

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ФИЗИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению лабораторных работ по физике
для студентов технических специальностей
дневной и заочной форм обучения**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Часть III

В методических указаниях приведено описание лабораторных работ по разделу физики «Электричество», по темам: «Осциллографические измерения», «Закон Ома в линейных цепях гармонического тока», «Гармонические токи и напряжения в R, L, C-элементах», «Измерение элементарного заряда. Вольт-амперная характеристика».

Лабораторная работа «Измерение элементарного заряда» предлагает методику определения заряда электрона на основе физики полупроводников. Физической моделью лабораторной работы является германиевый p-n переход; математической – формула Шюкли. Стенд для выполнения лабораторной работы реализован электронным устройством, работающим под компьютерным программным управлением, позволяющим снимать вольт-амперные характеристики полупроводниковых и резистивных элементов.

Лабораторная работа «Осциллографические измерения» ориентирована на получение студентом практических навыков работы с цифровым осциллографом, развитию умений деятельности по инструкции.

Лабораторные работы «Закон Ома в линейных цепях гармонического тока» и «Гармонические токи и напряжения в R, L, C-элементах» посвящены изучению электрических процессов в линейных гармонических цепях, имеют разные подходы. Первая – более ориентирована на графический метод изучения учебного материала; вторая – аналитический. Тем не менее, оба подхода используются в обеих лабораторных работах, но способы представления знаний о работе электрических цепей с гармоническим током несколько различны.

Методические указания могут использоваться для студентов технических специальностей факультетов: электронно-информационных систем, инженерных систем и экологии, строительного и машиностроительного факультетов, факультета заочного обучения.

Составители: Л. А. Величко, к. ф.-м. н., доцент
Н. Н. Ворсин, к. ф.-м. н., доцент
К. М. Маркевич, ст. преподаватель.

Рецензент: Б. П. Кац, к. ф.-м. н., доцент УО «Брестский государственный университет» им. А. С. Пушкина

СОДЕРЖАНИЕ

Э – 18. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	4
Э – 19. ЗАКОН ОМА В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ ГАРМОНИЧЕСКОГО ТОКА ...	11
Э – 20. ГАРМОНИЧЕСКИЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В R, L, C - ЭЛЕМЕНТАХ.....	22
Э – 21. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДА. ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	31

Э – 18 ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель работы: получить навыки и умения работы с осциллографом.

Приборы и оборудование: генератор гармонических сигналов, осциллограф, четырехполосник.

Теоретические сведения

Осциллограф – электронный прибор, позволяющий наблюдать изменение напряжения с течением времени. Если осциллограф двухканальный, то можно одновременно наблюдать два электрических процесса. Например, когда объектом исследования является электрическая цепь, где имеется вход и выход, то двухканальный прибор позволяет исследовать как входной, так и выходной сигналы, производить их измерение. На основе косвенных измерений осциллографом можно измерять и др. величины: ток, сопротивление, частоту, сдвиг фазы, силу, момент инерции, скорость и т. д. Изменение напряжения во времени может быть представлено графиком. Именно графики: $U = f(t)$ позволяет наблюдать осциллограф. По оси Y осуществляется измерение напряжения, по оси X – времени. Рассмотрим на примере автоматизированного контрольно-измерительного прибора АКИП 4115/1А, как это осуществлять. В отличие от традиционного осциллографа, большинство измерительных операций он осуществляет в автоматизированном режиме.

Докомпьютерный осциллограф – электронная система на основе электронно-лучевой трубки, работа которого описывается аналоговой электроникой. Развитие электронной техники привело к появлению цифровой электроники, которая позволила в значительной степени не только повторить достижения аналоговой, но и превзойти их во многих показателях. Появилась возможность любой аналоговый прибор реализовать в виде компьютерной системы. АКИП 4115/1А является цифровым прибором, реализующим модель аналогового осциллографа с гораздо большими возможностями, чем его прототип. В дальнейшем этот прибор будем именовать осциллографом, поскольку он моделирует именно осциллограф, но реализован средствами цифровой техники.

Справа, на передней панели прибора установлены органы управления, слева – экран. На экране – графики двух сигналов (каналов) с отображением основных величин этих графиков. Смысл некоторых обозначений экрана (рисунок 1):

$CH1 = 2,00V$ – В/дел по оси Y для канала 1;

$CH2 = 2,00V$ – В/дел по оси Y для канала 2;

$M 2,5 \mu s$ – время/дел по оси X для обоих каналов;

$f = 50,0773 \text{ KHz}$ – частота исследуемого сигнала.

Масштаб осей X и Y позволяет определять ряд параметров графиков обоих каналов. Некоторые параметры графиков указываются в правой части экрана, после нажатия кнопки «ИЗМЕР» (синяя зона экрана). Проверьте, как эти данные, полученные автоматически, согласуются с измерениями по клеткам. В верхней левой части экрана приведены результаты сдвига фаз между сигналами каналов 1 и 2 по времени, которые также легко проверяются данными

масштаба оси X. Рассмотрим некоторые органы управления прибора, которыми будем пользоваться при выполнении лабораторной работы.

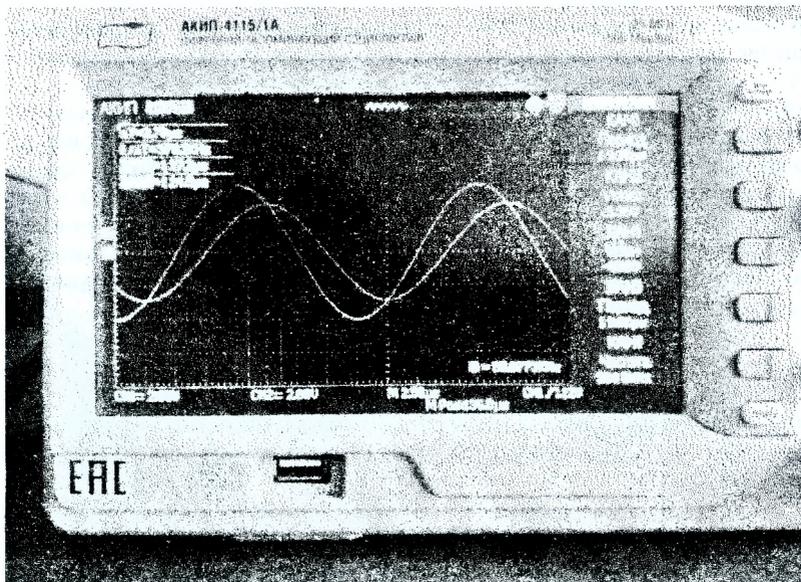


Рисунок 1 – Экран осциллографа АКИП 4115/1А

Вывод информации на экран осциллографа

Между кнопками «МЕНЮ» и «ПЕЧАТЬ» находятся 5 кнопок, позволяющих вывести на экран некоторые параметры графиков. Нажатие такой кнопки высвечивает подменю для каждого канала по тем физическим размерностям, которые на экране против кнопки. Оператор выбирает интересующий параметр, нажимает кнопку и получает на экране численное его значение.

Внешние подключения и сигнал калибровки (в правой нижней части передней панели управления).

Разъемы КН1 и КН2 – входы осциллографа для канала 1 и 2 соответственно.

Разъем «ВНЕШ СИНХР» – ввод сигнала внешней синхронизации.

Выход сигнала калибратора (прямоугольные импульсы частотой 1 кГц) выдает эталонный сигнал для оценки качества измерений по оси X осциллографа.

Для измерений надо получить осциллограмму, позволяющую снимать данные наибольшей точности, что достигается кнопками и регуляторами, расположенными справа от экрана. Эта зона управления условно разделяется на подзоны, которые в дальнейшем будем называть зонами.

Зона «ВЕРТИК» – подключение исследуемых сигналов к двухканальной измерительной системе осциллографа и управление измеряемыми сигналами по оси Y с целью приведения их к виду, удобному для измерений.

«КН1» – кнопка/индикатор подключения канала 1, «КН2» – канала 2. Позволяют активизировать измерения по каналу 1 либо 2, либо по обоим каналам одновременно (рисунок 2).

«Смещение» в зоне «ВЕРТИК» – кнопка/регулятор для каждого канала. Вращение регулятора производит смещение осциллограммы по вертикальной оси Y. Нажатие на регулятор – установка смещения в нулевое значение.

«В-мВ» – регулятор/кнопка, которая осуществляет настройку осциллограммы по оси Y таким образом, чтобы на экране прибора видеть размах измеряемого сигнала (разницу между U_{\max} и U_{\min}). Вращением регулятора устанавливаем коэффициент отклонения для измеряемого напряжения по оси Y в режиме «грубо». Нажатие на регулятор переводит измерение в режим «плавно». Результаты измерений в режимах «грубо»/«плавно» отображаются в экранном меню. Для возврата в режим измерения «грубо» еще раз нажимаем регулятор.



Рисунок 2 – Органы управления осциллографом

«МАТЕМ» – кнопка/индикатор «вкл/выкл» меню, позволяющего совершать математические операции над графиками обоих каналов.

«ОПОРН» – кнопка/индикатор «вкл/выкл» меню записанных опорных осциллограмм. Опорные осциллограммы – это записанные в памяти прибора, которые могут быть использованы в исследованиях.

Зона «ГОРИЗОНТ» содержит органы управления для измеряемых сигналов по оси X.

«Смещение» в зоне «ГОРИЗОНТ» – кнопка/регулятор для смещения осциллограммы по оси X и для установления ее в нулевое положение нажимаем регулятор.

«с-нс» – регулятор/кнопка, которой устанавливаем на экране число периодов измеряемого сигнала, что реализуется установлением времени развертки по оси X. Вращение регулятора изменяет значение коэффициента развертки. Нажатия (может быть 3) на регулятор переводят измерения в режим «растяжки» осциллограммы, с указанием диапазона растяжки. 3-е нажатие – возврат в исходное состояние осциллограммы.

«Гориз. меню» – кнопка/индикатор «вкл/выкл» горизонтального меню для управления растяжкой изображения осциллограммы.

Зона «СИХХР» – органы управления синхронизации (совпадения частоты измеряемого сигнала с частотой развертки экрана по оси X).

«Уровень» – регулятор/кнопка: при вращении производит изменение уровня запуска синхронизации по параметру напряжения. Нажатие регулятора производит установку уровня синхронизации равным 0 мВ.

«Меню синхр» – индикатор/кнопка. При нажатии кнопки появляется меню для возможных методов синхронизации осциллографа.

«Уст. на 50 %» – индикатор/кнопка. При нажатии синхронизация устанавливается по уровню 50 % от амплитуды исследуемого сигнала.

«Форс» – кнопка, нажатие которой приводит к сбросу результатов измерений, усреднений и пр. и перезапуску сбора информации.

Зона «МЕНЮ» и «УСТАНОВКА» (верхняя часть измерительной панели прибора).

«Измерение» – индикатор/кнопка «вкл/выкл» «Меню измерений». «Меню: вкл/выкл» – включает/выключает отображение меню на экране. На рисунке 1 (режим «вкл») – это зона синего цвета, где отражены некоторые величины осциллограмм обоих каналов. Против каждого параметра – кнопка; ее активация выводит на экран «подменю», из которого выбираем последовательным нажатием этой же кнопки нужную нам процедуру измерений. Альтернативный выбор этой процедуры возможен регулятором «Установка».

«Установка» – многофункциональный регулятор/кнопка; в отсутствии всплывающего меню этот регулятор осуществляет регулировку яркости линий развертки экрана. При наличии всплывающего меню этим регулятором выбираем интересующее нас и срочно нажимаем кнопку «Установка»; ибо через 5–10 сек. после выбора параметра осциллограф сам осуществляет автовыбор.

«Курсоры» – кнопка-индикатор, «вкл/выкл» меню управления курсорами. Их два: А и В, расстояние между ними по оси Y – вольты (мВ); по оси X – секунды (мс, мкс, нс). При активации этой кнопки в меню предлагается измерение напряжения или времени. Выбираем ту величину, которую собрались измерять. Далее передвигаем с помощью регулятора «Установка» курсоры А и В в те точки, между которыми хотим провести измерение (напряжения или времени). Включение курсора А или В осуществляется клавишами, находящимися на против синей зоны экрана. Результаты измерений и сопутствующая информация, полученная на основе курсоров, появляются в специальном окне в верхней левой части экрана. На рисунке 1 курсоры (вертикальные) находятся в режиме измерения времени. Они не совпадают с измерительной сеткой экрана, но примерно отстают друг от друга на величину одной клетки (2,7 μ s), в то время как ширина клетки 2,5 μ s.

«Сбор инф» – кнопка/индикатор «вкл/выкл» меню сбора информации об исследуемых сигналах. Повторное нажатие кнопки выключает меню.

«Зап. выз» – кнопка/индикатор вызова меню запись/воспроизведения профилей и осциллограмм. Повторное нажатие кнопки убирает меню.

«Дисплей» – кнопка/индикатор «вкл/выкл» меню управления качеством изображений экрана.

«Утилиты» – кнопка/индикатор «вкл/выкл» меню утилит.

Зона «Измерения однократных сигналов» (верхняя правая часть панели управления).

«Пуск/стоп» – запуск и остановка режима однократного измерения сигнала).

«Однокр» – кнопка/индикатор, однократное нажатие на кнопку выключает сбор информации осциллографом, двукратное нажатие кнопки переводит прибор в режим ожидания однократного импульса. Запуск системы синхронизации произойдет только с приходом внешнего однократного сигнала.

Стенд для осциллографических измерений

Изучение осциллографических измерений будем проводить в соответствии с блок-схемами рисунка 3. Рисунок 3 а – позволяет исследовать задаваемые генератором напряжения различной частоты и формы; рисунок 3 б – исследовать четырехполюсник по входным/выходным напряжениям (сигналам).



а) – генератора напряжений; б) – входных/выходных сигналов четырехполюсников (например, R, L, C-цепей)

Рисунок 3 – Стенд для исследования

Порядок выполнения лабораторной работы

Задание 1. Выставление генератором гармонических напряжений заданной амплитуды, частоты и начальной фазы. Согласно блок-схеме, (рисунок 3а) подключите генератор напряжений (ГН) ко входу канала 1 и активируйте соответствующую кнопку. Используя масштаб (вольт/дел, время/дел), задайте на экране осциллографа напряжения:

$$u = 5 \sin(314t) \text{ В};$$

$$u = 10 \sin\left(1500t + \frac{\pi}{3}\right) \text{ В}.$$

Для этого:

– изучите на передней панели генератора, как установить необходимую частоту выходного сигнала и регулировать его амплитуду. Рассчитайте частоту сигнала первого уравнения и выставите ее генератором;

– регулятором зоны «ВЕРТИК» «В-мВ» добейтесь, чтобы на экране наблюдался максимально возможный размах синусоиды;

– регулятором «с-нс» из зоны «ГОРИЗОНТ» установите такое «окно» частот, чтобы на экране видеть 2–3 периода напряжения. Если осциллограмма движется в горизонтальном направлении (не синхронизирована), остановите ее регулятором «УРОВЕНЬ» из зоны «СИНХР».

В такой же последовательности действий выставите другое напряжение. Осциллограммы изобразите в отчете в графическом виде.

Задание 2. Измерение параметров осциллограмм на основе «курсоров». Воспользуйтесь инструкцией управления «Курсорами» и проведите измерения амплитуды U_m и периода колебаний T второго сигнала. Сравните их с этими же параметрами, измеряемыми осциллографом.

Задание 3. Исследование амплитудных и временных параметров РС-цепи. Соберите блок-схему (рисунок 3б; с.8). Объект исследования - четырехполосник (рисунок 13б; с.18). Задайте максимальное выходное напряжение генератора (регулятор «~» ПН) и снимите параметры четырехполосника согласно таблице 3. Величины R и C задает преподаватель.

Таблица 3

f, кГц	0,05	0,5	1,0	10,0	50,0	100,0	200,0	400,0
U_{max} , В								
U_{min} , В								
$K=U_{max}/U_{min}$								
Δt , С								
$\Delta\phi$, град								

По результатам исследования постройте зависимости: $K = \varphi(f)$ и $\Delta\phi = \gamma(f)$.

Задание 4. Используя кнопку «МАТЕМ», активизируйте у прибора математические функции. Проверьте на практике выполнение операций сложения и вычитания гармонических сигналов. В качестве сигналов используйте данные амплитуд задания 3 для частоты $f = 1$ кГц (или по заданию преподавателя). Результаты исследования оформите в виде графиков.

Задание 5. Исследование прямоугольных импульсов.

1. Вернитесь к блок-схеме (рисунок 3а). Переключите вход осциллографа с гармонического сигнала на прямоугольные импульсы. Получите осциллограмму прямоугольных импульсов с частотой $f =$ (по заданию преподавателя) кГц и амплитудой $U_m =$ (по заданию преподавателя) В.

2. Нажмите кнопку «ИЗМЕРЕНИЯ» осциллографа, после чего появятся основные параметры осциллограммы; далее нажмите любой параметр – высветится меню возможных измерений (Время. Напряжения. Задержка. Все измерения). Выбираем «Задержка» – высвечивается подменю (Период. Частота. Длительность. Время нарастания. Сквозность и т. д). Измерьте все параметры заданного импульсного напряжения, в соответствии возможностей меню. Уясните смысл проведенных измерений. Изобразите график импульса в течение одного периода с указанием полученных временных параметров.

Задание 6. Снятие амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) генератора гармонических сигналов: $U_m = \varphi(f)$ (рисунок 3а). Установите максимальное выходное гармоническое напряжение генератора и измерьте уровень амплитуд выходного сигнала U_m для указанных частот f .

Таблица 1 – Данные исследования АЧХ генератора.

f , кГц	0,05	0,5	1,0	10,0	50,0	100,0	200,0	400,0
U_m , В								

Постройте график. Сделайте выводы по результатам исследования АЧХ.

Задание 7. Исследование логарифмического ослабителя напряжений (аттенюатора) ГН. Задайте гармонический сигнал с $U_m=15$ В и $f=1$ кГц. Измерьте выходные напряжения ГН для всех положений переключателя «дВ». В положении «дВ» 0 аттенюатор выключен. По результатам исследования сделайте выводы о работе аттенюатора.

Таблица 1 – Данные исследования аттенюатора ГН

дВ, дБ	0	10	20	30	40	50	60
$U_{\text{вых}}$, В	15						
$U_{\text{вых}}$, В							
$K=U_{\text{вых}}/U_{\text{пвх}}$							
20Lg K							

Контрольные вопросы

1. Отличия традиционного осциллографа и измерителя серии АКИП.
2. Возможности АКИП 4115/1А в измерении параметров сигналов.
3. Сущность синхронизации и методы ее реализации в приборе.

Отчет по работе

1. Название лабораторной работы.
2. Цель.
3. Приборы и оборудование.
4. Порядок выполнения работы.
5. Выводы.

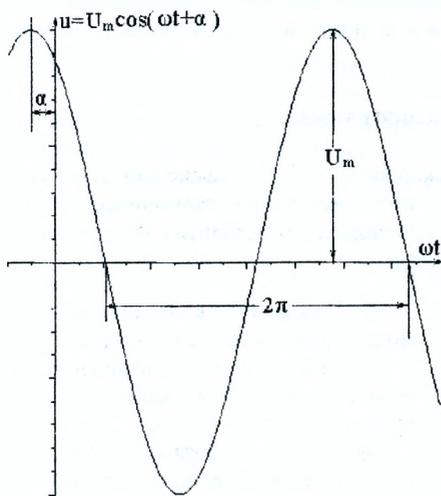
Э – 19 «ЗАКОН ОМА» В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ ГАРМОНИЧЕСКОГО ТОКА

Цель работы: теоретически и экспериментально изучить основные свойства электрических цепей, в которых протекают гармонические токи, и метод их анализа.

Приборы и оборудование: генератор гармонических сигналов, осциллограф, набор конденсаторов, катушек индуктивностей и резисторов, транспортёр.

Теоретические сведения

Классический закон Ома $U = I \cdot R$ устанавливает связь постоянного напряжения U , приложенного между концами металлического проводника и тока I , протекающего по этому проводнику. Коэффициент пропорциональности R назван сопротивлением проводника. В цепях переменного (гармонического) тока, состоящих из линейных элементов: резисторов R , конденсаторов C и катушек индуктивности L , связь мгновенных значений токов и напряжений определяется дифференциальными уравнениями, неудобными для технического использования.



Однако амплитуды этих напряжений и токов связаны соотношением прямой пропорциональности и по внешнему виду похожи на закон Ома: $U_m = I_m \cdot Z$. Данные соотношения часто называют законом Ома для переменных токов и напряжений, хотя, строго говоря, такая терминология неправильна. Коэффициент пропорциональности Z называют сопротивлением переменному току.

Напомним, что переменные (гармонические, синусоидальные) токи i , напряжения u , ЭДС-е выражаются тригонометрическими функциями времени t . Эти выражения имеют следующий вид:

Рисунок 1 – График временной зависимости переменного напряжения $u = U_m \cos(\omega t + \alpha)$

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad u = U_m \cos(\omega t + \alpha) \quad e = E_m \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

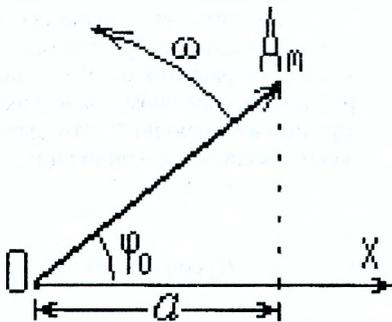
Для определенности на рисунок 1 показан график зависимости от времени (точнее, от пропорциональной времени величины ωt) переменного напряжения $u(t)$. Там же показаны значения параметров амплитуды U_m и начальной фазы α . **Амплитуда** – это экстремальное отклонение от нуля гармонической величины (в данном случае – напряжения). Начальную фазу можно определить по графику, измерив смещение максимума относительно нулевого значения времени (величины ωt).

Как правило, мгновенные значения переменных во времени величин обозначаются строчными (маленькими) буквами, а амплитуды – прописными (большими) буквами с подстрочным индексом m . Аргументы косинусов в (1) называются фазами гармонических величин: $\omega t + \varphi$ – фаза тока, $\omega t + \alpha$ – фаза напряжения, $\omega t + \theta$ – фаза ЭДС. Фазы зависят от времени t по линейному закону, коэффициент пропорциональности ω называется угловой частотой, а значение фазы в нулевой момент времени ($t = 0$) – начальной фазой. В (1) φ – начальная фаза тока, α – начальная фаза напряжения, θ – начальная фаза ЭДС. Угловая частота ω связана с обычной частотой f , которая выражает число колебания в единицу времени, простой формулой $\omega = 2\pi f$.

Угловая частота напряжения в бытовой электросети равна 314 1/с, вычислите частоту изменения напряжения в сети. Анализ цепей переменного тока осуществляется помощью правил Кирхгофа, которые требуют суммирования токов в узлах и напряжений на контурах цепи. В цепях переменного тока, где напряжения и токи выражаются функциями косинуса или синуса такие суммирования являются громоздкой задачей. Однако удалось заменить суммирование тригонометрических функций суммированием векторов, изображающих эти функции. Это упростило задачу анализа и позволило сопровождать решение наглядными диаграммами.

Векторная диаграмма

Вращение с постоянной угловой скоростью ω – это также гармонический колебательный процесс. Данный факт позволяет любой гармонический процесс, выражаемый функцией косинуса или синуса, представить в виде проекции на неподвижную ось вращающегося вектора.



A_m – амплитуда колебания, она же модуль вращающегося вектора;

ω – угловая скорость вращения вектора, она же угловая частота моделируемого колебания;

φ_0 – начальная фаза колебания, она же положение моделирующего вектора в момент времени $t = 0$.

Проекция вращающегося вектора A_m на ось x будет изменяться во времени по закону:

$$a = A_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2)$$

Рисунок 2 – Моделирование колебания вращающимся вектором

т. е. выражает закон гармонических колебаний.

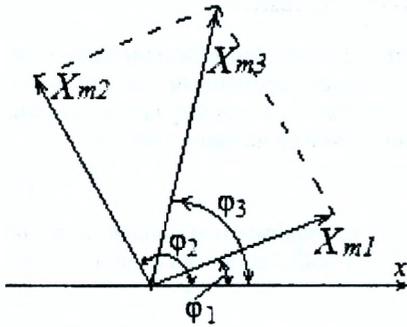


Рисунок 3 – Суммирование колебаний с помощью векторной диаграммы

Если какое-либо колебание является суммой двух колебаний: $x_3(t) = X_{m1}\cos(\omega t + \varphi_1) + X_{m2}\cos(\omega t + \varphi_2)$, то на диаграмме достаточно изобразить только векторы складываемых колебаний в момент времени $t = 0$ и для получения вектора суммарного колебания в этот момент сложить векторы складываемых. В результате графически определяется амплитуда суммарного колебания – X_{m3} и его начальная фаза – φ_3 (рисунок 3). Этих параметров достаточно для определения суммарного колебания (3):

$$x_3(t) = X_{m3}\cos(\omega t + \varphi_3). \quad (3)$$

Таким образом, суммирование гармонических величин заменилось суммированием изображающих векторов. Рассмотрим простейшие цепи переменного тока и метод вычисления токов и напряжений в них.

Переменный ток в резисторе (рисунок 4). Переменное напряжение $u_R = U_m\cos(\omega t)$ создаст через резистор переменный ток, который определится законом Ома (4):

$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{U_m}{R} \cos(\omega t) = I_m \cos(\omega t) \quad (4)$$

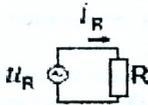


Рисунок 4 – Резистор под действием переменного напряжения

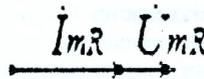


Рисунок 5 – Векторная диаграмма напряжения и тока в резисторе

Коэффициент при $\cos(\omega t)$ – это амплитуда тока: $I_m = U_m/R$. Соотношение между амплитудами напряжения и тока выражается законом Ома. Разность фаз между напряжением и током равна нулю, следовательно, векторы напряжения и тока на диаграмме совпадут по направлению (рисунок 5). На диаграмме векторы обозначены как амплитуды изображаемых величин, но сверху ставится точка.

Воздействие переменного напряжения на конденсатор (рисунок 6). К обкладкам приложено переменное напряжение: $u_c = U_m\cos(\omega t)$. Заряд конденсатора $q = uC$, а ток, проходящий через конденсатор (5):

$$i_C = \frac{dq}{dt} = -U_m \omega C \sin(\omega t) = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (5)$$

В этом выражении $I_m = U_m \omega C$ – амплитуда тока. При действии на конденсатор переменного напряжения по нему протекает переменный ток той же частоты. Фаза тока превышает фазу напряжения на $\pi/2$, а амплитуда тока связана с амплитудой напряжения формулой, внешне похожей на закон Ома (6):

$$I_m = U_m \omega C \quad (6)$$

По этой причине величину ωC называют проводимостью конденсатора по переменному току, а обратную величину $X_C = 1/\omega C$ – сопротивлением конденсатора переменному току.

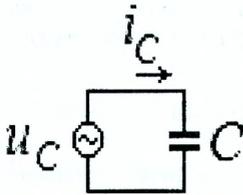


Рисунок 6 – Воздействие переменного напряжения на конденсатор

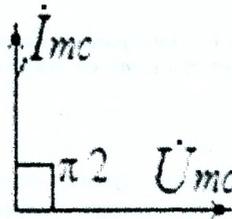


Рисунок 7 – Векторная диаграмма напряжения и тока в конденсаторе

Пусть не кажется удивительным тот факт, что конденсатор, обкладки которого разделены диэлектриком, пропускает переменный ток. Связанные заряды диэлектрика смещаются на малые расстояния переменным электрическим полем обкладок и совершают колебательное движение. Это движение представляет собой переменный ток, который течет в цепи конденсатора. Ток внутри конденсатора называется током смещения, поскольку он обусловлен смещениями зарядов диэлектрика.

Построим векторную диаграмму переменных напряжения и тока в конденсаторе (рисунок 7). При построении диаграмм первый вектор строится произвольно, остальные векторы относительно его достраиваются однозначно. Построим вектор u_C горизонтально. Согласно (5) вектор i_C должен быть повернут относительно вектора u_C на $\pi/2$ в положительном направлении.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока (рисунок 8). В этом случае переменное напряжение $u_L = U_m \cos(\omega t)$, приложенное к катушке, компенсируется ЭДС самоиндукции катушки. Это позволяет определить ток в катушке (7):

$$u_L = \frac{di_L}{dt}; \quad (7)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt = \frac{1}{L} \int U_m \cos(\omega t) dt = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t). \quad (8)$$

Амплитуда тока в катушке вновь связана с амплитудой напряжения формулой, похожей на закон Ома $I_m = U_m/\omega L$. Величину $X_L = \omega L$ называют сопротивлением

катушки индуктивности переменному току. Поскольку $\sin(\omega t) = \cos(\omega t - \pi/2)$, фаза тока в катушке будет на $\pi/2$ меньше, чем фаза напряжения на ней, что отражено на векторной диаграмме рис. 9.

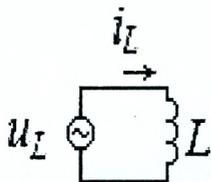


Рисунок 8 – Катушка индуктивности под действием переменного напряжения

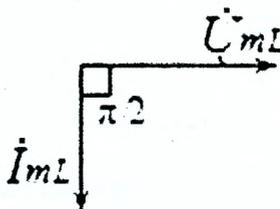


Рисунок 9 – Векторная диаграмма напряжения и тока в катушке индуктивности

Последовательная RLC-цепь (рисунок 10). Основная цель введения векторных диаграмм – упрощение суммирования колебаний. Рассмотрим такое суммирование на примере анализа цепи переменного тока, представляющей собой RLC-цепь – последовательный колебательный контур. Схема цепи показана на рисунке 10. Контур подключен к источнику гармонического напряжения u . Согласно второму правилу Кирхгофа сумма напряжений на элементах замкнутого контура должна быть нулевой (9):

$$u_c + u_r + u_L - u = 0. \quad (9)$$

Все величины суммы представляют собой синусоидальные колебания одинаковой частоты и просуммировать их можно суммированием соответствующих векторов. Будем проводить суммирование путем подрисовывания начала вектора очередного слагаемого к концу вектора предыдущего. Поскольку ток через все элементы контура один и тот же, первым построим вектор колебаний тока I_m (рисунок 11). Направим его горизонтально. Для всех элементов нам известны совместные положения векторов тока и напряжения. Построим векторы напряжений, одновременно суммируя их. Сумма векторов напряжений на L, R, C даст нам вектор напряжения источника U_m . После построения диаграммы можем воспользоваться теоремой Пифагора для вычисления амплитуды тока (10):

$$U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2 = U_m^2. \quad (10)$$

Подставим выражения амплитуд напряжений через амплитуду тока и получим формулу для амплитуды тока (11):

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (11)$$

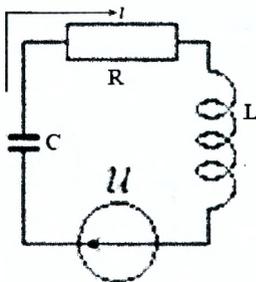


Рисунок 10 – Последовательный колебательный контур

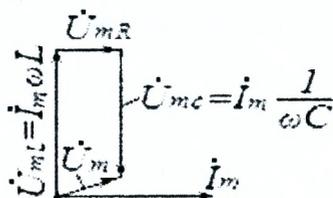


Рисунок 11 – Векторная диаграмма напряжений и тока в последовательном колебательном контуре

Осциллографирование гармонических напряжений, построение векторных диаграмм. В настоящей работе экспериментально исследуются процессы в простейших цепях гармонического тока. Источником гармонического напряжения является специальный прибор – генератор напряжения (ГН). Инструментом наблюдения исследуемых процессов является осциллограф – прибор, на экране которого можно наблюдать график зависимости от времени исследуемого напряжения. Это напряжение подается на вход вертикального отклонения – Y осциллографа, а горизонтальная ось X является осью времени. Используемый в работе осциллограф является двухканальным. Он позволяет одновременно получить на экране графики временной зависимости двух напряжений. График канала 1 рисуется желтым, а канала 2 – синим цветом. Кроме того, осциллограф измеряет и отображает на экране некоторые параметры изображаемых графиков, например, амплитуду, частоту, размах – разность максимума и минимума.

Очень удобным качеством осциллографа является возможность т. н. курсорных измерений. Курсор представляет собой линию, которую можно перемещать по экрану, добиваясь пересечения с выбранной точкой графика, при этом на экране пишется положение (координата) курсора. Используемый осциллограф создает одновременно 2 курсора и выдает координаты их на осциллограмме, а также разность координат. Тип курсоров, горизонтальные или вертикальные линии задаются с помощью меню в правой части экрана. Перемещение курсора осуществляется ручкой «Курсоры», а выбор перемещаемого курсора нажатием одной из двух нижних кнопок справа от экрана (рисунок 12).

Порядок выполнения лабораторной работы

Задание 1. Получение осциллограммы и определение характеристик переменного напряжения, вырабатываемого генератором гармонического сигнала.

В настоящей работе экспериментально исследуются процессы в простейших цепях гармонического тока. Источником гармонического напряжения является специальный прибор – генератор гармонического напряжения (ГН). Установленные на рабочем месте генератор и осциллограф уже соединены между со-

бой: переменное напряжение, вырабатываемое генератором, с помощью тройника подается на вход 1 канала осциллографа. Поэтому при включении питания генератора и осциллографа на экране должен появиться график временной зависимости выходного напряжения генератора (желтая синусоида).

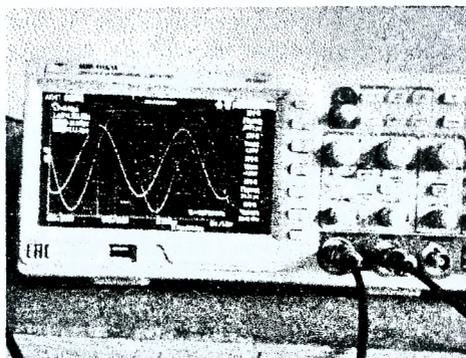


Рисунок 12 – Внешний вид осциллографа и осциллограмм

А) С помощью регуляторов амплитуды и частоты генератора установите удобные для наблюдения параметры графика: размер графика по вертикали – 2–3 клетки, 2–3 периода – по горизонтали.

Б) Измерьте амплитуду, размах, период, частоту напряжения генератора. Эти измерения можно сделать приближенно, измерив количество клеток, приходящихся на амплитуду по вертикали и на период – по горизонтали. Затем используя величины масштабов, отображаемых в нижней части экрана, вычислить амплитуду и период. Для точного измерения следует нажать кнопку «Измерения». В правой части экрана появится столбец данных о параметрах исследуемого напряжения (рисунок 12). Перерисуйте с экрана желтую синусоиду в тетрадь и укажите на рисунке величины периода, амплитуды, максимума, минимума и размаха осциллограммы.

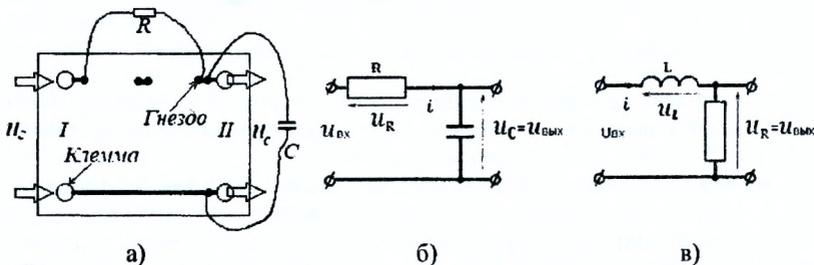
В) Нажмите кнопку «Курсоры», из появившегося меню выберите «время», на экране появится пара вертикальных линий, которые можно перемещать, вращая ручку «установка». Выбор перемещаемого курсора осуществляется нажатием одной из нижних кнопок справа от экрана. Одновременно в левой верхней части экрана отображаются величины моментов времени, которые соответствуют положениям курсоров и разность этих моментов. Совместите курсоры А и В с соседними максимумами синусоиды и укажите соответствующие моменты времени на вашем рисунке. Разность этих моментов ΔT должна быть равна измеренному ранее периоду синусоиды.

Задание 2. Сборка интегрирующей RC-цепи, измерение параметров напряжений, построение векторной диаграммы.

Все 4 пункта данного задания следует выполнять с особой тщательностью и аккуратностью.

Лабораторный макет (рисунок 13а) имеет две пары клемм, обозначенных как I и II. На пару I подается напряжение, вырабатываемое генератором, а с пары II снимается исследуемое напряжение для второго канала осциллографа. Соединения с генератором и вторым каналом осциллографа уже сделаны. Помимо клемм макет содержит соединенные с ними гнезда для подключения внешних элементов цепи. Для примера на рисунке 13 показан лабораторный макет с подключенными к его гнездам элементами: резистором R и конденсатором C. Данная цепь иногда называется интегрирующей (рисунок 13 б).

А) Соберите интегрирующую RC-цепочку согласно рисунку 13 б. На экране осциллографа появится синяя синусоида – график временной зависимости напряжения на конденсаторе. Регулировками канала 2 осциллографа установите удобные для наблюдения размер и положение этой синусоиды на экране. Установите на генераторе заданную преподавателем частоту изменения вырабатываемого напряжения. Регулировками осциллографа добейтесь устойчивой удобной для наблюдения картины, примерно такой, как на рисунке 14. Нажмите кнопку «Измерения» осциллографа.



а) – лабораторный макет подключения элементов электрической цепи;
 б) – схема интегрирующей RC-цепи; в) – схема интегрирующей RL-цепи
Рисунок 13 – Объект исследования

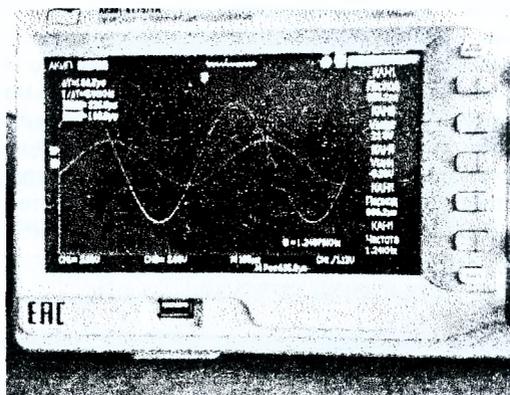


Рисунок 14 – Осциллограммы опыта с интегрирующей RC-цепью

Б) Измерение параметров напряжений и построение векторной диаграммы являются основным этапом работы. Согласно второму правилу Кирхгофа сумма напряжений на элементах замкнутого контура равна нулю (9). Вместо суммирования мгновенных значений напряжений мы суммируем изображающие их векторы, которые обозначаем как амплитуды с точкой над верху.

$$\dot{U}_{mR} + \dot{U}_{mC} = \dot{U}_{mT}.$$

Для построения векторов, изображающих напряжения, необходимо измерить амплитуды напряжений и их начальные фазы. Пусть имеем опытные осциллограммы двух напряжений u_r и u_c (рисунок 14). Используя измерительные возможности осциллографа, определим их амплитуды U_{mT} и U_{mC} . Согласно рисунку 14: $U_{mT} = 5.28$ В, $U_{mC} = 2.16$ В. Примем начальную фазу напряжения генератора u , равной нулю, это правомерно и эквивалентно произвольному заданию нулевого момента времени. В результате вектор \dot{U}_{mT} определился полностью и можно построить его на векторной диаграмме. Длина изображающего направленного отрезка равна амплитуде U_{mT} , а угол с горизонтальной осью – начальной фазе, т. е. нулю. Примем масштаб диаграммы 1В/1см и построим горизонтальный отрезок длиной 5.28 см (рисунок 15). Обозначим его \dot{U}_{mT} .

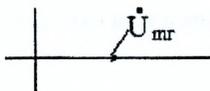


Рисунок 15 – Вектор, изображающий напряжение генератора U_{mT} .

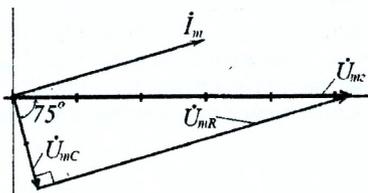


Рисунок 16 – Векторная диаграмма напряжений и тока в интегрирующей RC-цепочке

Определим начальную фазу напряжения на конденсаторе. Для этого воспользуемся курсорными измерениями. Совместив курсор А с максимумом напряжения u_r (желтая синусоида), а курсор В – с ближайшим максимумом напряжения u_c (синяя синусоида). На рисунке 14 показана именно эта ситуация. По показаниям курсоров в правом верхнем углу экрана определим разность времени их положений 168 мкс. Переведем найденную разность времен достижения максимумов в величину разности фаз. За время периода T фаза изменяется на 360° . Следовательно:

$$\alpha_c = \mp \frac{\Delta T}{T} \cdot 360^\circ = \mp \frac{168 \text{ мкс}}{806.2 \text{ мкс}} \cdot 360^\circ = \mp 75^\circ$$

Знак начальной фазы также определяется осциллограммой: если максимум измеряемой синусоиды сдвинут вправо относительно ближайшего максимума синусоиды с нулевой начальной фазой, то знак измеряемой начальной фазой отрицателен, т. е. $\alpha_c = -75^\circ$.

В) Теперь можем построить на диаграмме вектор \dot{U}_{mC} , который повернут относительно горизонтальной оси в отрицательную сторону (т. е. по часовой стрелке) на угол 75° и имеет длину 2.16 см (2.16 В). Вектор, изображающий напряжение на резисторе \dot{U}_{mR} , представляет собой разность векторов $\dot{U}_{m\Gamma}$ и \dot{U}_{mC} :

$$\dot{U}_{mR} = \dot{U}_{m\Gamma} - \dot{U}_{mC}.$$

Таким образом, определились векторы, изображающие напряжения на всех элементах цепи. Полная векторная диаграмма показана на рисунке 16. Конечно, угол между векторами \dot{U}_{mC} и \dot{U}_{mR} должен получиться равным 90° . Амплитуда напряжения на резисторе определится из диаграммы, на которой \dot{U}_{mR} является катетом прямоугольного треугольника. Следовательно:

$$U_{mR} = \sqrt{U_{m\Gamma}^2 - U_{mC}^2} = \sqrt{(5.28\text{В})^2 - (2.16\text{В})^2} = 4.82\text{ В}.$$

Вектор, изображающей ток в цепи, строится параллельно вектору \dot{U}_{mR} , поскольку разность фаз напряжения и тока в резисторе равна нулю.

Амплитуда тока определится из закона Ома:

$$I_m = \frac{U_{mR}}{R} = \frac{4.82\text{ В}}{75\text{ кОм}} = 6.42 \cdot 10^{-5}\text{ А} = 64.43\text{ мкА}.$$

Г) Вычислим емкость конденсатора, используемого в опыте. Для этого необходимо знать сопротивление используемого резистора $R = 75\text{ кОм}$ и амплитуды напряжений на резисторе $U_{mR} = 4.82\text{ В}$ и конденсаторе $U_{mC} = 2.16\text{ В}$, а также частоту напряжений и тока $f = 1.24\text{ кГц}$.

Воспользуемся законом Ома для амплитуд напряжения и тока в конденсаторе:

$$I_m = U_{mC}\omega C,$$

$$C = \frac{I_m}{\omega U_{mC}} = \frac{6.42 \cdot 10^{-5}\text{ А}}{6.28 \cdot 1.24 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{с}} \cdot 2.16\text{ В}} = 3.816 \cdot 10^{-9}\text{ Ф} = 3816\text{ пФ}.$$

Задание 3. Сборка интегрирующей RL-цепи, измерение параметров напряжений, построение векторной диаграммы.

Используя тот же лабораторный макет, соберите интегрирующую RL-цепочку, схема которой показана на рисунке 13в. Установите на генераторе заданную преподавателем частоту, регулировками осциллографа добейтесь удобной для наблюдения и измерений картины на экране.

Самостоятельно проведите исследования напряжений на элементах данной цепи, повторив все пункты (Б, В, Г) предыдущего задания. Результатом пункта Г будет определение индуктивности катушки.

Контрольные вопросы:

1. Какие колебания называют гармоническими?
2. Что называется фазой, частотой, начальной фазой гармонического колебания?
3. Какие обозначения используются для гармонических колебания токов, напряжения ЭДС в цепях переменного тока?
4. Как определяется вектор, изображающий гармоническое описание?

Отчет по работе

1. Название лабораторной работы.
2. Цель.
3. Приборы и оборудование.
4. Теоретические сведения: физические и математические модели, на основе которых выполнялась лабораторная работа.
5. Порядок выполнения работы.
6. Выводы.

Э –20 ГАРМОНИЧЕСКИЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: теоретически и экспериментально изучить основные свойства электрических цепей, в которых действуют гармонические токи.

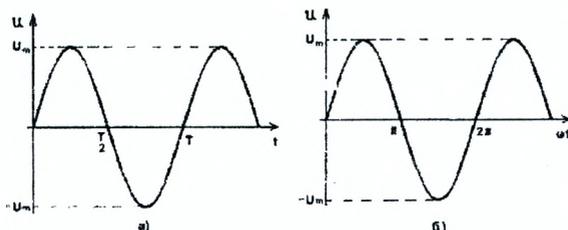
Приборы и оборудование: генератор гармонических сигналов, осциллограф, набор конденсаторов, катушек индуктивностей и резисторов.

Теоретические сведения

Для понимания работы гармонических (синусоидальных, косинусоидальных) цепей надо знать особенности работы R, L, C-элементов. Вспомним некоторые сведения о гармонических токах и напряжениях. Их уравнения для мгновенных значений одной частоты, это (1) и (2). Мгновенные значения величин обозначают маленькими буквами, а амплитудные – большими, с индексом m (max). Напряжение (ток) может быть функцией времени или угла (рисунок 1). В рассматриваемых цепях токи и напряжения одной частоты (линейные цепи).

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi); \quad (1)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha). \quad (2)$$



а) – как функция времени; б) – как функция угла

Рисунок 1 – Гармоническое напряжение

U_m, I_m – соответственно, амплитудные значения напряжения (1) и тока (2); максимальное отклонение этих величин от нулевого значения;

$(\omega t + \varphi), (\omega t + \alpha)$ – фазы, соответственно, напряжения и тока в момент времени t ; ω – циклическая частота напряжения (1) и тока (2): $\omega = 2\pi / T = 2\pi f$;

φ, α – соответственно, начальная фаза колебания напряжения (1) и тока (2); угол, с которого начинается колебательный процесс. На рисунке 1 $\varphi = 0$.

Векторная диаграмма

Пусть математический маятник при $t = 0$ отклонен на угол φ_0 . Этот процесс можно рассматривать через косинус. Но приходится рассматривать колебания, где начало колебаний совпадает с началом отсчета времени. Здесь удобно пользоваться синусом. Колебания можно рассматривать как через синус, так и через косинус, поскольку (3):

$$\sin(90^\circ \pm \alpha) = +\cos \alpha. \quad (3)$$

Гармоническое колебание имеет вид (4):

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (4)$$

Величину x определяют: A , ω , φ_0 и t . Вспомним, что вращение описывается таким же уравнением. Это сходство позволило любой гармонический процесс представлять в виде аналога, вращающегося вектора, у которого во вращении те же параметры: A , ω , φ_0 , t . Подмена колебания вращающимся вектором – моделирование. Если возьмем ось x , выберем на ней точку O и вокруг нее начнем вращать вектор с амплитудой величины A , то этот процесс также будет гармоническим колебанием, что иллюстрируется рисунком 2 и описывается тем же уравнением (4), где:

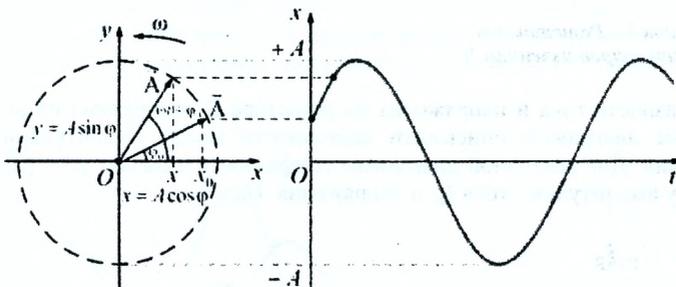


Рисунок 2 – Моделирование процесса колебания на основе вращающегося вектора

A – амплитуда колебания, она же величина вращающегося вектора;

ω – угловая скорость вращения вектора, она же угловая частота моделируемого колебания;

φ_0 – начальная фаза колебания, она же положение моделирующего вектора при $t = 0$.

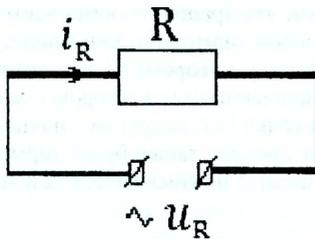
Проекция A на ось x будет изменяться от $-A$ до $+A$. Такое моделирование суть векторной диаграммы, где вектор амплитуды A вращается с угловой частотой ω из состояния фазы φ_0 . Метод векторных диаграмм позволяет перейти от операций с тригонометрическими функциями к алгебраическим с векторами, что упрощает расчеты гармонических процессов.

Гармонические токи и напряжения на R, L и C-элементах

Резистивная цепь

Резистивная цепь – совокупность резисторов, подключенных между собой по законам параллельного и (или) последовательного включения, по которым протекает электрический ток. Резистор перераспределяет токи и напряжения в цепи. В нем электрическая энергия переходит в тепло. Это одно из свойств резистора. Рассмотрим зависимости между током и напряжением на резистивном элементе R в цепи с гармоническим током.

В резистивной цепи нет сдвига фазы между током и напряжением. Если на резистор R (рисунок 3) подать напряжение u_R (5), то в нем появится ток (6), амплитуда которого определяется выражением (7).



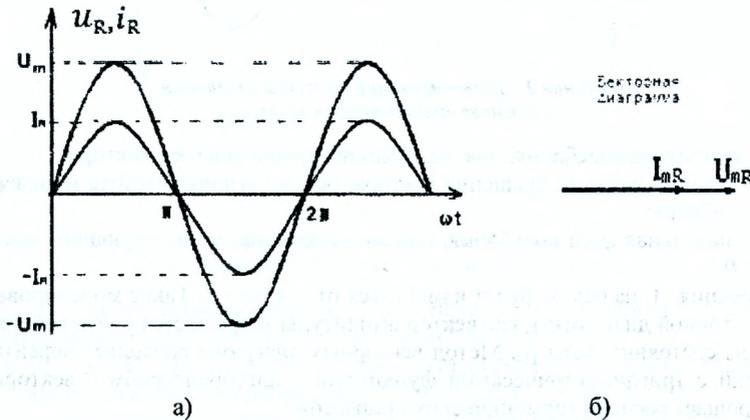
$$u_R = U_m \sin(\omega t + \varphi); \quad (5)$$

$$i_R = I_m \sin(\omega t + \varphi); \quad (6)$$

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (7)$$

Рисунок 3 – Резистивный элемент сопротивлением R

Синфазность тока и напряжения на резисторе R отображена на рисунке 4. Векторные диаграммы описывают зависимости между амплитудами тока и напряжения. Для векторной диаграммы синфазность означает угол равный нулю между амплитудами тока I_m и напряжения U_m .



а) в графическом представлении; б) – в виде векторной диаграммы
 Рисунок 4 – Напряжение и ток на резисторе R

Цепь с индуктивным элементом

Зависимость тока и напряжения на индуктивном элементе определяется (9). Пусть на элемент L (рисунок 6) подано гармоническое напряжение u_L . В индуктивном элементе L с некоторым запаздыванием появится ток i_L (10), поскольку на создание магнитного поля уйдет время.

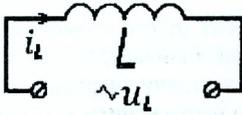


Рисунок 6 – Соленоид с индуктивностью L

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}; \quad (9)$$

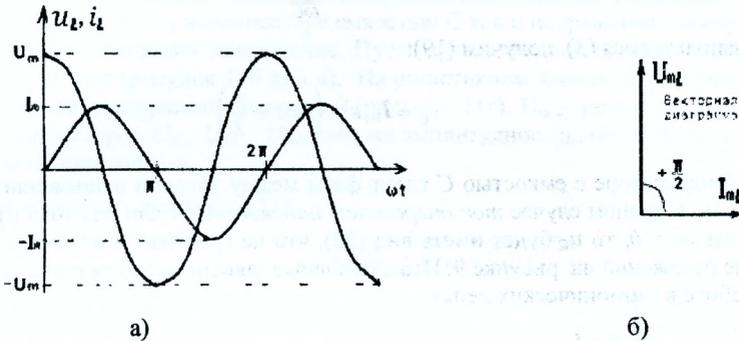
$$i_L = I_m \sin(\omega t + 0) = I_m \sin \omega t; \quad (10)$$

$$u_L = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = L \omega I_m \cos \omega t. \quad (11)$$

Используя (3), получим (12):

$$u_L = I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m X_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (12)$$

$X_L = \omega L$ – сопротивление индуктивного элемента. Между током (10) и напряжением (12) сдвиг фазы 90° , причем *напряжение опережает ток*. Графики u_L (13) и i_L (14) и векторная диаграмма для их амплитуд приведены на рисунке 7.



а) – на основе графика; б) – векторной диаграммы

Рисунок 7 – Представление напряжения и тока на индуктивном элементе L

Итак:

$$u_L = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); \quad (13)$$

$$i_L = I_m \sin \omega t. \quad (14)$$

U_m – амплитуда напряжения (15):

$$U_m = I_m \omega L = I_m X_L. \quad (15)$$

X_L – индуктивное сопротивление (Ом) (16):

$$X_L = \omega L. \quad (16)$$

Цепь с емкостным элементом

Емкость C – основной параметр конденсатора, зависит от его геометрических размеров и диэлектрика (рисунок 8). Конденсатор накапливает, отдает или хранит энергию электрического поля. На накопление и отдачу энергии необходимо время. Это обуславливает сдвиг фазы между его напряжением и током, зависимости между которыми описываются уравнениями (17). Одно из них – дифференциальное, другое – интегральное.

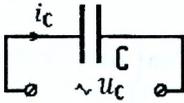


Рисунок 8 – Конденсатор

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}; u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (17)$$

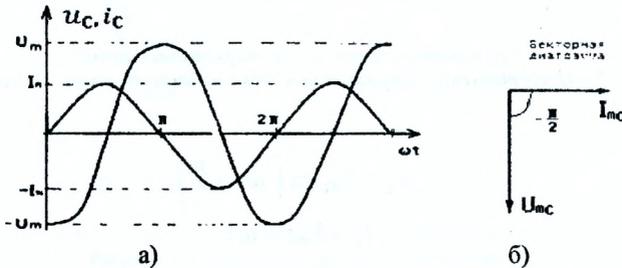
Подадим на конденсатор напряжение (1) с начальной фазой $\varphi = 0$. На нем появиться ток, который определим на основе (17), получим (18):

$$i_C = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = C \omega U_m \cos \omega t = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} \cos \omega t = \frac{U_m}{X_C} \cos \omega t = I_m \cos \omega t. \quad (18)$$

Вспользуемся (3), получим (19):

$$i_C = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (19)$$

В конденсаторе с емкостью C сдвиг фазы между током и напряжением так же $\pi/2$, но в данном случае *ток опережает напряжение*. Если для тока начальная фаза $\varphi = 0$, то u_C будет иметь вид (20), что на графиках и векторной диаграмме отражено на рисунке 9. Итак, основные зависимости для конденсатора при работе в гармонических цепях:



а) – на основе графика; б) – векторной диаграммы

Рисунок 9 – Представление напряжения и тока на емкостном элементе C

$$u_C = I_m \frac{1}{\omega C} \sin \left| \omega t - \frac{\pi}{2} \right| = U_m \sin \left| \omega t - \frac{\pi}{2} \right|. \quad (20)$$

U_m – амплитуда напряжения (21):

$$U_m = I_m \frac{1}{\omega C} = I_m \cdot X_C \quad (21)$$

X_C – сопротивление емкостного элемента цепи (Ом) (22):

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (22)$$

Последовательная RLC-цепь

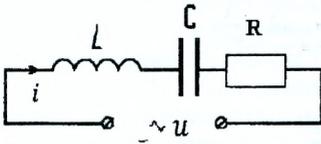


Рисунок 10 – Последовательный колебательный контур

Пусть имеется схема, где присутствуют элементы: R, L и C, которые включены последовательно (рисунок 10). Такой компонентный состав есть последовательный колебательный контур. К цепи приложено напряжение u , которое вызывает в ней ток i . На индуктивном элементе L напряжение u_L сдвинуто на угол $\pi/2$ относительно тока i_L .

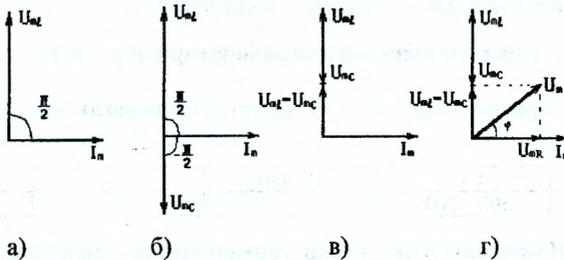
Этот процесс отражен на векторной диаграмме амплитудных токов и напряжений (рисунок 11а). На конденсаторе емкостью C ток и напряжение сдвинуты на $\pi/2$, т. е. ток опережает напряжение. Пусть $u_L > u_C$, тогда векторная диаграмма приобретает вид (рисунок 11б или в). На резистивном элементе R сдвиг фазы между током и напряжением равен 0 (рисунок 11г). U_m – результат сложения амплитуд векторов U_{mL} , U_{mC} , U_{mR} , оно же амплитудное значение поданного на клеммы напряжения $\sim u$.

Для векторных амплитуд (23):

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2} \quad (23)$$

С учетом (7), (15), (21) имеем (24):

$$U_m = \sqrt{(I_m R)^2 + \left(I_m \omega L - \frac{I_m}{\omega C} \right)^2} \quad (24)$$



а) – на индуктивном элементе L ; б) – на индуктивном элементе L и емкостном элементе C ; в) – отражает разницу величин U_{mL} и U_{mC} ; г) – результирующего амплитудного напряжения U_m с учетом амплитудного напряжения на резисторе U_{mR} .

Рисунок 11 – Векторные диаграммы сдвига фаз амплитудных токов и напряжений

Откуда (25):

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (25)$$

(25) похоже на закон Ома. В знаменателе – сопротивление. Между напряжением u и током i ; сдвиг начальных фаз φ (рисунок 11 г), который находим в соответствии (26) и (27):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{I_m \omega L - I_m \frac{1}{\omega C}}{I_m R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}; \quad (26)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (27)$$

С учетом (25), (27) справедливы выражения (28) и (29), при начальной фазе тока, равной 0.

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right); \quad (28)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + 0) = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin \omega t \quad (29)$$

Особенности цепи с гармоническим током. Чтобы указать мгновенное напряжение (ток) в момент времени t , следует знать: амплитуду, частоту, начальную фазу. В цепи гармонического тока учитывают активное и реактивное сопротивления. Последние разделяется на индуктивное и емкостное. Элементы L и C в цепи организуют временные задержки: L – задержку изменения тока; C – напряжения. Реактивность элементов L и C связана с тем, что они в ходе работы в электрической цепи могут возвращать энергию: соленоид – энергию магнитного поля; конденсатор емкостью C – энергию электрического поля.

Порядок выполнения лабораторной работы

Данные варианта U_m , f , R и ОИ задаются преподавателем (Таблица 1).

Таблица 1

U_m , В	f , Гц	R , кОм	L , Гн	C , Ф
5 – 20	500 – 2000		?	?

Задание I. Измерение параметров гармонических сигналов.

1. Включите генератор и осциллограф и соберите стенд (рисунок 3а; с.8). В осциллографе используемый канал должен быть включен. В генераторе (ГН):

– регулятор выходного напряжения ГН (он же регулятор U_m для $u_{\text{нх}}$ ОИ) должен находиться, примерно, в среднем положении;

– dB (логарифмический делитель напряжения) должен находиться в положении «0», тогда регулировка $u_{\text{вых}}$ ГН осуществляется регулятором «~».

2. Установите ГН заданную частоту f (переключатель $10^2, 10^3 \dots$ и круговая шкала). Получите осциллограмму вида (рисунок 1а). Если таковой не наблюдается, то подстройте масштабирование по осям напряжения (ось Y) и времени (ось X).

Масштабирование напряжения (ось Y) осуществляется из зоны «ВЕРТИК» осциллографа. Вращая регулятор «ПЛАВНО», следует добиться, чтобы на экране появилась синусоида. Регулятором «СМЕЩЕНИЕ» устанавливаем нулевой уровень напряжения (по выбору исследователя). Количество «вольт/деление» для канала 1 CH 1 высвечивается в левом нижнем углу экрана и правее (CH 2) для канала 2. Если на экране видим напряжение в пределах $(+U_m - U_m)$, то масштаб выбран правильно.

Масштабирование по X осуществляем из зоны ГОРИЗОНТ. Регулятором «ОКНО», добиваемся появления на экране 2–3 периодов напряжения. Регулятором «СМЕЩЕНИЕ» (по выбору исследователя) устанавливается нулевой уровень времени, который должен совпадать с нулевым уровнем напряжения. «Время/деление» (M μ S; mS) высвечивается, примерно, в центре нижней части экрана и указывает цену одной клетки. В правой части экрана высвечивается частота f исследуемого сигнала. Дополнительные данные об исследуем сигнале (сигналах) можно получить, если нажать кнопку «МЕНЮ». Наиболее точные измерения производятся тогда, когда по осям X и Y выбрана максимально возможная для данного уровня сигнала чувствительность осциллографа.

Измерьте амплитуду и период заданной синусоиды, сопоставьте эти результаты с показаниями осциллографа. Зарисуйте осциллограмму в виде графика.

Задание 2. Исследование активно-емкостной RC-цепи.

1. Используем стенд (рисунок 3б; с.8). Канал 1 осциллографа кабелем «разъем/разъем» подключите через разветвитель к выходу «~» ГН. Канал 2, через кабель «разъем/двухпроводная линия» – к выходу схемы (рисунок 13б; с.18). Вход схемы таким же кабелем подключите к разветвителю сигналов. Итак, канал 1 позволяет измерять $u_{\text{вх}}$, канал 2 – $u_{\text{вых}}$ схемы.

2. Изменяя $u_{\text{вх}}$ в сторону повышения с шагом, примерно, 1 В, измерьте размах $u_{\text{вых}}$ и перейдите к амплитудным значениям. Данные занесите в таблицу 2.

3. На основе (23) найдите U_{mR} и ток через резистор I_{mR} (7).

4. Посредством (21) определите емкость C RC-цепи для каждого значения $u_{\text{вх}}$. Найдите среднее значение емкости конденсатора $\langle C \rangle$.

5. На основе (27), величины $\langle C \rangle$ и данных варианта определите угол сдвига фазы $\varphi_{\text{расч}}$ между $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}} = U_{mC}$.

Таблица 2 – Результаты исследования RC-цепи.

№	$u_{\text{вх}},$ В	$u_{\text{вых}},$ В	$U_{\text{вх}},$ В	$U_{mC},$ В	$U_{mR},$ В	$I_{mR},$ МА	$C,$ нФ	$\langle C \rangle,$ нФ	$\varphi_{\text{расч}},$ град	$\varphi_{\text{эксп}},$ град
1										
2										
...										
10										

6. Определите экспериментально сдвиг фазы $\varphi_{\text{экс}}$ между входным напряжением U_{max} и выходным $U_{\text{мс}}$. Для этого для последнего опыта 10 измерьте время между максимумами гармонических сигналов и переведите его в угловую меру. Результат занесите в таблицу 2.

7. С соблюдением масштаба постройте векторную диаграмму исследований. Для этого воспользуйтесь результатами п. 10 таблицы 2.

Задание 3. Исследование активно-индуктивной RL-цепи.

В соответствии плана исследования RC-цепи, на основе данных предложенного варианта для величин R и L, составьте таблицу для результатов исследования RL-цепи (рисунок 13в; с.18). Проведите ее исследование.

Контрольные вопросы.

1. Уравнения для гармонического напряжения и тока в электрической цепи; смысл параметров уравнений.

2. Сдвиг фазы между током и напряжением на R, L, C-элементах в электрической цепи.

3. Закон Ома для амплитудных значений в R,L,C-цепи.

4. Уравнение сдвига фазы между током и напряжением в RLC-цепи.

Отчет по работе

Название лабораторной работы.

Цель работы.

Приборы и оборудование.

Теоретические сведения:

– физическая модель лабораторной работы (блок-схема стенда с указанием конкретной исследуемой электрической цепи);

– математические модели лабораторной работы (уравнения, на основе которых определялись данные для таблицы 2).

Порядок выполнения работы:

– описание выполнения работы с представлением таблиц, результатов исследований;

– вывод по выполненной лабораторной работе.

Э – 21 ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДА. ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Цель работы: знакомство с понятием «вольт-амперная характеристика» (ВАХ). Измерение ВАХ-элементов радиоэлектроники. Измерение элементарного заряда.

Приборы и оборудование: лабораторная установка для измерения ВАХ, компьютер, образцы элементов – резистор, германиевый p-n-переход, кремниевый p-n-переход.

Теоретические сведения

Электрический заряд любого тела всегда кратен некой величине, названной элементарным зарядом. Значение этой величины $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл было измерено Милликеном в 1909 году. Опыт Милликена весьма сложен в реализации. Поэтому в данной работе используется другой метод, основанный на измерении вольт-амперной характеристики p-n-перехода.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) элемента – это зависимость тока через элемент от приложенного к нему напряжения. Например, ВАХ отрезка металлического проводника представляет собой прямую пропорциональность и определена законом Ома: $I = U \cdot g$, где g – электропроводность проводника – величина обратная электрическому сопротивлению ($g = 1/R$).

Прямо пропорциональная ВАХ является редким примером. Обычно зависимость тока I от приложенного напряжения U выражается более сложным законом. В частности, ВАХ электронно-дырочного перехода определяется, так называемой, формулой Шокли:

$$I = I_{0\text{эф}} \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

В данной формуле $I_{0\text{обр}}$ – обратный ток перехода, который протекает через него в направлении непротекания тока. Величина обратного тока очень слабо зависит от приложенного обратного напряжения и ее можно считать константой для данного образца электронно-дырочного перехода. Параметр U_T имеет размерность напряжения и называется температурным потенциалом. Он выражается через мировые константы: k – постоянную Больцмана, e – элементарный заряд:

$$U_T = \frac{kT}{e} \quad (2)$$

Если по виду ВАХ определить температурный потенциал, то при известных $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/(моль К) и абсолютной температуре T можно вычислить величину элементарного заряда e . Лабораторная установка позволяет измерить

ВАХ исследуемого элемента, представить ее в виде графика на экране и запомнить в виде двух столбцовой таблицы, в которой первый столбец – величины напряжения U , второй – соответствующий величине тока I . Таблица сохраняется в виде текстового файла `actual.txt`. Обработывая этот файл с помощью Excel (электронные таблицы), мы определим величину температурного потенциала U_T , а затем по формуле (2) вычислим элементарный заряд.

Порядок выполнения лабораторной работы

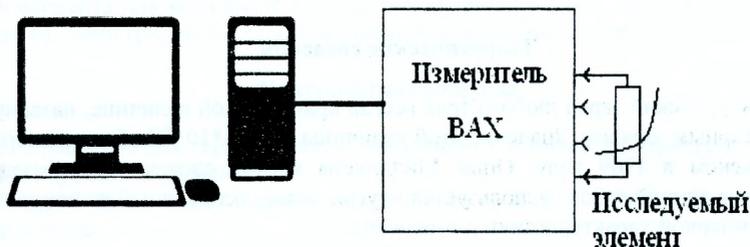


Рисунок 1 – Стенд для исследования ВАХ элементов радиоэлектроники

Рассмотрите лабораторную установку и образцы (рисунок 1), предложенные для измерения ВАХ элементов. Образцы находятся в круглом пенале с надписью «Лабораторная работа Э-10, р/детали». Установка имеет контактные гнезда, в которые (два крайних гнезда) вставляются выводы исследуемого элемента.

Включите компьютер и установку, на которой должен засветиться индикаторный светодиод.

Установите в контактные гнезда резистор, который будет первым исследуемым элементом.

Запустите на исполнение программу `Elem_zag.exe`, которую легко найти на рабочем столе по яркой желтой семерке. В появившейся на экране вкладке нажмите кнопку «старт» и на сообщение об открытии порта нажмите «Ок». Установка готова к работе.

На мониторе отобразятся начальные значения напряжения на исследуемом элементе и тока через него. Величину напряжения можно изменять вручную, передвигая мышью движок регулятора в нижней части вкладки. Двигая регулятор, посмотрите, в каких пределах изменяются напряжение на элементе и ток через него.

Для снятия ВАХ подключенного элемента служит кнопка «сканировать». После нажатия на нее происходит ступенчатое увеличение напряжения на исследуемом элементе, измерение тока через него, отображение напряжения и тока в виде точек на графике и накопление данных в файле. После окончания цикла сканирования установка готова к повторению его с другим исследуемым

элементом. Новый график ВАХ будет совмещен со старым. Процесс накопления графиков ВАХ на экране можно продолжать многократно.

Задание 1. Измерение и сравнение ВАХ.

Снимите графики ВАХ со всех представленных в работе элементов: резистора, германиевого р-п-перехода, кремниевого р-п-перехода, стабилитрона.

Перерисуйте полученное семейство графиков в тетрадь, указав тип элемента на каждом из графиков.

Задание 2. Измерение ВАХ германиевого перехода.

Очистите память компьютера, нажав кнопку «Закончить». Вновь запустите на исполнение файл Elem_zar.exe. Подключите к контактным гнездам германиевый переход. Соответствующий элемент имеет цилиндрическую форму с усеченным конусом. Именно он в наилучшей степени соответствует формуле Шюкли. Получите ВАХ. Закройте файл нажатием кнопки «Закончить».

Задание 3. Вычисление элементарного заряда.

Данные эксперимента сохранены в файле actual.txt в виде таблицы. Первый столбец таблицы – величины напряжений на исследуемом элементе в вольтах, второй – соответствующие величины тока в мкА. Для просмотра и обработки таблицу данных загрузим в программу работы с таблицами EXEL. Запускаем EXEL, в меню “файл” выбираем “открыть” в подменю – “все файлы”. Находим и выделяем файл actual.txt и загружаем его в EXEL. Выбираем: “с разделителями”, разделитель – пробел. После этого мы увидим таблицу значений ВАХ, состоящую из двух столбцов.

Можно вновь получить на экране график ВАХ средствами EXEL. Для этого выделим любую ячейку на свободном поле, выделим полученную таблицу, выберем опцию «вставить», под опцию – точечную диаграмму в виде простого графика. EXEL построит график зависимости тока через переход от напряжения на нем. Конечно, этот график должен быть таким же, как в программе Elem_zar.exe.

1. Нас на этом этапе интересует таблица данных. В первой строчке при отрицательном напряжении на переходе величина тока через него равна $I_{обр}$ – обратному току через переход в формуле (1). Таким образом, величина $I_{обр}$ легко определится.

2. Прокрутим таблицу до конца и из последней строчки узнаем величины тока I_m и напряжения U_m , которые должны удовлетворять соотношению (3):

$$I_m = I_{обр} \left(e^{\frac{U_m}{U_T}} - 1 \right). \quad (3)$$

В этой формуле неизвестна только одна величина – U_T , которую необходимо выразить и вычислить (4):

$$U_T = \frac{U_{\pi}}{\ln\left(1 + \frac{I_m}{I_{\text{отр}}}\right)} \quad (4)$$

По известной U_T с помощью формулы (2) вычислим величину элементарного заряда. Необходимое для вычислений значение постоянной Больцмана равно $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Контрольные вопросы

1. Что называется элементарным зарядом?
2. Какой метод используется в работе для измерения величины элементарного заряда?
3. Что такое вольт-амперная характеристика элемента электрической цепи?
4. Как выглядят графики ВАХ резистора, р-п-перехода.

Отчет по работе

Название лабораторной работы.

Цель работы.

Приборы и оборудование.

Теоретические сведения:

- физическая модель лабораторной работы (стенд для исследования полупроводниковых элементов и резистора);
- математические модели лабораторной работы (математические формулы и смысл физических величин, входящих в формулы).

Порядок выполнения работы:

- описание выполнения работы с представлением графиков, ссылок на математические формулы, результаты исследований;
- выводы по отдельным заданиям.

Итоговый физический вывод по выполненной лабораторной работе.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители:

Величко Любовь Алексеевна

Ворсин Николай Николаевич

Маркевич Константин Михайлович

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по физике
для студентов технических специальностей
дневной и заочной форм обучения

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Часть III

Ответственный за выпуск: Маркевич К. М.

Редактор: Митлошук М. А.

Компьютерная вёрстка: Рогожина Ю. А.

Корректор: Дударук С. А.

Подписано в печать 30.12.2021 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 2,09. Уч. изд. л. 2,25. Заказ № 1475. Тираж 20 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г.