	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет»	Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине
		Б1.О.23 Электротехника и электроника

Кафедра электрических машин и
электрооборудования

Б1.О.23 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
ч.1

Направление подготовки
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль подготовки
Энергообеспечение предприятий

Квалификация (степень) выпускника
бакалавр

Уфа 2024

Рассмотрена и одобрена на заседании методической комиссии энергетического факультета «21» марта 2024 г. (протокол № 7).

Составитель: канд. техн. наук, доцент Кафиев И.Р.

Ответственный за выпуск: и.о. зав. кафедрой электрических машин и электрооборудования канд. техн. наук Акчурина С.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Лабораторная работа № 1 Исследование вольтамперных характеристик нелинейных элементов.	5
2 Лабораторная работа № 2. Измерение тока, напряжения и мощности в электрических цепях постоянного тока.	11
3 Лабораторная работа № 3 Исследование переходных процессов в R-L и R-C цепях.	17
Библиографический список	24

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине Б.1.О.23 «Электротехника и электроника» призваны способствовать освоению рабочей программы по указанной дисциплине.

Структура методических указаний включает пять разделов, каждый из которых отражает содержание соответствующей лабораторной работы.

Тематика лабораторных занятий полностью соответствует содержанию рабочей программы дисциплины Б1.О.23 «Электротехника и электроника» для подготовки бакалавров по направлению: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профилю подготовки Энергообеспечение предприятий.

Перед началом цикла лабораторных работ обучающиеся проходят первичный инструктаж по требованиям безопасности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1 Цель и программа работы

Цель: Получение практических навыков в снятии вольтамперных характеристик нелинейных элементов и определении статических и динамических сопротивлений.

Программа работы:

- 1) Изучение лабораторной установки и сборка схем для исследования ВАХ резистора и лампы накаливания.
- 2) Снятие отсчетов для построения ВАХ резистора и лампы накаливания.
- 3) Обработка полученных результатов и построение ВАХ элементов.
- 4) Оформление отчета по работе и ответы на контрольные вопросы.

1.2 Теоретические сведения

Электрические цепи принято разделять на два класса – линейные и нелинейные цепи, которые отличаются друг от друга своими свойствами и по математическому описанию. Цепь является линейной, если она состоит из линейных элементов, и нелинейной, если в ее составе имеется хотя бы один нелинейный элемент.

Электрические цепи, содержащие нелинейные элементы, сопротивления которых зависят от величины и направления тока или от напряжения на их зажимах, называются нелинейными [1].

У линейных элементов вольтамперная характеристика (ВАХ – зависимость тока от напряжения) представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат O (рисунок 1.1, а), и точку A , которая получается вычислением тока I_A при определенном значении напряжения U_A .

$$I_A = U_A/R,$$

где R – сопротивление линейного элемента, величина постоянная.

У нелинейного элемента вольтамперная характеристика нелинейная (рисунок 1.1, б). Сопротивление нелинейного элемента – величина непостоянная, зависящая от величины тока.

У нелинейных элементов различают статические и динамические сопротивления.

Статическим сопротивлением в данной точке a вольтамперной характеристики (рисунок 1.1, б) называют отношение напряжения к току, соответствующему этой точке [2]

$$R_{ст} = U_a/I_a = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.1)$$

где $m_R = m_u/m_i$ – масштаб сопротивления.

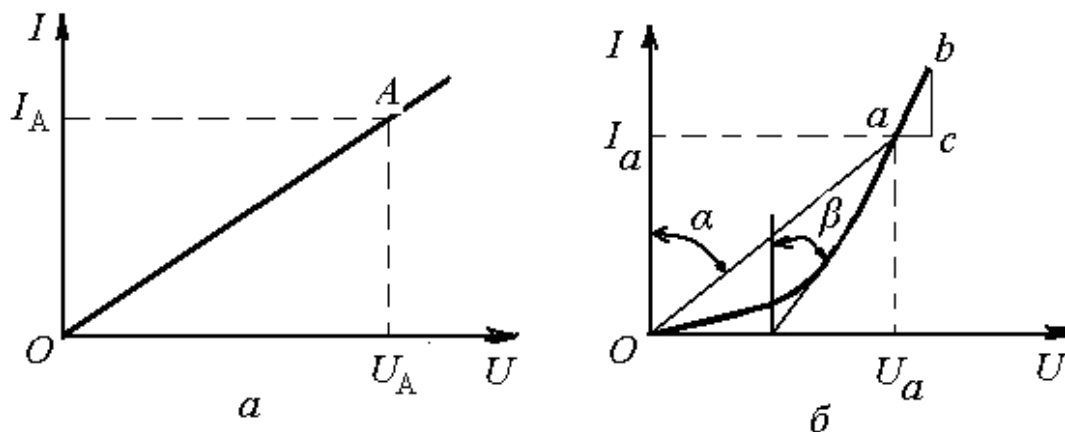


Рисунок 1.1 Вольтамперные характеристики:
a – линейного элемента; *б* – нелинейного элемента

Динамическим сопротивлением в данной точке *a* вольтамперной характеристики (рисунок 1.1, *б*) называют отношение бесконечно малых приращений напряжения dU и тока dI [2]

$$R_{\text{дин}} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_u \overline{ac}}{m_i \overline{bc}} = m_R \operatorname{tg} \beta. \quad (1.2)$$

Динамическое сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона касательной к вольтамперной характеристике в точке *a*.

Нелинейные элементы, не имеющие линейных участков ВАХ, не имеют аналитического выражения. Расчеты цепей с такими элементами выполняются, в основном, графическими методами. Исходные данные для решения таких задач задаются графиками или таблицами.

Последовательное соединение нелинейных элементов. Рассмотрим схему с последовательным соединением нелинейных элементов (рисунок 1.2, *a*) [3].

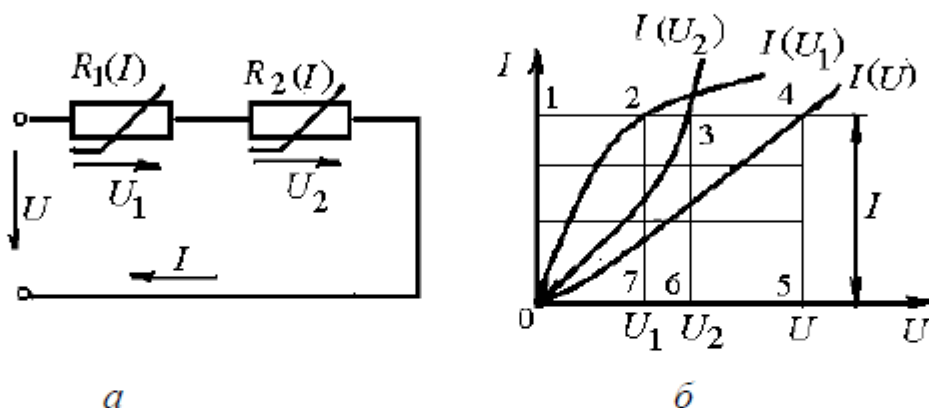


Рисунок 1.2. Последовательное соединение нелинейных элементов:
a – схема соединения; *б* – вольтамперные характеристики

Два нелинейных сопротивления $R_1(I)$ и $R_2(I)$ соединены последовательно и присоединены к источнику с напряжением U . Ток в цепи I . Зависимость тока от напряжения на сопротивлениях заданы ВАХ (рисунок 1.2, б).

Напряжения на сопротивлениях U_1 и U_2 в неразветвленной цепи

$$U_1 + U_2 = U.$$

Чтобы определить общую вольтамперную характеристику, достаточно сложить абсциссы исходных характеристик $I(U_1)$ и $I(U_2)$. Для этого проведем прямую, параллельную оси абсцисс, соответствующую току I (отрезок 0 – 1). Отрезки 1 – 2 и 1 – 3 представляют собой в выбранном масштабе падения напряжения U_1 и U_2 на сопротивлениях $R_1(U)$ и $R_2(U)$.

Сложив эти отрезки, на той же прямой получим точку 4, которая будет принадлежать общей ВАХ. Аналогично определим еще ряд точек для построения общей ВАХ при разных значениях тока. Если в неразветвленной цепи включено линейное сопротивление R , то для определения общей вольтамперной характеристики строится линейная ВАХ этого сопротивления и производится суммирование напряжений (абсцисс) на каждом сопротивлении. Графический метод позволяет решать задачи по определению тока в цепи, падений напряжений на каждом из участков, если известно общее напряжение цепи.

Параллельное соединение нелинейных элементов. Рассмотрим схему с параллельным соединением нелинейных элементов (рисунок 1.3, а) [3].

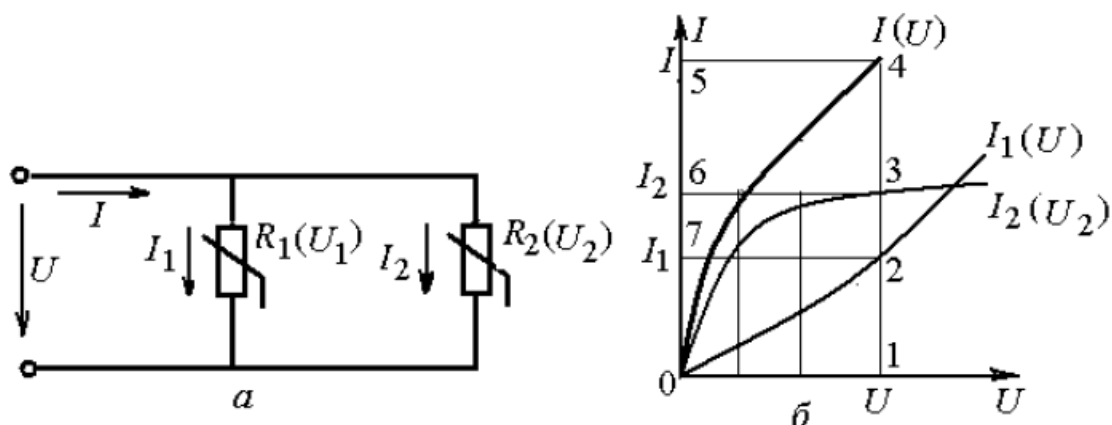


Рисунок 1.3. Параллельное соединение нелинейных элементов:

а – схема соединения; б – вольтамперные характеристики

При параллельном соединении нелинейных сопротивлений $R_1(I)$ и $R_2(I)$ к ним приложено одно и то же напряжение U (рисунок 1.3, а). Ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов в ветвях: $I = I_1 + I_2$.

Нелинейность сопротивлений задана вольтамперными характеристиками $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$ на рисунке 1.3, б.

Для построения ВАХ общей цепи $I(U)$ необходимо сложить ординаты вольтамперных характеристик сопротивлений. При напряжении U (отрезок 0 – 1) сумма отрезков 1 – 2 (ток I_1) и 1 – 3 (ток I_2) равна отрезку 1 – 4 (ток I). Также строятся другие точки нелинейной ВАХ общей цепи.

Если в одну из ветвей разветвленной цепи включено линейное сопротивление R , то для определения общей вольтамперной характеристики строится линейная ВАХ этого сопротивления и производится суммирование токов (ординат) для каждого сопротивления.

Смешанное соединение нелинейных элементов. При смешанном соединении нелинейных сопротивлений графический расчет производится методом свертывания схемы. В соответствии со схемой складываются ВАХ параллельных и последовательных ветвей. На рисунок 1.4, а показана схема смешанного соединения нелинейных сопротивлений [4]. К схеме приложено напряжение U (зажимы $a - b$). На сопротивлении $R(I)$, которое включено последовательно с двумя параллельными сопротивлениями $R_1(U_1)$ и $R_2(U_2)$, имеется падение напряжения U_1 (зажимы $a - c$). На параллельных ветвях (зажимы $c - d$) напряжение $U - U_1 = U_2$. Ток в неразветвленной части цепи I .

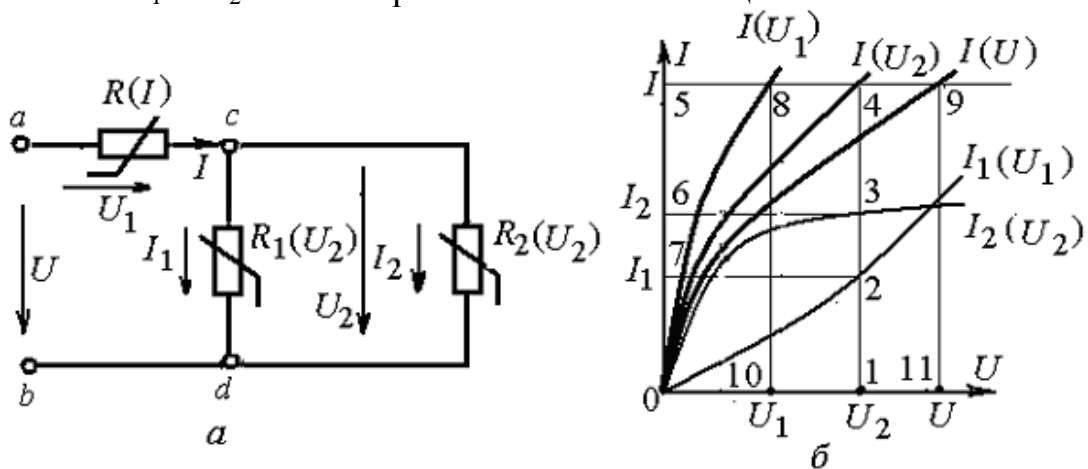


Рисунок 1.4. Смешанное соединение нелинейных элементов:
а – схема соединения; б – вольтамперные характеристики

Нелинейные сопротивления заданы нелинейными ВАХ $I(U)$, $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$, которые приведены на рисунок 1.4, б. Сложив токи в сопротивлениях R_1 и R_2 (складываются ординаты 1 – 2 и 1 – 3), получаем ток I в неразветвленной части. Складывая напряжения U_1 и U_2 (абсциссы 5 – 8 и 5 – 4), получаем напряжение U (абсцисса 5 – 9 или 0 – 11). Таким образом, строится ВАХ $I(U)$.

При большом количестве нелинейных элементов выполняется больший объем графических построений.

1.3 Описание лабораторной установки

Схемы лабораторной установки для снятия ВАХ резистора и лампы накаливания приведены на рисунке 1.5.

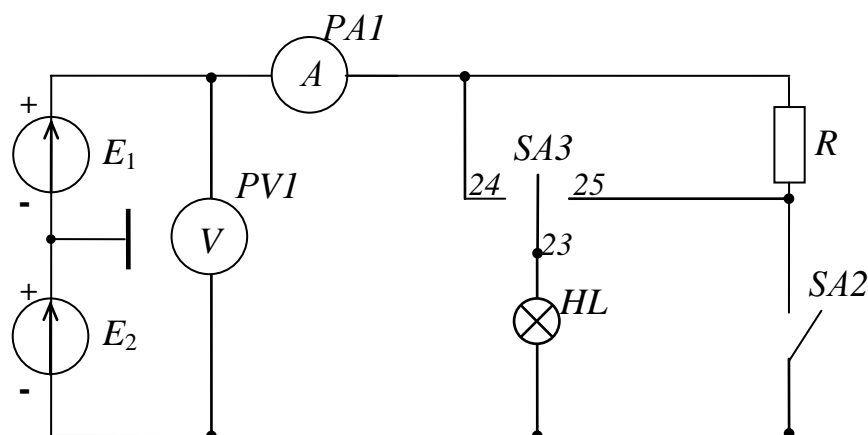


Рисунок 1.5 Электрическая схема установки

Используемое оборудование при сборке приведенной схемы:

E_1 , E_2 – источники постоянного напряжения БП-15 со встроенными вольтметрами;

$PA1$ – амперметр;

$PV1$ – вольтметр;

R – резистор, сопротивлением 220 Ом;

$SA1$, $SA2$ – переключатели;

HL – нелинейный элемент (лампа накаливания).

1.4 Порядок выполнения работы

1.4.1 Ознакомиться с оборудованием и приборами лабораторной установки, определить их размещение на рабочем месте.

1.4.2 Собрать электрическую схему, согласно рисунка 1.5.

1.4.3 Предъявить собранную схему для проверки преподавателю.

1.4.4 Установить ключ $SA1$ в нейтральное положение, ключ $SA2$ замкнуть.

1.4.5 Включить автомат, снять вольтамперную характеристику резистора, поднимая напряжение на источнике от 0 до заданного значения (с шагом в 5 В). Показания приборов записать в таблицу 1.1. Автомат отключить.

Таблица 1.1 Результаты измерений ВАХ

№ п/п	Резистор		Лампа		R , HL послед.		R , HL паралл.	
	U , В	I , А	U , В	I , А	U , В	I , А	U , В	I , А
1	0		0		0		0	
2	5		5		5		5	
3	10		10		10		10	
4	15		15		15		15	
5	20		20		20		20	
6	25		25		25		25	

1.4.6 Установить ключ $SA2$ в нейтральное положение, ключ $SA1$ в положение 24.

1.4.7 Включить автомат, снять вольтамперную характеристику нелинейного элемента (лампы), поднимая напряжение на источнике от 0 до заданного значения (с шагом в 5 В). Показания приборов записать в таблицу 1.1. Автомат отключить.

1.4.8 Установить ключ $SA2$ в нейтральное положение, ключ $SA1$ в положение 25.

1.4.7 Включить автомат, снять вольтамперную характеристику с последовательно-соединенными R и HL - элементами (резистора и лампы), поднимая напряжение на источнике от 0 до заданного значения (с шагом в 5 В). Показания приборов записать в таблицу 1.1. Автомат отключить.

1.4.8 Установить ключ $SA1$ в положение 24, ключ $SA2$ замкнуть.

1.3.9 Включить автомат, снять вольтамперную характеристику с параллельно соединенными R и HL - элементами (резистора и лампы), поднимая напряжение на источнике от 0 до заданного значения (с шагом в 5 В). Показания приборов записать в таблицу 1.1. Автомат отключить.

1.4.10 Построить в общей системе координат в одинаковом масштабе ВАХ резистора и лампы. По данным характеристикам графически построить их общие характеристики для последовательного, и отдельно для параллельного соединений.

1.4.11 Полученные опытным путем ВАХ для последовательного и параллельного соединений, нанести в этом же масштабе на график. Результаты сравнить, сделать вывод.

1.4.12 По вольтамперной характеристике лампы накаливания, согласно изложенной выше методике по формулам (1.1) и (1.2) необходимо определить статические и динамические сопротивления лампы.

Таблица 1.2 - Статические и динамические сопротивления лампы

№ п/п	Измерено для лампы		Вычислено	
	U , В	I , А	$R_{ст.}$, Ом	$R_{д.}$, Ом
1				
2				
3				

1.5 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе оформить в соответствии с требованиями, изложенными в СТО БГАУ 2018.

Он должен содержать:

а) цель работы;

- б) принципиальные схемы установок для снятия ВАХ исследуемых элементов;
- в) формулы, используемые для обработки экспериментальных данных;
- г) полученные экспериментальные данные в виде таблиц;
- д) графики ВАХ исследуемых резистора и лампы накаливания;
- е) полученные по графикам ВАХ основные параметры исследуемых элементов.

1.6 Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие элементы называются нелинейными?
- 2) Как различаются вольтамперные характеристики линейных и нелинейных элементов?
- 3) Что собой представляют и как определяются статические и динамические параметры нелинейного элемента (НЭ)?
- 4) Где проходит (на графике) общая вольтамперная характеристика НЭ при последовательном соединении?
- 5) То же при параллельном соединении?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

2.1 Цель работы

- 2.1.1 Изучить принцип действия, устройство и основные особенности работы аналоговых электроизмерительных приборов магнитоэлектрической и электродинамической систем,
- 2.1.2 Научиться определять цену деления приборов в зависимости от предела измерения приборов.
- 3.1.3 Получить практические навыки измерения мощности и сопротивления в цепях постоянного тока прямыми и косвенными методами.

2.2 Программа работы

- 2.2.1 Изучение и сборка неразветвленной электрической цепи с переменным сопротивлением.
- 2.2.2 Запись технических данных используемых приборов.
- 2.2.3 Измерение тока, напряжения и мощности в электрической цепи постоянного тока.
- 2.2.4 Обработка полученных результатов.
- 2.2.5 Оформление отчета по работе и ответы на контрольные вопросы.

2.3 Краткие теоретические сведения

2.3.1 Электрические измерения

Для непосредственного измерения и контроля тока и напряжения в цепях постоянного тока наиболее часто используются электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы.

Магнитоэлектрические приборы имеют высокую точность и чувствительность, высокую стабильность элементов и малое влияние магнитных полей. Вместе с тем магнитоэлектрические приборы имеют сложную конструкцию и невысокую перегрузочную способность.

Если измеряемый ток больше верхней границы диапазона измерений амперметра магнитоэлектрической системы, используют шунты. Для расширения диапазона измерений магнитоэлектрических вольтметров применяют добавочные резисторы. При этом надо учитывать, что применение добавочных резисторов и шунтов приводит к уменьшению чувствительности приборов. [4]

В цепях постоянного тока, исходя из соотношения $P = U \cdot I$, мощность может быть определена по результатам измерения напряжения и тока магнитоэлектрическими вольтметром и амперметром. Несмотря на доступность такого способа измерения мощности в цепях постоянного тока, его применяют мало, так как при этом требуется два прибора. Поэтому мощность в цепях постоянного тока обычно измеряют одноэлементными электродинамическими ваттметрами. Погрешности измерений при использовании ваттметра тем меньше, чем меньше сопротивление последовательной и больше сопротивление параллельной цепей ваттметра. В качестве масштабного преобразователя при необходимости используют добавочный резистор.

Эксплуатационные свойства электроизмерительных приборов определяются их метрологическими характеристиками, наиболее важными из которых являются следующие: погрешность прибора, чувствительность, цена деления, потребляемая мощность и др.

Отношение линейного или углового перемещения указателя к изменению значения измеряемой величины, вызвавшему это перемещение, называют чувствительностью прибора. Для приборов с равномерной шкалой чувствительность $S = \frac{\alpha}{X}$, для приборов с неравномерной шкалой $S = \frac{d\alpha}{dX}$. В приборах со стрелочным указателем, имеющим постоянную длину, чувствительность выражается в делениях шкалы, приходящихся на единицу измеряемой величины, например, дел/А, дел/В и т. п.

Цена деления шкалы определяется разностью значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы прибора.

Цена деления амперметра C_A и вольтметра C_V определяется по формулам:

$$C_A = \frac{I_H}{N}, \quad C_V = \frac{U_H}{N}, \quad (2.1)$$

где N – число делений шкалы прибора;

I_H и U_H – номинальные (конечные) значения тока и напряжения, измеряемые по данной шкале прибора.

Цена деления ваттметра определяется:

$$C_P = \frac{I_H \cdot U_H}{N}, \quad (2.2)$$

где I_H и U_H – номинальные значения тока и напряжения, устанавливаемые на панели прибора.

Таким образом, величиной, обратной чувствительности, является цена деления. Чувствительность может быть определена через цену деления $S = \frac{1}{C}$.

Измерение любой физической величины сопровождается погрешностями измерения – отклонения результата измерения от истинного значения измеряемой величины. [4]

Абсолютной погрешностью называют разность между показаниями прибора X и действительным значением измеряемой величины X_0 :

$$\Delta = X - X_0. \quad (2.3)$$

Относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности Δ к действительному значению измеряемой величины X_0 выраженное в процентах:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X_0} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

Приведенной погрешностью называют, выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению X_H :

$$\gamma = \pm \frac{\Delta \cdot 100\%}{X_H}. \quad (2.5)$$

В качестве нормирующего значения чаще всего принимают верхний предел измерения прибора.

Обобщенной характеристикой средств измерения, отражающей уровень их точности, является класс точности K , показывающий значение приведенной погрешности в процентах, т.е. $K = \gamma$. В соответствии с ГОСТ 8401-81 установлены следующие классы точности измерительных приборов – 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. [4]

Погрешность прибора, полученная при нормальных внешних условиях, носит название основной погрешности. Существует дополнительная погрешность – погрешность от изменения влияющих величин (температуры, внешнего магнитного поля и т.п.).

2.4 Экспериментальная часть

2.4.1 Ознакомиться с оборудованием и приборами лабораторной установки и записать их паспортные данные в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 Паспортные данные приборов

№	Наименование прибора	Условные обозначения	Система прибора	Предел измерения	Цена деления	Класс точности
1						
2						
3						
4						

2.4.2 Собрать электрическую схему согласно рисунка 1.1 и дать проверить ее преподавателю.

2.4.3 Включить цепь. Установить на выходе источников БП–15 напряжение 20...30 В (по указанию преподавателя) по встроенным в блок источника БП–15 вольтметрам.

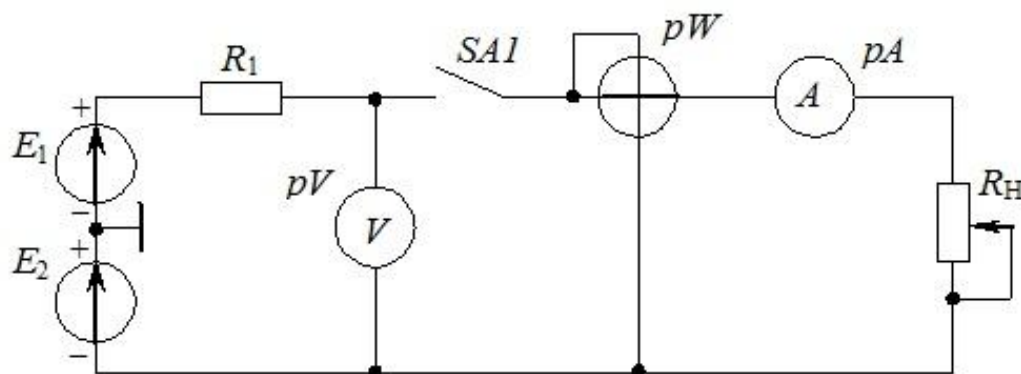


Рисунок 2.1 Неразветвленная электрическая цепь с переменным сопротивлением нагрузки

R_H – сопротивление нагрузки, по указанию преподавателя;

pA – амперметр;

pV – вольтметр;

pW – ваттметр;

$SA1, SA2$ – выключатели.

2.4.4 Выключатель $SA1$ замкнуть. Исследовать режим нагрузки электрической цепи, изменяя сопротивление нагрузки R_2 5...6 раз. Измерить ток, напряжение и мощность. Результаты измерения записать в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерения тока, напряжения и мощности

Нагрузка	Измерено			Вычислено		
	I , А	U , В	P , Вт	$R=U/I$, Ом	$R=P/I^2$, Ом	$P=U \cdot I$, Вт
1						
2						
3						
4						
5						
6						

2.5 Обработка результатов эксперимента

2.5.1 Вычислить величину сопротивления нагрузки по закону Ома для всех точек опыта, величину мощности в нагрузке P_2 и мощность генератора P_1 , а также коэффициент полезного действия η :

$$R = \frac{U}{I}; \quad P = U \cdot I;$$

2.5.2 Перенести измеренные значения тока, напряжения и мощности в режиме нагрузки в таблицу 1.3. По результатам измерений вычислить значения используемых сопротивлений:

$$R = P/I^2, \quad R = U/I.$$

2.5.3 Определить мощности цепи по показаниям амперметра и вольтметра $P=U \cdot I$ и сравнить её с мощностью, определённой по показаниям ваттметра.

2.5.4 Проанализировать результаты эксперимента и сделать выводы.

2.6 Вопросы для самоконтроля

- 1) Что называется электрическим измерением?
- 2) Что называется прямым измерением?
- 3) Что называется косвенным измерением?
- 4) Что называется совокупным измерением?
- 5) Что называется совместным измерением?
- 6) Что называется погрешностью измерений?
- 7) Какие приборы называются электроизмерительными?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В RL И RC ЦЕПЯХ

3.1 Цель и программа работы

Цель: получить практические навыки в исследовании переходных процессов в RL И RC цепях.

Программа работы:

- 1) Изучение лабораторной установки и сборка схем для исследования переходных процессов в RL И RC цепях.
- 2) Снятие отсчетов для определения параметров переходных процессов.
- 3) Обработка полученных результатов и определение параметров переходных процессов в RL И RC цепях.
- 4) Оформление отчета по работе и ответы на контрольные вопросы.

3.2 Теоретические сведения

Под переходными процессами понимают процессы, происходящие в электрических цепях при смене режима их работы. Переходные процессы вызываются коммутациями (переключениями) в цепи, обрывами, коротким замыканием и т.д. Физически переходные процессы представляют собой переход от одного энергетического состояния к другому энергетическому состоянию. Длительность переходных процессов может меняться в очень широком интервале, от миллиардных долей секунды до десятков секунд и минут.

В основе изучения переходных процессов лежат два закона коммутации.

Первый закон коммутации [1]: ток через индуктивность не может меняться скачкообразно или, иначе, ток через индуктивность непосредственно до коммутации $i_L(0-)$ равен току непосредственно после коммутации $i_L(0+)$, т.е.

$$i_L(0-) = i_L(0+)$$

Момент времени $t=0$ представляет собой момент коммутации, т.е. тем самым предполагается, что коммутация сама по себе имеет нулевую длительность. Моменты времени $t = 0-$ и $t = 0+$ отличаются от момента $t = 0$ на бесконечно малую величину $\pm dt$.

Второй закон коммутации [1]: напряжение на конденсаторе (разность потенциалов между его обкладками) при коммутации не может меняться скачкообразно, т.е.

$$u_C(0-) = u_C(0+)$$

Скачок тока через индуктивность и скачок напряжения на конденсаторе означали бы скачкообразные изменения энергии в этих элементах, для чего потребовалась бы бесконечно большая мощность, что в реальных электрических цепях невозможно.

Наиболее простыми являются переходные процессы, возникающие в RC цепи при зарядке конденсатора от источника постоянного напряжения, и при его разрядке, возникающей вследствие переключения заряженного конденсато-

ра на некоторое сопротивление, а также при подключении и отключении источника постоянного напряжения на индуктивность в RL цепи.

3.2.1 Переходный процесс в цепи RC

Рассмотрим подробнее процесс заряда конденсатора по схеме, приведённой на рисунке 3.1.

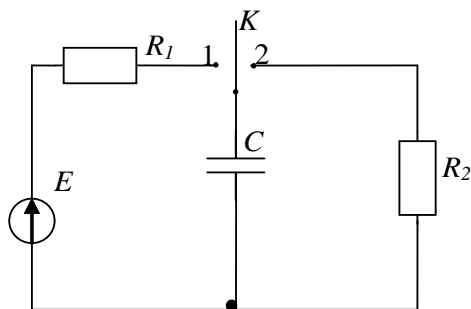


Рисунок 3.1 Схема для изучения переходных процессов в цепи RC

Предположим, что конденсатор C предварительно разряжен, и в момент времени $t = 0$ ключ K переводится в положение 1. По замкнутой цепи потечёт ток и начнётся процесс зарядки конденсатора. В исходном положении имело место условие $u_C(0) = 0$;

В процессе заряда конденсатора для левой части цепи уравнение по 2-му закону Кирхгофа выглядит [2]

$$U_{R1} + U_C = E,$$

или же

$$R_1 i + \frac{1}{C} \int i dt = E.$$

Проведя дифференцирование имеем

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{R_1 C} i = 0. \quad (3.1)$$

Полученное выражение представляет собой простейшее линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Как известно, для решения дифференциальных уравнений необходимы ещё начальные условия, т.е. должны быть известны значения искомой функции $i(t)$ и её производных до $(n-1)$ -го порядка в начальный момент времени. Поскольку в данном случае мы имеем дело с уравнением первого порядка достаточно знать лишь значение тока при $t = 0$, т.е. величину $i(0)$. При изучении переходных процессов в электрических цепях для формулирования начальных условий обычно пользуются законами коммутации. При замыкании ключа при $t = 0$ в положение 1, по цепи потечёт ток и конденсатор начинает заряжаться, согласно второму закону коммутации напряжение на конденсаторе при этом $U_C(0) = 0$; и ЭДС источника E полностью выделяется как падение напряжения на резисторе R_1 . Тогда начальное значение тока равно $i(0) = I_0 = E/R_1$.

Выражение (5.1) можно записать в виде $\frac{di}{i} = -\frac{1}{R_1 C} dt$.

Интегрирование даёт $\ln i = -\frac{1}{R_1 C} t + A$.

Постоянная интегрирования A может иметь любое значение и в данном случае удобнее ее писать в виде $A = \ln I_0$ то есть как логарифм некоторого постоянного числа I_0 .

Тогда $\frac{\ln i}{I_0} = -\frac{1}{R_1 C} t$;

отсюда имеем

$$i = I_0 e^{-\frac{1}{R_1 C} t};$$

при $t = 0$

$$i(0) = I_0 = E/R_1.$$

Таким образом, при таком способе введения постоянной интегрирования ($A = \ln I_0$) величина I_0 имеет смысл значение тока в начальный момент времени, тогда окончательно для закона изменения зарядного тока получим выражение

$$i = E/R e^{-\frac{1}{RC} t} = E/R e^{-t/\tau}. \quad (3.2)$$

Величина $RC = \tau$ имеет размерность времени, является основным параметром, характеризующим переходной процесс в RC цепи и называется постоянной времени цепи. Физически этот параметр характеризует скорость протекания (длительность) переходного процесса. График функции (3.2) приведён на рисунке 3.2 [3].

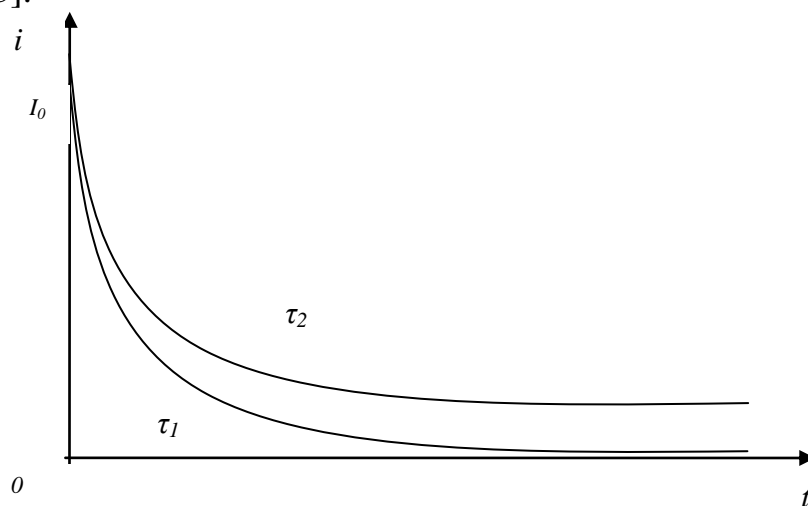


Рисунок 3.2 Изменение тока в RC цепи при зарядке конденсатора

Таким образом, зарядный ток, начиная с максимального значения, равного $I_0 = \frac{E}{R_1}$ при $t = 0$, убывает во времени по экспоненциальному закону. В момент времени $t = \tau$ согласно выражению (5.2) имеем

$$i(t) = \frac{E}{R_1} \cdot \frac{1}{e},$$

то есть величина тока уменьшается в e раз.

Напряжение на резисторе R_1 , согласно закону Ома может быть записано в виде [4]

$$U_{R_1}(t) = i(t) \cdot R_1 = E e^{-t/\tau}. \quad (3.3)$$

Используя выражение $U_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$

можно показать, что напряжение на конденсаторе в процессе зарядки меняется по закону [4]

$$U_c(t) = E \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (3.4)$$

Необходимо обратить внимание на следующее. Как видно из графиков, длительность переходных процессов теоретически является бесконечной большой, например, кривая для тока заряда конденсатора асимптотически стремится к нулю, никогда её не достигая. Однако, на практике переходной процесс считается завершённым по достижении времени $t = (3 \dots 5)\tau$. За время τ экспонента убывающей величины уменьшается до 0,37 первоначального значения, и соответственно, экспонента возрастающей величины увеличивается до 0,63 установившегося значения. Примеры определения величины τ демонстрируются на рисунках 3.3 и 3.4.

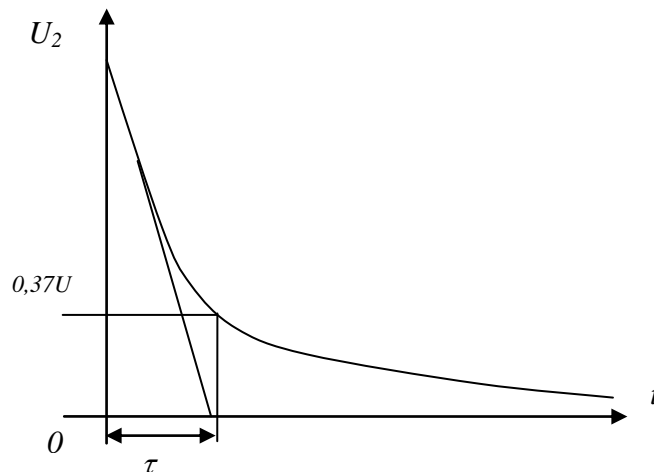


Рисунок 3.3 Определение постоянной времени τ

При переключении ключа K после зарядки конденсатора в положение 2 начинается процесс разряда через резистор R_2 , при этом разрядный ток (напряжение на резисторе R_2) определяется выражением

$$i(t) = -\frac{E}{R_2} \cdot e^{-t/\tau}; \quad U_R(t) = -E \cdot e^{-t/\tau}.$$

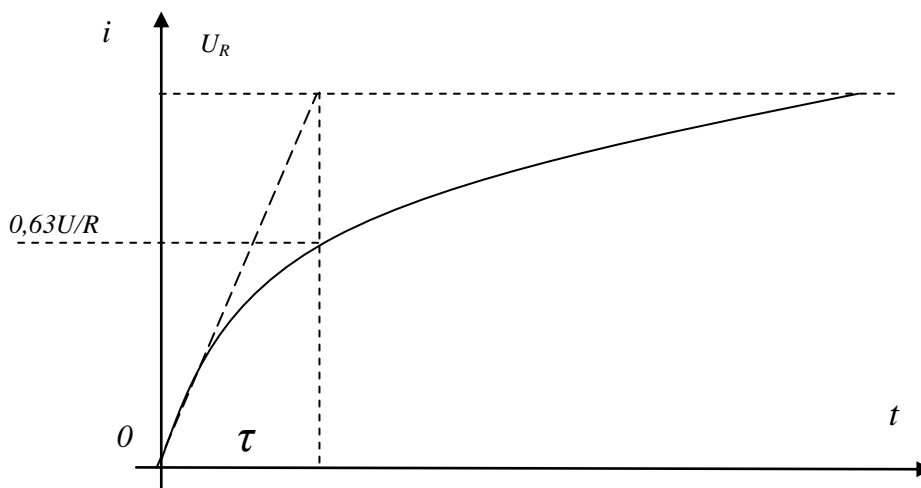


Рисунок 3.4 Определение постоянной времени τ

Разность потенциалов между обкладками определяется выражением

$$U_c = E \cdot e^{-t/\tau}.$$

3.2.2 Переходный процесс в цепи RL

Переходные процессы в цепи RL можно изучить с помощью элементарной цепи, схема которой приведена на рисунке 3.5.

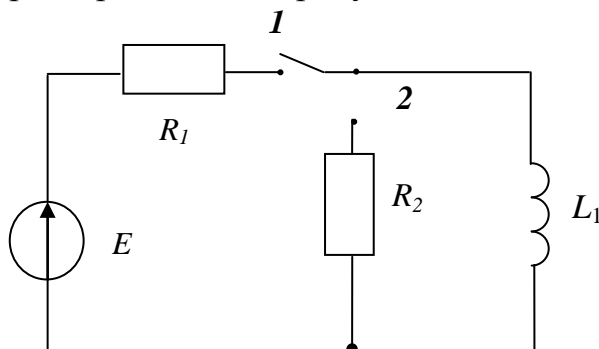


Рисунок 3.5 Схема для изучения переходных процессов в RL цепях

Не проводя математические выкладки, приведём соответствующие выражения в готовом виде. При подключении источника к цепи RL (ключ замыкается в положение 1) ток в цепи и напряжение на элементах R и L определяются по формулам [5]:

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{E}{R} \left(1 - e^{-t/\tau} \right); \\ U_R(t) &= E \left(1 - e^{-t/\tau} \right); \\ U_L(t) &= E \cdot e^{-t/\tau}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

При отключении катушки источника с одновременным замыканием на разрядное сопротивление R_2 имеют место выражения

$$\begin{aligned} i &= \frac{E}{R} e^{-t/\tau}; \\ U_R &= E e^{-t/\tau}; \\ U_L &= -E \cdot e^{-t/\tau}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3 Описание лабораторной установки

3.3.1 Электрическая схема для исследования переходных процессов приведена на рисунке 3.6.

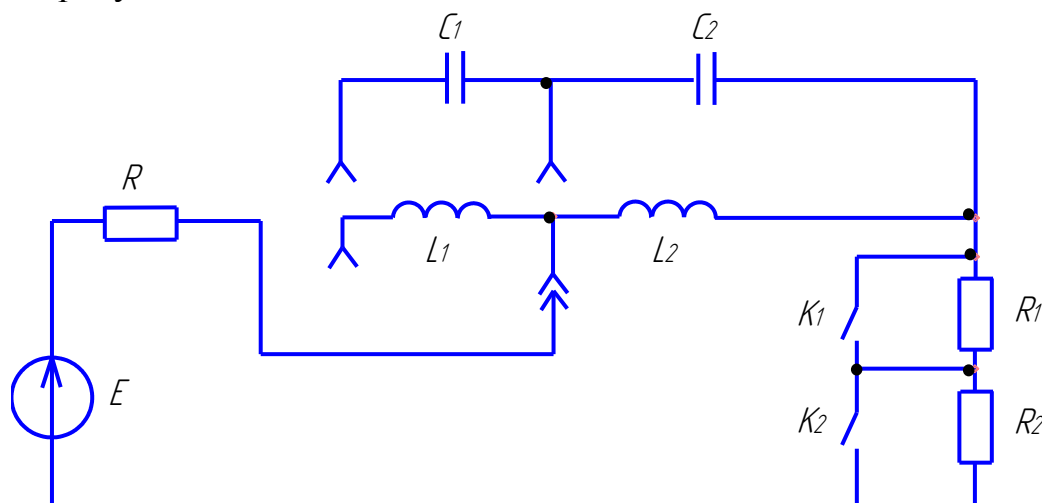


Рисунок 3.6 - Схема для исследования переходных процессов

В данной работе для изучения переходных процессов используется электронный осциллограф. В экспериментальном стенде предусмотрена возможность подачи напряжения на вход осциллографа с каждого из элементов электрической цепи: R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , C_1 , C_2 . На вход схемы с генератора прямоугольных импульсов (или с мультивибратора) подаются импульсы прямоугольной формы. Во время действия импульса осуществляется, например, заряд, какого-либо конденсатора, а во время паузы между двумя импульсами его разряд через один из резисторов R_1 , R_2 или сразу через оба резистора, и внутреннее сопротивление генератора импульсов.

3.3.2 Поочередно подавая импульсы входного напряжения на элементы исследуемой цепи по осциллограмме зарисовать импульсы напряжения на индуктивностях L_1 , L_2 и конденсаторах C_1 , C_2 .

3.4 Порядок выполнения работы

3.4.1 Используя методику, приведенную на рисунках 3.3 и 3.4, по осциллограммам определить величину постоянной времени цепи.

3.4.2 Вычислить величины L , и C используя формулы для постоянных времени RL и RC цепи (значения R задаются преподавателем):

$$\tau_L = L/R, \quad \tau_C = RC.$$

3.4.3 Результаты вычислений занести в таблицы 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 - Результаты измерений и вычислений в цепи RL

№ опыта	Измеренные значения		Вычисленные значения
	$\tau_{L,C}$	$R, \text{ Ом}$	$L, \text{ Гн}$
1			
2			
3			

Таблица 3.2 - Результаты измерений и вычислений в цепи RC

№ опыта	Измерить		Вычислить
	$\tau_{C,C}$	$R, \text{ Ом}$	$C, \text{ Ф}$
1			
2			
3			

35 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе оформить в соответствии с требованиями, изложенными в СТО БГАУ 2018.

Он должен содержать:

- а) цель работы;
- б) принципиальные схемы установки для исследования переходных процессов;
- в) формулы, используемые для обработки экспериментальных данных;
- г) полученные экспериментальные данные в виде таблиц;
- д) полученные основные параметры исследуемых переходных процессов.

3.6 Вопросы для самоконтроля

3.6.1 Что собой представляют переходные процессы в электрических цепях?

3.6.2 Как формулируются первый и второй законы коммутации?

3.6.3 Как определяется постоянная времени цепи и как она влияет на длительность переходного процесса?

3.6.4 Как влияет изменение постоянной времени RL цепи на длительность переходного процесса? Сравнить со случаем RC цепи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учеб. пособие / Г. И. Атабеков. - 7-е изд., стер. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2009. - 592 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов. - 10-е изд. - Москва: Гардарики, 2002. - 640 с. : ил.
3. Жаворонков, М. А. Электротехника и электроника: учеб. пособие / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. - Москва: Академия, 2005, 2008, 2010. – 395 с.
4. Кононенко, В.В. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов / В. В. Кононенко и др. ; под ред. В. В. Кононенко. - 5-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. - 778 с.
5. Теоретические основы электротехники: учебник / А.Н.Горбунов [и др.]. – Москва: УМЦ «ТРИАДА», 2003. – 304 с.: ил.
6. Рекус, Г.Г. Основы электротехники и промэлектроники в примерах и задачах с решениями: учебн. пособие для студентов вузов / Г.Г. Рекус. – Москва: Высшая школа, 2008. – 343 с.: ил.