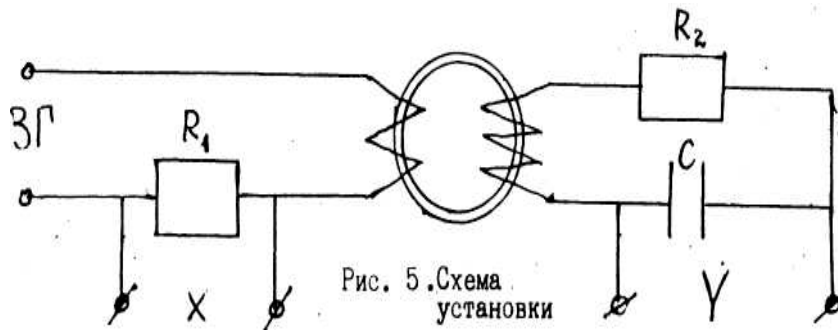


Рис. 5. Схема установки

напряжение от генератора сигналов звуковой частоты, которое можно регулировать ручкой "амплитуда выхода" генератора. Вторичная обмотка замкнута на интегрирующую цепочку, состоящую из сопротивления R_2 и конденсатора C . "Внешнее" магнитное поле H в ферромагнетике пропорционально току в первичной обмотке и, следовательно, падению напряжения на сопротивлении R_1 . Это напряжение подается на входа "X" осциллографа. Отклонение луча по оси "X" будет пропорционально H :

$$H = K_x \cdot x [A/m], \quad K_x = \frac{n_1 U_{x0}}{R_1}$$

где n_1 - число витков на единицу длины первичной обмотки, U_{x0} - напряжение, вызывающее отклонение луча на единицу длины на экране осциллографа по оси "x", X - размер изображения по оси "X".

Переменный магнитный поток, создаваемый в первичной обмотке, вследствие явления электромагнитной индукции наводит во вторичной обмотке переменную ЭДС

($\varepsilon \sim \frac{d\Psi}{dt}$). При этом индукционный ток во вторичной обмотке интегрируется

цепочкой $R_2 C$ и напряжение на конденсаторе C пропорционально магнитному потоку Ψ , который, в свою очередь, пропорционален магнитной индукции B . Напряжение U_y , подается на вход "Y" осциллографа, и отклонение луча по оси Y будет, следовательно, пропорционально B : где S_0 - площадь одной клетки координатной сетки в m^2 ; K_x и K_y определяются по формулам (8) и (9).

2) Подсчитывают относительную ошибку измерения A , которая в основном определяется неточностью ΔM в подсчете числа клеток:

$$\eta = \frac{\Delta A}{A} 100\% \cong \frac{\Delta M}{M} 100\%$$

Находят абсолютную погрешность $\Delta A = A \cdot \frac{\Delta M}{M}$.

Контрольные вопросы

1. Как объяснить линейный рост графика зависимости B от H ферромагнетике при достаточно больших H ?
2. Чем объяснить большое значение B в ферромагнетиках?
3. Нарисуйте вид "петли гистерезиса" для парамагнетика.
4. Как изменится площадь петли гистерезиса ферромагнетика при повышении температуры?
5. Почему при многократном перемагничивании ферромагнетик нагревается?

Литература

1. Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму. М: МИИГАиК, 2006.
2. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).

Лабораторная работа № 255 .

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

Приборы и принадлежности: лабораторная установка с соленоидом, источник питания, милливольтметр, амперметр.

Краткая теория

Соленоидом называется цилиндрическая катушка, содержащая большое, число витков провода, по которому идет ток. Если шаг винтовой линии проводника, образующего катушку, мал, то каждый виток с током можно рассматривать как отдельный круговой ток, а соленоид - как систему последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса, имеющих общую ось.

Магнитное поле внутри соленоида можно представить как сумму магнитных полей, создаваемых каждым витком. Вектор индукции магнитного поля внутри соленоида перпендикулярен плоскости витков, т.е. направлен по оси соленоида и образует с направлением кольцевых токов витков правовинтовую систему. Примерная картина силовых линий магнитного поля соленоида показана на рис. 1. Силовые линии магнитного поля замкнуты.

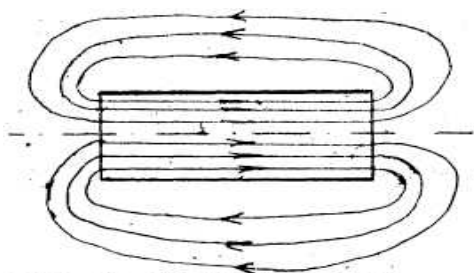


Рис. 1. Магнитное поле соленоида

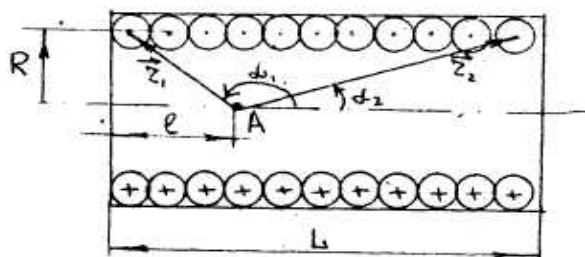


Рис. 2. Сечение соленоида

На рис. 2 показано сечение соленоида длиной L и с числом витков N и радиусом поперечного сечения R . Кружки с точками обозначают сечения витков катушки, по которым идет ток I , направленный от чертежа на нас, а кружки с крестиками - сечения витков, в которых ток направлен за чертеж.

Число витков на единицу длины соленоида обозначим $n = \frac{N}{L}$.

Индукция магнитного поля в точке А, расположенной на оси соленоида, определяется путем интегрирования магнитных полей, создаваемых каждым витком, и равна

$$B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n I (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (1)$$

где α_1 и α_2 - углы, образуемые с осью соленоида радиус-векторами \vec{r}_1 и \vec{r}_2 , проведенными из точки А к крайним виткам соленоида, μ - магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м магнитная постоянная.

Таким образом, магнитная индукция В прямо пропорциональна силе тока, магнитной проницаемости среды, заполняющей соленоид, и числу витков на единицу длины. Магнитная индукция также зависит от положения точки А относительно концов соленоида. Рассмотрим несколько частных случаев:

1. Пусть точка А находится в центре соленоида, тогда $l = L$, $\alpha_2 = 90^\circ$, $\cos \alpha_2 = 0$ и $B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n I (-\cos \alpha_2)$. Если соленоид достаточно длинный, то $\alpha_2 \rightarrow 0$, $\cos \alpha_2 \rightarrow 1$ и $B = \mu \mu_0 n I$ (2)

2. Пусть точка А находится в центре крайнего витка, тогда $l = L$, $\alpha_2 = 90^\circ$, $\cos \alpha_2 = 0$ и $B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n I (-\cos \alpha_2)$. Если соленоид достаточно длинный, то $\alpha_1 \rightarrow \pi$, $\cos \alpha_1 \rightarrow -1$ и $B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n I$ (3)

Из формул (2) и (3) видно, что магнитная индукция соленоида на его краю вдвое меньше по сравнению с ее величиной в центре.

3. Если длина соленоида во много раз больше радиуса его витков ("бесконечно" длинный соленоид), то для всех точек, лежащих внутри соленоида на его оси, можно положить $\alpha_1 = \pi$, $\alpha_2 = 0$. Тогда поле можно считать в центральной части соленоида однородным и рассчитывать его по формуле

$$B = \mu \mu_0 n I \quad (4)$$

Однородность магнитного поля нарушается вблизи краев соленоида. В этом случае индукцию можно определять по формуле

$$B = k\mu\mu_0 nI, \quad (5)$$

где k - коэффициент, учитывающий неоднородность поля.

Экспериментальное изучение магнитного поля соленоида в данной работе осуществляется с помощью специального зонда - маленькой катушки, укрепленной внутри штока с масштабной линейкой. Ось катушки совпадает с осью соленоида, катушка подключается к милливольтметру переменного тока, входное сопротивление которого много больше сопротивления катушки-зонда. Если через соленоид идет переменный ток $I(t) = I_m \cos 2\pi\nu t$ стандартной частоты ($\nu = 50$ Гц), то внутри соленоида и на его краях индукция переменного магнитного поля изменяется по закону (см. (5)):

$$\vec{B} = \vec{B}_m \cos 2\pi\nu t$$

Амплитуда магнитной индукции B_m в этой формуле зависит от положения точки внутри соленоида. Если поместить в соленоид катушку-зонд, то в соответствии с законом электромагнитной индукции, в ней возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt}, \quad (6)$$

где N_1 - число витков в катушке, S - площадь поперечного сечения катушки, Φ - магнитный поток ($\Phi = B \cdot S$, т.к. ось катушки совпадает с осью соленоида и, следовательно, вектор магнитной индукции \vec{B} перпендикулярен плоскости поперечного сечения катушки.).

Так как величина индукции B изменяется по закону $B = B_m \cos \omega t$, $\omega = 2\pi\nu$, то из (6) получается формула для расчета ЭДС:

$$\varepsilon = N_1 S \omega B_m \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что амплитуда ЭДС ε_m зависит от B_m . Таким образом, измеряя амплитуду ЭДС, можно определить B_m :

$$B_m = \frac{\varepsilon_m}{N_1 S \omega} \quad (8)$$

Коэффициент k учитывающий неоднородность магнитного поля соленоида на краях, можно определить, по формуле (5), зная B_m и I_m :

$$k = \frac{B_m}{\mu\mu_0 n I_m}, \quad (9)$$

где I_m - амплитуда переменного тока, идущего через соленоид.

Из формул (7) и (9) следует, что амплитуда ЭДС индукции прямо пропорциональна амплитуде переменного тока I_m :

$$\varepsilon_m = B_m N_1 S \omega = k \mu\mu_0 N_1 S \omega I_m \cdot n \quad (10)$$

Включенные в цепь переменного тока амперметр и милливольтметр измеряют действующие значения тока I_δ и ЭДС ε_δ , которые связаны с амплитудами I_m и ε_m соотношениями:

$$I_m = \sqrt{2} I_\delta ; \quad \varepsilon_m = \sqrt{2} \varepsilon_\delta$$

Для действующих значений тока и ЭДС формула (10) имеет вид

$$\varepsilon_\delta = k \mu\mu_0 N_1 n S \omega I_\delta \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что отношение $\varepsilon_\delta / I_\delta$ пропорционально коэффициенту K неоднородности индукции магнитного поля в точке соленоида, где проводятся измерения

$$K = \frac{1}{\mu\mu_0 N_1 n S \omega} \frac{\varepsilon_\delta}{I_\delta} = A \frac{\varepsilon_\delta}{I_\delta} \quad (12)$$

где A - коэффициент пропорциональности.

В данной работе требуется выполнить два задания: 1) определить распределение индукции вдоль оси соленоида при некотором постоянном значении тока; 2) определить значение коэффициента k .

Техника безопасности:

1. Не подключают/ самостоятельно источник питания и милливольтметр к сети 220 В.
2. Не производить переключения цепей, находящихся под напряжением.

Не прикасаться к неизолированным частям цепей.

3. Не оставлять без присмотра включенную схему.

Порядок выполнения работы

Задание № 1. Исследование распределения индукции магнитного поля вдоль оси соленоида.

1. Собрать измерительную цепь по схеме, приведенной на рис. 3. Для этого в цепь соленоида включить источник питания и амперметр, а к выводам катушки - зонда - милливольтметр (для измерения ε_δ) В данной установке катушка-зонд имеет следующие параметры: $N_1 = 200$ витков, $S = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, частота переменного тока $\nu = 50$ Гц, Число витков на единицу длины соленоида $n = 2400$ 1/м

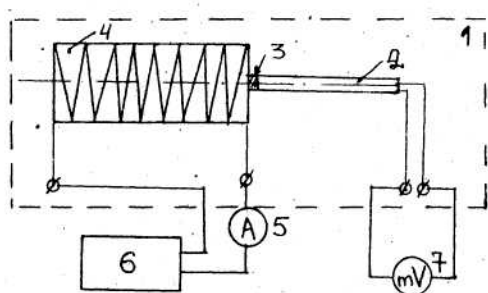


Рис. 3. Схема установки

напряжения (тока), 7- милливольтметр.

1- лабораторный штوك Z - штук «

2- катушка-зонд

3- соленоид

5- амперметр

6- источник питания с регулятором выходного

2. Установить штук с масштабной линейкой так, чтобы катушка-зонд оказалась примерно в середине соленоида.

3. Включить источник питания соленоида и установить ток соленоида (по амперметру), равный $I_\delta = 25 \text{ мА}$. Включить милливольтметр и после прогрева (5 мин) снять показания ε_δ .

4. Перемещая штук с масштабной линейкой, измерить при помощи милливольтметра действующее значение ЭДС индукции через каждый сантиметр положения линейки. По формуле (8) вычислить V_m .

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1 (учтите, что

$$\varepsilon_m = \sqrt{2} \varepsilon_\delta).$$

Таблица I

№ п/п	Положение линейки-Х	ε_{∂}	B_{mi}	ΔB_{mi}
1				
2				
3				
...				

Погрешность ΔB_{mi} в каждой точке, соленоида определяется как систематическая погрешность косвенных измерений:

$$\Delta B_{mi} = B_{mi} \sqrt{\left(\frac{\Delta \varepsilon_{\partial i}}{\varepsilon_{\partial i}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_1}{N_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \omega}{\omega}\right)^2},$$

где $\Delta S = 10^{-6} \text{ м}^2$, $\Delta N_1 = 1$ виток; $\Delta \nu = 1$ Гц; $\Delta \varepsilon_{\partial i}$ - погрешность измерения $\varepsilon_{\partial i}$; по милливольтметру.

5. Построить график $B_m = f(x)$

6. Зная амплитуду тока $I_m = \sqrt{2}I_{\partial}$ и число витков на единицу длины соленоида n , определить B_m в центре соленоида по формуле (4) и сравнить с измеренным в той же точке значением B_m

Задание 2. Измерение коэффициента неоднородности' магнитного поля соленоида.

1. Снять зависимость $\varepsilon_{\partial} = \varphi(I_{\partial})$ для данного соленоида. Для этого установить штوك в положение, когда катушка-зонд находится у края соленоидами, изменяя действующее значение тока I_{∂} соленоида с помощью источника питания, снять значения $\varepsilon_{\partial i}$ и $I_{\partial i}$ и занести в таблицу 2.

Таблица 2.

Измерен ия	I_{di}	ε_{di}	k_i	\bar{k}	$m_{\bar{k}}$	
1						
2						
3						
...						

По формуле (12) рассчитать $k_i = A \frac{\varepsilon_{di}}{I_{di}}$, где $A = \frac{1}{\mu\mu_0 N_1 n S \omega}$; $\mu = 1$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
2. Нарисуйте картину силовых линий соленоида.
3. Перечислите основные способы исследования магнитного поля.
4. В каких случаях для исследования магнитного поля можно использовать катушку-зонд?
5. Выведите формулу для вектора магнитной индукции бесконечно длинного соленоида.

Литература

3. Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму. М: МИИГАиК, 2006.
 4. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).
 5. Трофимова Т.И., Курс физики (любое издание).
-

Лабораторная работа № 256

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДОВ

Приборы и принадлежности: генератор сигналов звуковой частоты, цифровой вольтметр, ключ, два соленоида.

Краткая теория

При изменении магнитного потока Φ через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, в этом контуре возникает электродвижущая сила \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (t - \text{время}). \quad (1)$$

Магнитный поток Φ равен
$$\Phi = \int_S B_n dS, \quad (2)$$

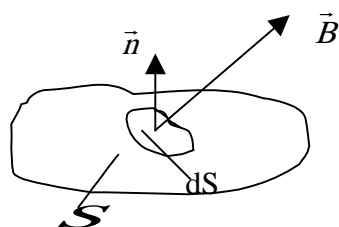


Рис. 1

где B_n - проекция вектора индукции магнитного поля на нормаль \vec{n} к плоскости контура, а интегрирование проводится по поверхности S , ограниченной этим контуром

(рис. 1).

Пусть изменение магнитного потока вызвано изменением внешнего магнитного поля, деформацией или перемещением контура. Тогда явление возникновения электродвижущей силы (ЭДС) в контуре называется электромагнитной индукцией. Если же изменяющийся магнитный поток создается током I , протекающим по контуру, то явление возникновения ЭДС в этом же контуре называется **самоиндукцией**. Как ЭДС индукции, так и ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_s определяется по формуле (1). Ток в контуре I создает поле, поток

вектора магнитной индукции которого через поверхность, ограниченную этим контуром, Φ (магнитный поток) равен

$$\Phi = L \cdot I \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности L между током и магнитным потоком называется индуктивностью контура. Индуктивность зависит от геометрических характеристик контура с током и магнитных свойств среды, в которой он находится. Если L не изменяется с течением времени, то, подставив (3) в (1), получим следующее выражение для ЭДС самоиндукции в контуре:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (4)$$

Суммарный магнитный поток через все витки соленоида Ψ (потокосцепление) также пропорционален силе тока в нем. Поэтому формула (3) остается справедливой и для соленоида, если в ней магнитный поток через виток Φ заменить на Ψ , а под L понимать индуктивность всего соленоида. Суммарная ЭДС самоиндукции в соленоиде, индуктивность которого L , определяется формулой (4).

Обычно любой элемент электрической цепи в некоторой степени обладает активным сопротивлением R , индуктивностью L , и емкостью C . Идеализированный элемент, у которого $C = R = 0$, а $L \neq 0$, называется *идеальной индуктивностью*; элемент, у которого $C = L = 0$, а $R \neq 0$ — *идеальным активным сопротивлением*. Аналогично определяется *идеальная емкость*.

При последовательном соединении двух идеальных индуктивностей L_1 и L_2 суммарная индуктивность системы L определяется соотношением

$$L = L_1 + L_2, \quad (5)$$

а в случае их параллельного соединения — формулой

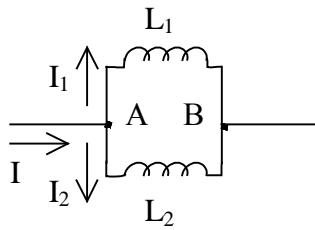


Рис. 2

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}. \quad (6)$$

Докажем формулу (6). Пусть I , I_1 и I_2 — сила тока, соответственно, через соединение индуктивностей, через первую и через вторую индуктивности (рис.

2). Тогда $I = I_1 + I_2$, то есть изменения этих токов связаны соотношением

$$dI = dI_1 + dI_2. \quad (7)$$

Так как активное сопротивление идеальных индуктивностей равно нулю, то из закона Ома для неоднородного участка цепи следует, что

$$U = -\mathcal{E}_{s1} = -\mathcal{E}_{s2} = -\mathcal{E}_s. \quad (8)$$

Здесь $U = \varphi_A - \varphi_B$ — разность потенциалов между точками А и В (рис. 2), а \mathcal{E}_{s1} , \mathcal{E}_{s2} и \mathcal{E}_s — ЭДС самоиндукции 1^{ой} и 2^{ой} индуктивности и их соединения. Поделим (7) на U и воспользуемся формулой (8):

$$\frac{dI}{-\mathcal{E}_s} = \frac{dI_1}{-\mathcal{E}_{s1}} + \frac{dI_2}{-\mathcal{E}_{s2}}. \quad (9)$$

Выразив \mathcal{E}_{s1} , \mathcal{E}_{s2} и \mathcal{E}_s в (9) с помощью формулы (4), получим искомую формулу (6).

Измерение индуктивности соленоида:

Если через идеальную индуктивность идет переменный ток $I = I_m \cos(2\pi\nu \cdot t + \varphi_0)$, то, согласно (4), в ней возникает ЭДС самоиндукции

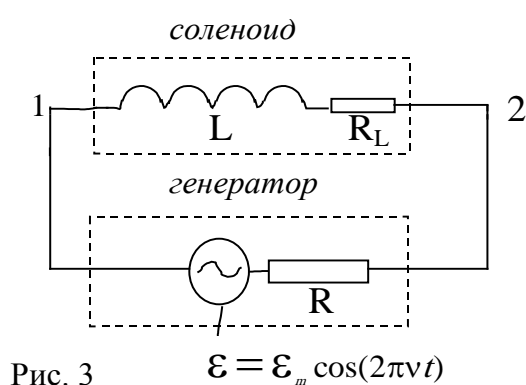
$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt} = 2\pi\nu L I_m \sin(2\pi\nu \cdot t + \varphi_0), \quad (10)$$

где ν и I_m — частота и амплитуда колебаний силы тока, а φ_0 — начальная фаза этих колебаний. Разность потенциалов между концами идеальной индуктивности $U(t)$ равна взятой с обратным знаком ЭДС самоиндукции, возникающей в ней (см. (8)). Поэтому, согласно (10), ее амплитуда определяется выражением

$$U_m = 2\pi\nu LI_m. \quad (11)$$

Для идеальной индуктивности коэффициент пропорциональности между амплитудой разности потенциалов U_m и амплитудой силы тока I_m называется индуктивным сопротивлением. Из (11) следует, что индуктивное сопротивление равно

$$X_L = 2\pi L\nu. \quad (12)$$



Реальный соленоид имеет как индуктивность L , так и активное сопротивление R_L . Его можно рассматривать как последовательное соединение идеальной индуктивности L и идеального активного сопротивления R_L . Подключим

соленоид к генератору, активное сопротивление которого R , а ЭДС изменяется с частотой ν (рис. 3), и рассмотрим частотную зависимость разности потенциалов U между концами этого соленоида (точки 1 и 2 на рис. 3). Пусть одновременно выполняются два условия: $X_L \gg R_L$ и $X_L \ll R$. Первое условие означает, что соленоид можно считать идеальной индуктивностью и рассчитывать амплитуду разности потенциалов U_m по формуле (11). При выполнении второго условия можно пренебречь вкладом индуктивного сопротивления соленоида в полное сопротивление цепи, вследствие чего амплитуда силы тока в цепи I_m не зависит от частоты ν :

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R}. \quad (13)$$

Здесь, \mathcal{E}_m и R — амплитуда ЭДС и активное сопротивление генератора. Подставив (13) в (11), получим следующее соотношение для амплитуды разности потенциалов:

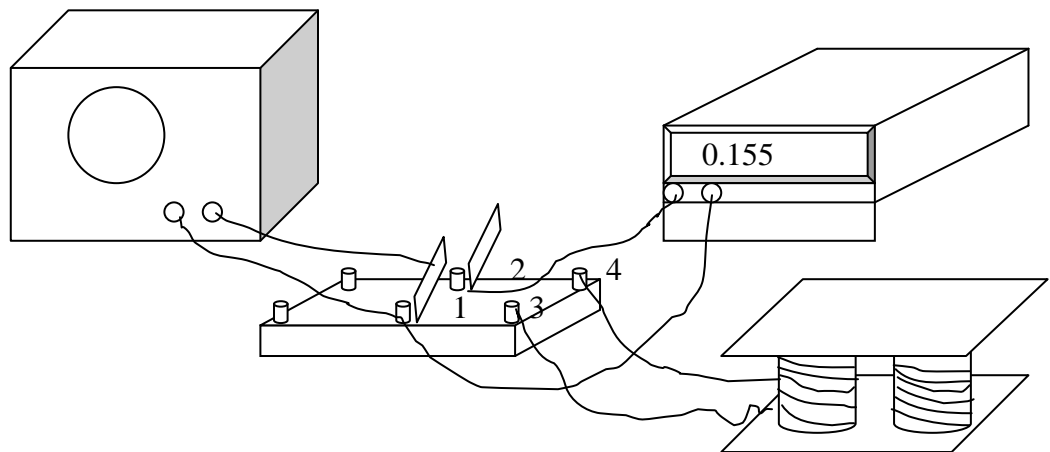
$$U_m = 2\pi L \nu \frac{\mathcal{E}_m}{R}. \quad (14)$$

Формула (14) остается справедливой, если в ней амплитуды разности потенциалов и ЭДС заменить их действующими значениями $U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и $\mathcal{E}_d = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$. После перехода к действующим значениям (14) принимает вид

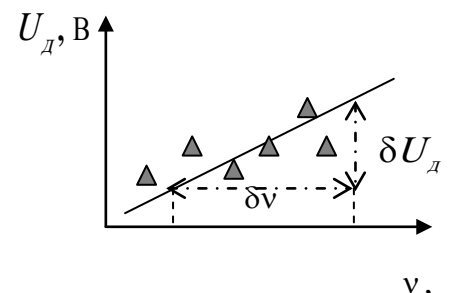
$$\begin{cases} U_d = A \cdot \nu, \\ A = \frac{2\pi \mathcal{E}_d L}{R}, \end{cases} \quad (15)$$

где при неизменных характеристиках генератора $A = const$. Таким образом, если $X_L \gg R_L$ и $X_L \ll R$, то, согласно (15), действующее значение разности потенциалов между концами соленоида U_d линейно зависит от частоты ν . Линейный участок зависимости $U_d(\nu)$ используется в данной работе для измерения индуктивности соленоида.

Порядок выполнения работы



1. Установите переключатель формы сигнала генератора, расположенный внизу слева, в верхнее положение (\sim). Это обеспечивает синусоидальное изменение ЭДС генератора с течением времени.
2. Подсоедините выход генератора "земля", "20" (ослабление в dB)¹ к средним клеммам ключа 1, 2.
3. К этим же клеммам (1, 2) подсоедините цифровой вольтметр. Выходы "земля" генератора и вольтметра, которые обозначаются $\overline{\perp}$ или $\underline{\perp}$, должны быть подсоединены к одной и той же клемме ключа.
4. К крайним клеммам ключа (3, 4) подсоедините соленоид.
5. Разомкните ключ. Включите генератор. Установите регулятор частоты генератора на 2000 Гц. Используя тумблер генератора "регулятор выхода", установите показание цифрового вольтметра примерно на 0.6 В. Запишите это значение (действующее значение ЭДС генератора \mathcal{E}_d).
6. Замкните ключ. Теперь цифровой вольтметр показывает действующее значение разности потенциалов между концами соленоида U_d . Измерьте его величину при значениях частоты генератора ν равных 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 Гц. Данные занесите в таблицу.
7. Разомкните ключ и отсоедините соленоид от ключа.
8. Поочередно подсоединяя к крайним клеммам ключа (3, 4), сначала второй соленоид, а затем последовательно и параллельно соединенные два соленоида, повторите измерения согласно пункту 6.
9. Постройте графики $U_d(\nu)$ для каждого соленоида и их соединений. Имейте в виду, что каждый график – это прямая, наиболее близко отстоящая от экспериментальных точек и проходящая через 0.



¹ Ослабление сигнала в децибелах, обозначаемых dB или дБ, численно равно значению выражения $10 \cdot \lg(A_0^2 / A^2)$, где A_0 и A — амплитуды, соответственно, исходного и "ослабленного" сигналов. Если это выражение равно 20, то $A_0 / A = 10$. Таким образом, при использовании выхода генератора "земля", "20" амплитуда его ЭДС уменьшается в 10 раз.

10. Определяя δU_d и δv с помощью графиков, рассчитайте индуктивность соленоидов и их соединений по формуле

$$L = \frac{1}{\epsilon_d} \frac{\delta U_d}{\delta v} \frac{R}{2\pi} \text{ (Гн)},$$

которая следует из формулы (15) ($R = 500 \text{ Ом}$).

11. Оцените погрешность измерения индуктивности ΔL по формуле

$$\frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_d}{\delta U_d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon_d}{\epsilon_d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\delta v}\right)^2},$$

где $\Delta U_d = \Delta \epsilon_d = 1 \text{ мВ}$ – систематическая погрешность измерения действующих значений разности потенциалов и ЭДС вольтметром, а $\Delta v = 100 \text{ Гц}$ – систематическая погрешность задания частоты генератора. Согласно приведенной формуле, для уменьшения погрешности, δU_d и δv следует определять с использованием точек экспериментальной прямой, которые максимально удалены друг от друга.

12. Используя значения индуктивности соленоидов L_1 и L_2 , полученные экспериментально, рассчитайте индуктивность их параллельного и последовательного соединений $L_{\text{пар}}$ и $L_{\text{посл}}$ по формулам (6) и (5) и сравните результаты расчетов с соответствующими измеренными значениями.

	U_d , В	v , Гц	L, Гн (эксперимент)	L, Гн по форм. (5) и (6)
1 ^{ый} соленоид	1)	1)		—

	5) ...	5) ...		
2 ^{ой} соленоид	1) 5) ...	1) 5) ...		—
Последовательное Соединение	1) 5) ...	1) 5) ...		
Параллельное соединение	1) 5) ...	1) 5) ...		

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитный поток? Чему равна ЭДС индукции?
2. Сформулируйте правило Ленца и приведите соответствующий пример.
3. Что такое индуктивность? Почему при изменении силы тока в соленоиде в нем возникает ЭДС? Чему она равна?
4. Сформулируйте правило Ленца применительно к явлению самоиндукции.
5. Получите формулу для индуктивности последовательного соединения идеальных индуктивностей.
6. Покажите, что амплитуда ЭДС самоиндукции в соленоиде является линейной функцией частоты колебаний силы тока в нем, если амплитуда колебаний силы тока не изменяется при изменении частоты.

Литература

- 6 . Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму.
М: МИИГАиК, 2006.
- 7 . Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).
- 8 . Трофимова Т.И., Курс физики (любое издание).

Лабораторная работа № 257

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд с колебательным контуром, генератор синусоидальных сигналов ГЗ-109, миллиампер Э-524, вольтметр ВЗ-38А.

Краткая теория

На рис. 1 изображен последовательный колебательный контур, состоящий из конденсатора, соленоида и резистора. Цель данной работы - изучение явления резонанса в колебательном контуре под действием внешней синусоидальной электродвижущей силы звуковой частоты.

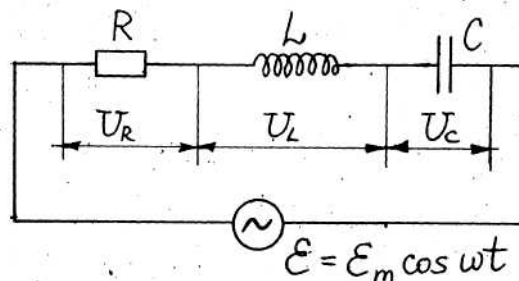


Рис. 1. Схема колебательного контура.

Рассмотрим процессы, происходящие в цепи, изображенной на рис.

1. При наличии переменной ЭДС с амплитудой ε_m

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t \quad (1)$$

в цепи возникнет переменный ток той же циклический (круговой) частоты $\omega = 2\pi\nu$ (ν - частота), что и приложенная ЭДС, но с некоторым сдвигом по фазе

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

Переменный ток вызовет на всех элементах цепи - резисторе сопротивлением R , соленоиде индуктивностью L , конденсаторе ёмкостью C , соответствующие падения напряжения U_R , U_L и U_C .

Напряжение на резисторе определяется законом Ома и равно:

$$U_R = IR = I_m \cdot R \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

Сдвиг фаз между колебаниями U_R и I , как видно из сравнения формул (2) и (3), равен нулю.

Переменный ток, текущий через соленоид индуктивностью L вследствие явления самоиндукции вызовет ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$$

Если считать индуктивность идеальной, т.е. активное сопротивление соленоида равным нулю, то в соответствии с законом Ома для участка, цепи, содержащего ЭДС, $U_L + \varepsilon_s = 0$. Напряжение на соленоиде U_L при этом будет равно ЭДС самоиндукции с обратным знаком, то есть;

$$U_L = -\varepsilon_s = L \frac{dI}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t - \varphi) = \omega L I_m \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

Как видно из (2) и (4), напряжение на соленоиде U_L опережает по фазе силу тока I на $\frac{\pi}{2}$. Величина $X_L = \omega L$ называется реактивным индуктивным сопротивлением, причем из (4)

$U_{Lm} = X_L \cdot I_m$, где амплитуда колебаний напряжения на соленоиде.

Протекание переменного тока через конденсатор ёмкости C можно трактовать как непрерывную перезарядку конденсатора, т.е. непрерывное изменение во времени заряда q на конденсаторе

$$\begin{aligned} q &= \int Idt = \int I_m \cos(\omega t - \varphi) dt = \\ &= \frac{I_m}{\omega} \sin(\omega t - \varphi) = \frac{I_m}{\omega} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (5)$$

При этом напряжение на конденсаторе, как известно, определяется отношением заряда конденсатора к его ёмкости:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) = U_{cm} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

Величина $U_{cm} = I_m / (\omega C)$ является амплитудой напряжения на конденсаторе. Величина $X_c = 1 / (\omega C)$ называется реактивным ёмкостным

сопротивлением, причём из (6) $U_{cm} = X_c \cdot I_m$. Из формулы (2) и (6) видно, что напряжение на конденсаторе U_C отстаёт по фазе от силы тока I на $\pi/2$.

По второму закону Кирхгофу для схемы, изображений на рисунке 1,

$$U_L + U_c + U_R = \varepsilon$$

или

$$L \frac{dI}{dt} + \frac{q}{C} + I \cdot R = \varepsilon_m \cos \omega t \quad (7)$$

Продифференцировав уравнение (7) по времени, получим

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{I}{C} + R \frac{dI}{dt} = -\varepsilon_m \omega \sin \omega t \quad (8)$$

или

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = -\frac{\varepsilon_m}{L} \sin \omega t \quad (9)$$

Введя в уравнение (9) коэффициенты затухания $\delta = \frac{R}{2L}$ и частоту собственных колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, получим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + 2\delta \frac{dI}{dt} + \omega_0^2 I = -\frac{\varepsilon_m \omega}{L} \sin \omega t \quad (10)$$

Решением этого дифференциального уравнения является

$I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$, где

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R} (\omega L - \frac{1}{\omega C}) = \frac{1}{R} (X_L - X_C) = \frac{1}{\omega RC} (\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1) \quad (12)$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ называется полным сопротивлением цепи;

φ - сдвиг колебаний между колебаниями внешней ЭДС и силой тока в цепи. Ток отстает от напряжения ($\varphi > 0$) или опережает его ($\varphi < 0$) в зависимости от соотношения между X_L и X_C . Если частота изменения ЭДС ω равна частоте собственных колебаний тока в контуре ($\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$), то $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. При этом $\varphi = 0$, то есть изменения тока и ЭДС происходят в фазе. В этом случае полное сопротивление Z становится минимальным и равным R , а амплитуда колебаний силы тока в цепи принимает максимальное значение. Напряжение на конденсаторе U_C и на соленоиде U_L становится одинаковыми по амплитуде и противоположными по фазе ($U_{Cm} = U_{Lm}$).

Рассмотренное явление называется резонансом токов. Из (11) следует, что амплитудное значение тока при резонансе $I_m = \varepsilon_m / R$. Амплитудное значение напряжения на конденсаторе при резонансе равно

$$U_{Cm} = \frac{I_m}{\omega_0 C} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \varepsilon_m = Q \varepsilon_m \quad (13)$$

Здесь $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ добротность контура. Если $Q > 1$, то при резонансе напряжения на соленоиде и на конденсаторе превышает в Q раз ЭДС ε , приложенную к цепи.

Отметим, что максимум амплитуды колебаний силы тока достигается при частоте ω_0 , а максимум амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе (резонанс напряжений) – при частоте $\sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$, несколько меньшей ω_0 . Однако если $\delta \ll \omega_0$ или

$$\frac{R}{2L} \ll \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

то это различие несущественно.

Описание установки.

В работе используются следующие приборы: генератор синусоидальных сигналов ГЗ-109; являющийся источником переменной ЭДС; миллиамперметр Э-524; вольтметр ВЗ-38А; а также колебательный контур, состоящий из резистора сопротивлением R_1 , соленоидом индуктивностью L , конденсатора емкостью C .

Схема включения приборов показаны на рисунках 2 и 3. Все элементы колебательного контура соединены между собой, поэтому студенту, выполняющему работу, необходимо правильно подсоединить только генератор, миллиамперметр и вольтметр к контуру.

Отметим, что фигурирующие в формулах (11) и (12) активное сопротивление R всей цепи складывается в установке из выходного сопротивления генератора, сопротивление резистора R_1 , активного сопротивления соленоида и соединительных проводов.

Перед началом выполнения работы необходимо

- переключатели генератора установить в положения:
 - “Множитель частоты” – 1
 - “Регулировка ВЫХ.” - 15 V
 - “Нагрузка, Ω ” - АТТ
- установить переключатель шкал вольтметра в положение 30V.
- установить переключатель шкал миллиамперметра в положение 100 мА.

ВНИМАНИЕ! Генератор ГЗ-109 и вольтметр ВЗ-38А необходимо включить в сеть напряжением 220 В с помощью стандартных сетевых вилок. При подключении соблюдайте осторожность. Включать приборы запрещается до проверки правильности подсоединения приборов лаборантом или преподавателем.

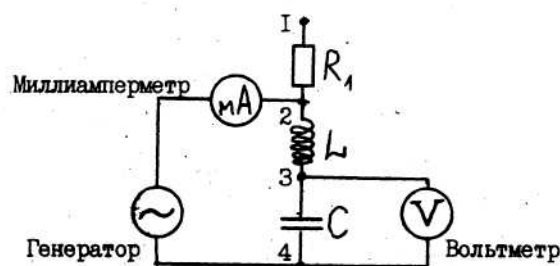


Рис. 2. Схема установки при $R_1 = 0$

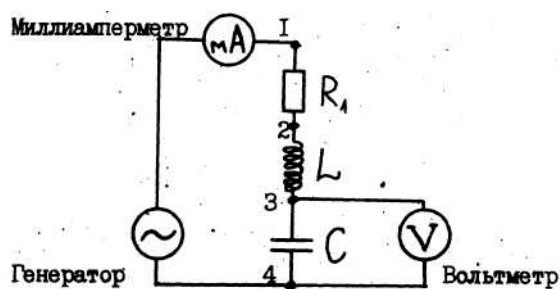


Рис. 3. Схема установки при $R_1 \neq 0$

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
5. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 2). После проверки электрической цепи лаборантом или преподавателем включите генератор и вольтметр. Изменяя частоту генератора ν от 20 до 200 Гц, убедитесь по вольтметру и миллиамперметру в наличии резонанса в колебательном контуре.
6. Установите частоту генератора, равную резонансной частоте контура, соответствующей максимуму тока. Далее установите ручкой плавной регулировки выходного напряжения генератора амплитуду ЭДС на выходе генератора такой, чтобы показания миллиамперметра находились в правой половине шкалы. При этом стрелочкой прибор на лицевой панели генератора покажет ε_0 - действующее значение ЭДС, отличающегося от амплитудного в $\sqrt{2}$ раз:

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}; \quad I_{\delta} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U_{\delta} = \frac{U_{cm}}{\sqrt{2}}$$

Отметим, что стрелочные электроизмерительные приборы всегда показывают действующее значение силы тока I_{δ} и напряжения U_{δ} , а не амплитудное значение этих величин.

7. Изменяя частоту генератора ν от 20 до 200 Гц, снимите зависимость действующего значения силы тока $I_{\delta}(\nu)$ и напряжения на конденсаторе $U_{\delta}(\nu)$ от частоты (не менее чем для 15 точек с меньшим интервалом частот вблизи резонанса). Результаты запишите в табл. 1.
8. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 3), при этом в контур добавлен резистор R_1 . Выполните действия по пункту 3. Результат измерений запишите в таблицу 2.
9. Постройте график зависимости $I_{\delta}(\nu)$ и $U_{\delta}(\nu)$ для двух случаев: $R_1=0$ и $R_1 \neq 0$.
10. По графику $I_{\delta}(\nu)$ определите резонансную частоту ν_0 , а также $I_{рез}$ и $U_{рез}$ - действующее значение силы тока в контуре и напряжение на конденсаторе при $\nu = \nu_0$ для случаев $R_1=0$ и $R_1 \neq 0$.
11. Определите C , L и Q по следующим формулам:

$$C = \frac{I_{рез}}{2\pi\nu_0 U_{рез}} \quad L = \frac{U_{рез}}{2\pi\nu_0 I_{рез}} \quad Q = \frac{U_{рез}}{\varepsilon_{\delta}} \quad (14)$$

Результаты вычислений запишите в таблицу 3.

Контрольные вопросы

1. Что такое резонанс напряжений?
2. Что такое действующее значение силы тока, напряжения?
3. Объясните вид полученных графиков.
4. По полученным данным рассчитайте сумму выходного сопротивления генератора и активного сопротивления соленоида.

5. От каких параметров схемы зависит добротность контура?
6. Выведите формулы (14)
7. Выведите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и приведите его решение.

Литература

- 9 . Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму. М: МИИГАиК, 2006.
- 10 . Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).
- 11 . Трофимова Т.И., Курс физики (любое издание).

Лабораторная работа N 260.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В
КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы: измерение и расчет параметров колебательного контура.

Приборы к принадлежности: лабораторная установка ФПЭ-10/11, источник питания, преобразователь импульсов ПИ/ФПЭ-09, генератор ГЗ-112/1, осциллограф С1-73.

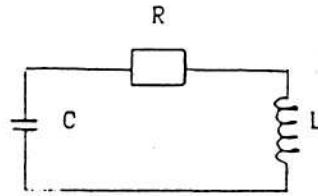
Краткая теория.

Рассмотрим идеальный колебательный контур, содержащий конденсатор емкостью C и катушку с индуктивностью L . В такой системе могут возникать колебания электродинамических величин, таких как сила, напряжение, заряд на конденсаторе. Пусть в начальный момент времени у нас есть заряженный конденсатор, который мы подсоединяем к катушке. Конденсатор начинает разряжаться, через витки катушки начинает идти ток. Ток постепенно убывает, вследствие уменьшения заряда на конденсаторе. Если ток, идущий через катушку, меняется, то в ней возникает явление самоиндукции, т.е. возникает ЭДС самоиндукции и индукционный ток, направленный, по правилу Ленца, так, чтобы скомпенсировать причину изменения тока. Следовательно, в случае уменьшения тока, возникший индукционный ток будет стремиться поддержать ток от конденсатора, т.е. будет сонаправлен с ним. Ток от конденсатора, проходя по цепи, сравнивает заряды на обеих пластинах конденсатора, т.е. разряжает его. Если бы в цепи протекал только он, то после полной разрядки конденсатора движение заряда в цепи прекратилось бы. Но существует еще дополнительный индукционный ток. Поэтому когда прекращается ток от конденсатора индукционный ток существует еще некоторое время и будет заново заряжать конденсатор, с обратным знаком. Когда

прекращается и он, мы возвращаемся к исходной ситуации – есть заряженный конденсатор и присоединенная к нему катушка индуктивности. Опять начинает разряжаться конденсатор

В замкнутом контуре, содержащем индуктивность, емкость C и активное сопротивление R (рис.1) могут возникать колебания электродинамических величин, при которых энергия, запасенная в контуре, постепенно рассеивается в тепло.

рис. 1



Согласно второму правилу Кирхгофа, сумма напряжений на всех участках, составляющих данный контур, равна нулю:

$$L * dI / dt + I * R + q / c = 0$$

Используя определение силы тока $I=dq/dt$, последнее уравнение можно записать в виде:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0 \quad (2)$$

Введем следующие обозначения:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{собственная частота колебаний}$$

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad \text{коэффициент затухания} \quad (3)$$

С учетом введенных обозначений запишем уравнение (2) в виде:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0 \quad (4)$$

Рассмотрим два случая:

$$1) \quad \text{при } \beta < \omega_0 \quad (\text{т. е. } \frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC})$$

общим решением дифференциального уравнения (4) будет функция

$$q(t) = q_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + a) \quad (5)$$

$$\text{где } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (6)$$

q_0 , a – постоянные, называемые обычно начальной амплитудой и начальной фазой колебаний соответственно. Полученный тип изменения заряда во времени называется затухающими колебаниями, причем параметр ω является круговой частотой колебаний, а величина $1/\beta$ определяет промежуток времени, спустя который амплитуда колебаний уменьшится в “ e ” раз. Разделив (5) на емкость C , получаем зависимость напряжения на конденсаторе от времени (см. рис. 2) :

$$U = U_0 \exp(-\beta * t) \cos(\omega * t + a) \quad (7)$$

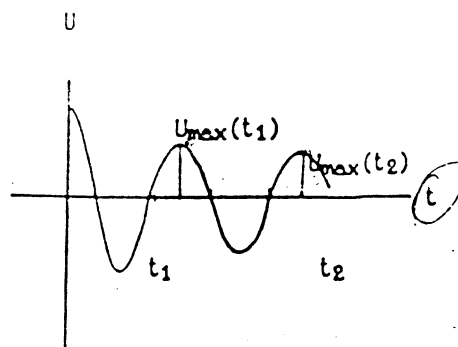


Рис. 2

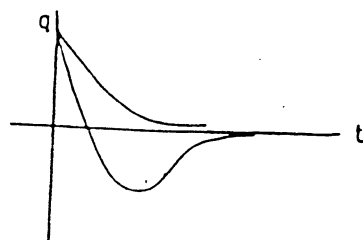
Рассмотрим теперь случай $\beta > \omega_0$. Общее решение оказывается равным сумме двух затухающих экспонент

$$q(t) = C_1 \exp(-\lambda_1 t) + C_2 \exp(-\lambda_2 t)$$

$$\text{где } \lambda_1 = -\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}, \quad \lambda_2 = \beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}, \quad (8)$$

а C_1 и C_2 – вещественные постоянные, значения которых зависят от начальных условий ($q(t=t_0), \frac{dq}{dt}(t=t_0)$). На рис. 3 показана примерная форма аperiодических решений (8) при различных соотношениях между C_1 и C_2 .

рис. 3



Важной характеристикой затухающих колебаний является логарифмический декремент Λ , определяется как натуральный логарифм отношения двух последовательных максимальных отклонений в одну и ту же сторону:

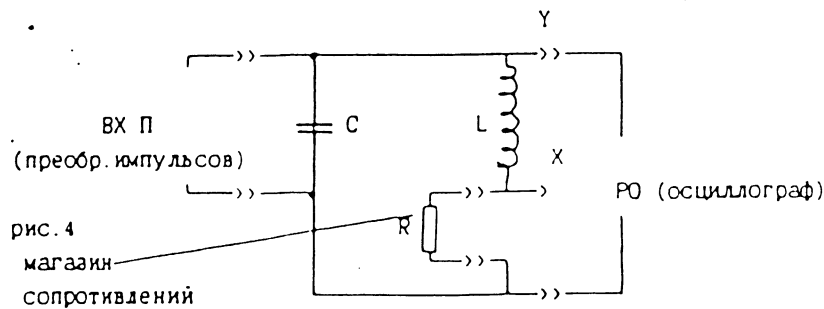
$$\Lambda = \ln \frac{U_{\max}(t_1)}{U_{\max}(t_2)} \quad (9)$$

из формулы (8) следует, что при $\beta \ll \omega_0$

$$\Lambda = \beta \cdot T \quad (10)$$

4. Метод измерений и описание установки.

Принципиальная схема модуля лабораторной установки ФПЭ10/11 приведена на рис. 4



Модуль содержит элементы колебательного контура: емкость C и индуктивность L . К гнездам R подключается магазин сопротивлений. Преобразователь импульсов (модуль ФПЭ-ПИ/09) осуществляет периодическую зарядку конденсатора прямоугольными импульсами, которые подаются на гнезда "ВХ П".

Затухающие колебания напряжения на конденсаторе наблюдаются на экране осциллографа (РО) при подключении его входа $У$ к соответствующим гнездам РО модуля ФПЭ-10/11.

Общее сопротивление контура равно

$$R_{\text{общ}} = R + R_{\text{к}} \quad (11)$$

где R - сопротивление магазина, а R_k - сопротивление катушки.

Параметры колебательного контура (емкость C и индуктивность L) могут быть определены следующим образом. Для различных значений сопротивления магазина R определяются значения логарифмического декремента Λ .

При малых значениях сопротивления R , (для данной установки $R < 700 \text{ Ом}$ $\omega_0^2 > \beta^2$, и логарифмический декремент линейно зависит от сопротивления R магазина (см. рис. 5):

$$\Lambda = \beta T = (T/2L)R_{\text{общ}} = (TR_k/2L) + (T/2L) * R \quad (12)$$

или

$$\Lambda = aR + b,$$

где коэффициенты a и b равны

$$a = T/2L, \quad b = TR_k/2L.$$

Построив график зависимости $\Lambda(R)$, можно определить коэффициент a (см. рис. 5):

$$a = \frac{\Lambda_2 - \Lambda_1}{R_2 - R_1}$$

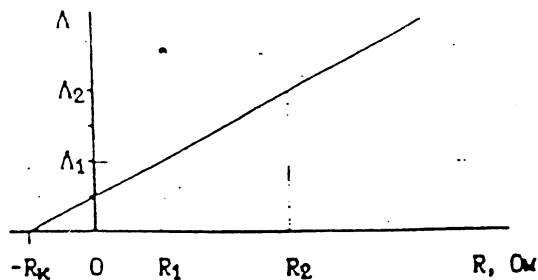


Рис. 5

Из чего видно, что сопротивление катушки R_k можно определить, аппроксимируя экспериментально найденную зависимость $\Lambda = \Lambda(R)$ до пересечения с осью абсцисс $\Lambda = 0$. Далее, зная период колебаний T , можно определить индуктивность катушки L по формуле:

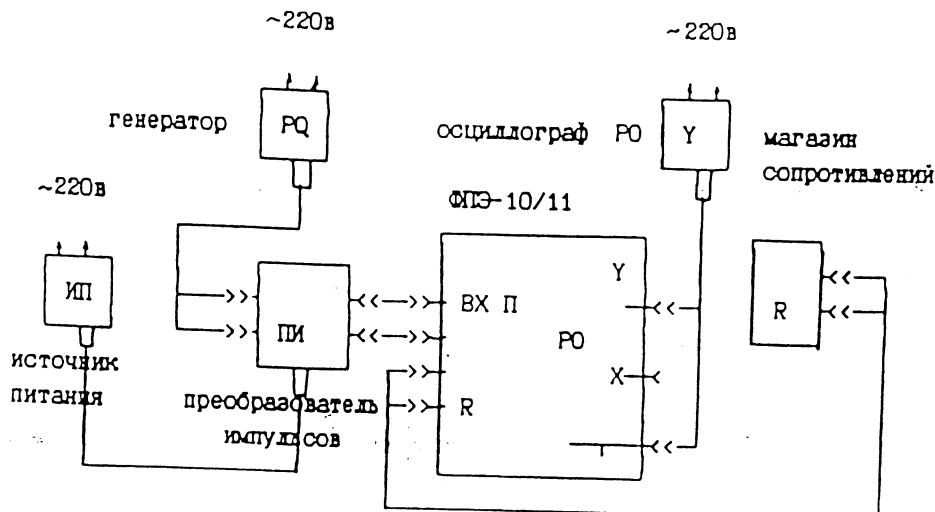
$$L = \frac{T}{2a} \quad (13)$$

а емкость C из равенства:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad \text{т. е. } C = \frac{T}{4\pi^2 L} \quad (14)$$

5. Порядок выполнения работы.

1. Соберите электрическую схему (принципиальная электрическая схема лабораторной работы приведена на рис. 6)
2. Включите лабораторный стенд; при этом должна загораться сигнальная лампочка «сеть».
3. Включите генератор сигналов (PQ)/ Установите частоту выхода на 250 Гц.
4. Включите источник питания (ИП)
5. На преобразователе импульсов (ПИ, модуль ФПЭ-ПИ/09) нажмите клавишу «скважность грубо».
6. На магазине сопротивлений установит $R=100$ Ом
7. Включите осциллограф. Ручками «U/дел», «синхр.», «уровень» получите устойчивую картину колебаний на экране.



8. Используя переключатель коэффициентов развертки, получите на экране изображение 5-6 периодов затухающих колебаний.
9. Измерьте в делениях вертикальной шкалы экрана амплитуды

колебаний $U_0(t)$ и $U_n(t+nT)$, где n (число периодов, разделяющих амплитуды $U_0(t)$ и U_n) можно выбрать из соображений удобства.

10. Измерьте в делениях горизонтальной шкалы длительность промежутка времени nT (обозначены $t_n = nT$).

11. Перепишите со шкалы осциллографа в табл. 1 значения коэффициента развертки по оси X (K_x , м сек/дел.).

12. Повторите измерения по пунктам 6-11 при сопротивлении магазина $R=200, 300, 400, 500$ Ом.

13. Результаты измерений занести в табл. 1.

14. Для каждого значения сопротивления R магазина вычислите значения периода колебаний T по формуле:

$$T = \frac{t_n}{n} k_x$$

R, Ом	n	U_1 , дел	U_n , дел	K_x , мс/дел	t_n , дел	T	Λ
100							
200							
300							
...							

15. Для каждого значения сопротивления магазина R вычислите значения логарифмического декремента Λ по формуле $\Lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{U_0(t)}{U_n(t+nT)}$.

Результаты запишите в табл. 1

16. По полученным величинам логарифмического декремента Λ и сопротивления магазина R постройте график зависимости $\Lambda = \Lambda(R)$, имея в виду то обстоятельство, что каждое значение логарифмического декремента вычислено с некоторой ограниченной точностью. Поэтому стройте прямую $\Lambda = \Lambda(R)$ так, чтобы примерно одинаковое количество точек оказывалось как выше, так и ниже прямой.

17. Определите по графику величину сопротивления катушки R_k .

18. Определите угловой коэффициент a в зависимости $\Lambda(R) = aR + b$.
19. Используя формулы (13) и (14), рассчитайте значения индуктивности L и емкости C .
20. Постепенно увеличивая сопротивления магазина R (т. е. устанавливая значения 800 Ом, 1000 Ом, 2000 Ом), наблюдайте переход колебаний в апериодический режим. Зарисуйте получившиеся картины в тетрадь.

6. Контрольные вопросы и задания.

1. Какими дифференциальными уравнениями описываются собственные затухающие колебания?
2. Каков физический смысл параметров, входящих в эти уравнения?
3. Как выглядит общее решение затухающих колебаний, если:
 - а) $\beta > \omega_0$
 - б) $\beta < \omega_0$
4. Что называется логарифмическим декрементом затухания?
5. Выведите формулу (10) при условии $\beta < \omega_0$.

Литература.

12. Скорохватов Н.А. Курс лекций по электромагнетизму. М: МИИГАиК, 2006.
13. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 2 (любое издание).
14. Трофимова Т.И., Курс физики (любое издание).