

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна»
Филиал «Протвино»
Кафедра «Автоматизация технологических процессов и
производств»

В.И. Дягилев

Электронное учебное издание

Дягилев В.И.

Лабораторные работы по дисциплине
«Электротехника и электроника»
Электротехника

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано
кафедрой автоматизации технологических процессов и производств
филиала «Протвино» государственного университета «Дубна»
в качестве методического пособия для студентов,
обучающихся по направлениям
«Автоматизация технологических процессов и производств»,
«Информатика и вычислительная техника»

Филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна»
142281 г. Протвино Московской обл.,
Северный проезд, д. 9

Протвино
2016

ББК 31.33

Д99

Рецензент:

доктор физико-математических наук, начальник лаборатории
ФГБУ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
В.С. Селезнев

Дягилев, В.И.

Д99 Лабораторные работы по дисциплине «Электротехника и электроника». Электротехника: электронное методическое пособие / В.И. Дягилев. — Протвино, 2016. — 59 с.

Методическое пособие содержит описание пяти лабораторных работ по дисциплине «Электротехника и электроника». Электротехника: «Исследование режимов работы источника питания на переменную нагрузку», «Исследование режимов работы электрических цепей», «Электрические цепи переменного тока, резонансные явления», «Исследование магнитных сердечников трансформаторов и дросселей», «Однофазный трансформатор».

Методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Информатика и вычислительная техника».

ББК 31.33

Библиографический список

1. Рекус, Г.Г. Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники / Г.Г. Рекус, В.Н. Чесноков. — М. : Высш. школа, 2001. — 254 с.
2. Данилов, И.А. Общая электротехника с основами электроники / И.А. Данилов, П.М. Иванов. — М. : Высш. школа, 2000. — 752 с.

© Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна», филиал «Протвино», 2016
© Дягилев В.И., 2016

По завершению испытаний, можно построить график, который строил осциллограф на протяжении всей работы схемы, для чего не-

обходимо выделить осциллограф и нажать .

Далее для построения сетки нажимаем правую клавишу мышки на области построения графика и в появившемся окне выбираем «Toggle Grid» (появляется сетка). Для того чтобы ячейки были нужного нам формата, выбираем в том же меню «Properties» и видим вкладки вроде:

- «General» — (заглавие графика, цвет сетки и др.).

- «Left Axis», «Bottom Axis» (координатные оси, системы единиц, цена деления, цвет, подписи и др.) Именно в этих закладках мы и будем менять ширину и высоту ячеек. Делается это в пункте «Divisions». Количество делений сетки — «Number», интервал для проставления численных отметок — «Frequency», кол-во знаков после запятой для численных отметок — «Precision». Вот значение «Number» и будем увеличивать. (Данного рода операция относится к обоим осям «Left Axis», «Bottom Axis»).

- «Traces» (сами получившиеся кривые, их цвет, размер и др.).

В конце концов, Ваш график должен выглядеть примерно так:

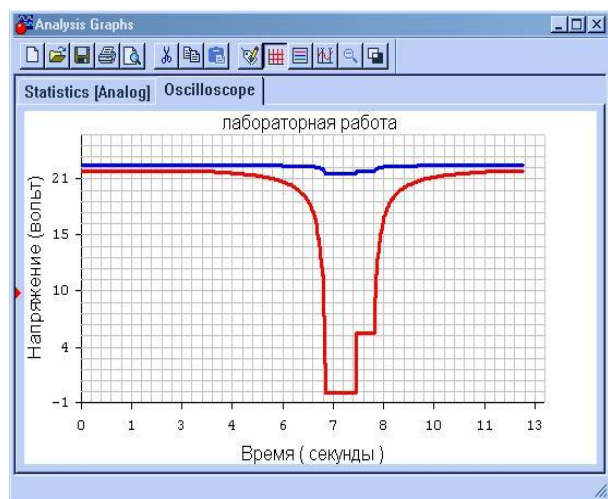


Рис. 4

Оглавление

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ	5
Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы источника питания на переменную нагрузку	8
1.1 Цель работы	8
1.2 Основные теоретические положения	8
1.3 Порядок проведения работы	11
1.4 Задание по работе	13
1.5 Методические указания по выполнению работы	14
1.6 Вопросы для самопроверки	14
Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы электрических цепей	16
2.1 Цель работы	16
2.2 Теоретическая часть	16
2.3 Задание по работе	22
2.4 Порядок проведения работы	22
2.5 Порядок оформления отчета по работе	24
2.6 Вопросы для самопроверки	25
Лабораторная работа № 3. Цепи переменного тока	26
3.1 Цель работы	26
3.2 Основные теоретические положения	26
3.3 Описание лабораторного стенда	28
3.4 Порядок проведения работы	29
3.5 Оформление результатов работы	30
3.6 Вопросы для самопроверки	30
Лабораторная работа № 4. Исследование магнитных сердечников трансформаторов и дросселей	31
4.1 Цель работы	31
4.2 Теоретические положения	31
4.3 Задания по работе	40
4.4 Вопросы для самопроверки	43
Лабораторная работа № 5. Однофазный трансформатор	45
5.1 Цель работы	45
5.2 Основные теоретические положения	45
5.3 Задание по работе	49
5.4 Методические указания по выполнению работы	49
5.5 Вопросы для самопроверки	52

Приложение	53
Пособие для выполнения лабораторной работы по электронике и электротехнике с помощью ЭВМ	54
Библиографический список	59

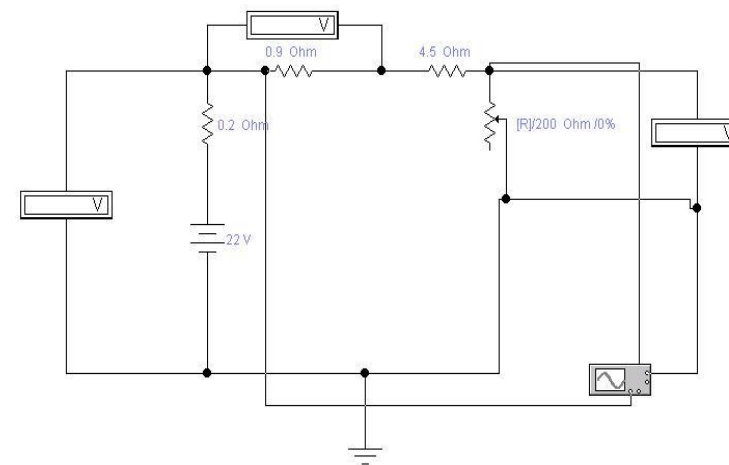


Рис. 2.

После чего можно on-line наблюдать падения напряжения на нагрузке и генераторе при включенном источнике (в контекстном меню для осциллографа выбрать «open»). Картина будет выглядеть примерно так:

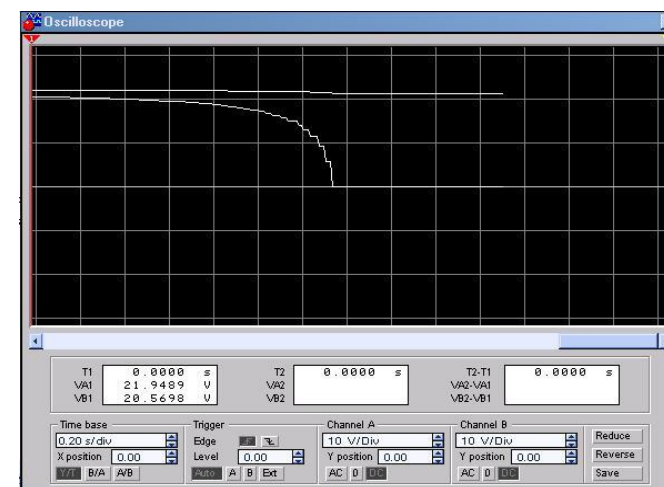


Рис. 3

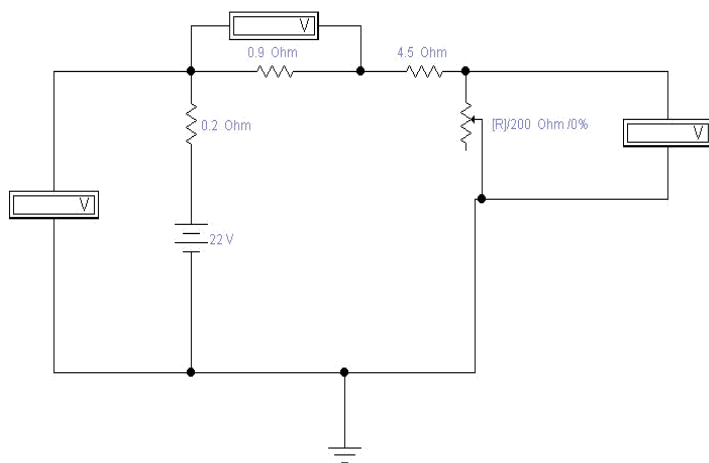


Рис. 1. Пример цепи

Особое внимание следует уделить «управлению» реостата. В окне его свойств можно настроить скорость падения (шаг) сопротивления в процентах от общей (по умолчанию — 5 % «Increment»), а также начальное значение («Setting»).

После того, как цепь будет собрана, включить питание необходимо нажатием на кнопку  (переведя ее в состояние «1»). Далее меняем сопротивление реостата путем нажатия клавиши «R» для понижения, «Shift + R» — для увеличения на шаг в процентах, указанный ранее («Increment») и наблюдаем за изменением напряжения на компонентах цепи (если напряжение показывается со знаком «-», то необходимо поменять полярность включения вольтметра). Полученные данные можно поэтапно вводить в Excel или в аналогичные программы, после чего можно построить графики.

Для лучшего эффекта и наглядности эксперимента, можно задействовать «осциллограф» ( -> ). Также необходимо установить «землю» ( -> ).

Включить его в схему надо так, как показано на рис. 2:

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ

Подготовка к лабораторным работам.

Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий в институте и в течение определенного времени. Поэтому для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

- предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;
- внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит основная цель и задача этой работы;

– по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;

– до проведения лабораторной работы подготовить в рабочей тетради соответствующие схемы, миллиметровку для построения графиков, таблицы наблюдений и расчетные формулы.

Указания к выполнению лабораторных работ.

Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка к лабораторной работе. При этом необходимо соблюдение следующих требований:

– перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его номинальными данными, а также с измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы;

– сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Целесообразно вначале соединить все элементы цепи, включаемые последовательно, а затем — параллельно. Электрические цепи, включаемые параллельно, рекомендуется соединять проводами другого цвета;

– после окончания сборки электрическая цепь должна быть предъявлена для проверки. Включать цепь под напряжением можно только с разрешения преподавателя или дежурного лаборанта;

– запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро;

– результаты измерений заносятся студентом в свою рабочую тетрадь;

– после выполнения отдельного этапа лабораторной работы результаты опыта вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляются для проверки преподавателю до разработки электрической цепи;

– разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой можно только по разрешению преподавателя;

– после окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок;

– в течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя;

– неподготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Оформление отчета по лабораторным работам.

Составление отчета о проведенных исследованиях является важнейшим этапом выполнения лабораторной работы. По каждой выполненной работе в рабочей тетради составляют отчет, руководствуясь следующими положениями:

– указать название и порядковый номер лабораторной работы, а также кратко сформулировать цель работы;

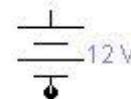
– указать тип и номинальные данные испытуемых электрических машин и аппаратов, а также типы, номера, пределы измерений, класс точности и системы измерительных приборов, используемых при выполнении лабораторной работы (например, амперметр типа М42100, № 01985, магнитоэлектрической системы, 30 делен., предел измерений 3 А, кл. 1,5);

– схемы и графики вычертить с помощью трафарета радиоинженера или циркуля и линейки с соблюдением принятых стандартных условных обозначений;



и реостат. Установим их так, чтобы было удобно далее собирать цепь. С помощью контекстного меню (при выделении (одинарным нажатием левой кнопки мыши, после чего элемент «краснеет» ☺) нужного элемента и щелчке правой кнопки мыши) можно «вращать» элементы с помощью команды «Rotate». Так же в том же в контекстном меню есть команда «Component properties», которая открывает окно свойств элемента, где можно настроить все его параметры (сопротивление для резисторов, напряжение для источника и т. д.). Соединять элементы схем следует так:

– Подводим мышь к концу элемента так, чтобы появился черный кружок, например



– Нажимаем и удерживаем кнопку мыши.

– Далее ведем мышь в сторону, где находится тот элемент, с которым необходимо произвести соединение (при этом за указателем мыши «тянется» соединительный провод).

– Наведя на вывод нужного элемента так, чтобы на выводе появился характерный кружок, отпускаем кнопку мыши.

– Если же соединение необходимо произвести прямо с проводом, соединяющим элементы, то действия аналогичны, но соединения может быть организовано в любом месте того провода.

Далее устанавливаем вольтметры согласно схеме лабораторной

работы, для чего щелкаем на панели приборов , потом выбираем



, которых надо соответственно 3 штуки. В конце концов, соединяем все элементы в цепи и имеем что-то вроде показанной на рис. 1.

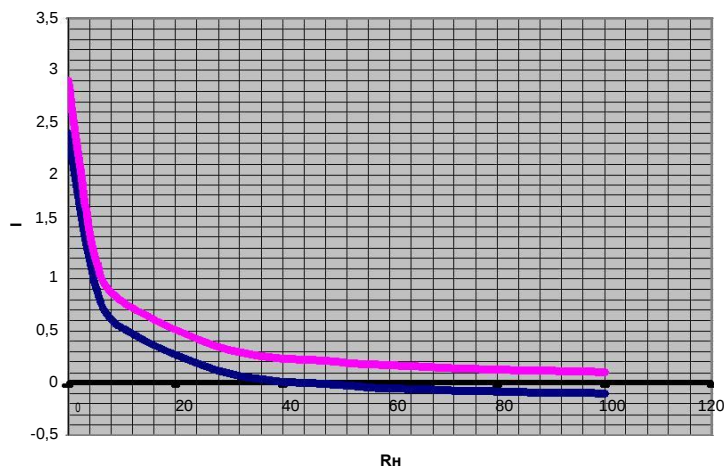


Рис. 12. График зависимости токов источников от сопротивления нагрузки

Пособие для выполнения лабораторной работы по электронике и электротехнике с помощью ЭВМ

Справочный материал и руководство к выполнению представлено в виде наглядных снимков и сопровождается необходимыми комментариями.

Запускаем программу и первым делом устанавливаем источник

питания, нажав на панели приборов значок , а затем наводим

мышку на значок , щелкаем мышью и, не отпуская кнопки, устанавливаем выбранный элемент на необходимое нам место. Хотим заметить, что это аналогично выполняется и для всех остальных приборов и элементов цепей. Далее устанавливаем необходимое количество резисторов, в данной работе — 3 постоянных и один — переменный,

щелкнув по . Выберем и установим 3 резистора постоянных

— графические зависимости дать в прямоугольной системе координат в масштабе, с равномерными шкалами; произвольный перенос начала координат не допускается; на графиках необходимо наносить экспериментальные точки;

— отчет по каждой лабораторной работе должен содержать основные выводы [1].

Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы источника питания на переменную нагрузку

1.1 Цель работы

Проверка результатов экспериментального исследования цепи с источником питания, линией электропередачи и переменной нагрузкой с помощью расчета по законам Ома и Кирхгофа, а также с помощью моделирования на ЭВМ.

1.2 Основные теоретические положения

На практике часто встречается проблема — необходимость надежного и бесперебойного электроснабжения потребителей. В данной лабораторной работе ставится задача определения общих критериев для выбора параметров системы «генератор—потребитель».

Для примера рассмотрим следующую задачу.

Генератор постоянного тока с ЭДС $E = 230$ В и внутренним сопротивлением $R_0 = 0,2$ Ом питает электрической энергией производственный объект, на котором установлены электрические двигатели (станков, вентиляторов) и нагревательные печи. Число работающих потребителей различно в разные часы суток, а, значит, и ток в цепи генератора изменяется в широких пределах.

Определить:

1. Предельные режимы генератора.
2. Построить зависимости тока, мощностей источника и потребителя, КПД генератора в функции потребляемого тока и отношения сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению генератора с учетом сопротивления линии электропередачи (кабельная линия).

Решение задачи:

Генератор соединен с потребителем линией электропередачи (провода, кабель определенной длины).

Потребители коммутируются ключами (число их равно n) Схемой на рис. 1 трудно пользоваться при расчетах, поэтому составим схему замещения (рис. 2), где учтем все параметры исходной схемы.

Приложение

В данном пособии подробно описан ход выполнения лабораторных работ по курсу Электротехника на ЭВМ.

Цель данного пособия — предоставить студенту ход лабораторной работы на компьютере в программе *Electronics Workbench*, чтобы он научился работать с этой программой и в дальнейшем выполнял лабораторные работы на компьютере.

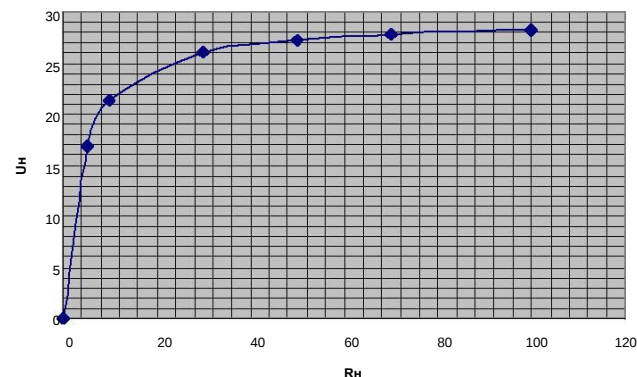


Рис. 11. График зависимости напряжения на нагрузке от ее сопротивления

На рис. 11 приведена зависимость напряжения на нагрузке от ее сопротивления.

На рис. 12 приведены зависимости токов источников от сопротивления нагрузки. Наглядно представлена картина перехода одного источника в состояние потребителя (положение «нижней» ломаной, определяющей ток на первом источнике, ниже оси абсцисс, т. е. генератор начинает «потреблять» ток). Соответственно второй генератор может работать только в режиме источника тока, дабы не нарушать закон сохранения энергии. Данного рода процессы обусловлены тем, что источники имеют как разные внутренние сопротивления, так и разные ЭДС.

$$\Phi_m = U_{2\text{ном}} / 4,44 f_1 w_1, B_m = \Phi_m / S,$$

где w_1 — число витков первичной обмотки трансформатора; S — площадь поперечного сечения сердечника трансформатора (указаны в пас-портных данных);

6. По результатам измерений опыта короткого замыкания (см. п. 4) определить:

а) электрические потери мощности в трансформаторе

$$P_{э\text{ ном}} \approx P_K$$

7. По результатам измерений опыта нагрузки (см. п. 3) при различных токах нагрузки определить:

а) коэффициент полезного действия трансформатора при

$$\gamma = 1: \eta = \frac{P_n}{P_{\text{т}}}$$

5.5 Вопросы для самопроверки

1. Поясните назначение трансформатора.
2. Объясните устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
3. Как и с какой целью проводится опыт холостого хода трансформатора?
4. Объясните, почему коэффициент трансформации трансформатора определяется из опыта холостого хода.
5. Почему потери мощности в магнитопроводе трансформатора не зависят от тока нагрузки?
6. Как и с какой целью проводится опыт короткого замыкания трансформатора?
7. Почему при опыте короткого замыкания можно пренебречь потерями мощности в магнитопроводе трансформатора?
8. Почему при изменении тока во вторичной обмотке трансформатора изменяется ток и в первичной его обмотке?
9. Основное уравнение трансформатора?[1]

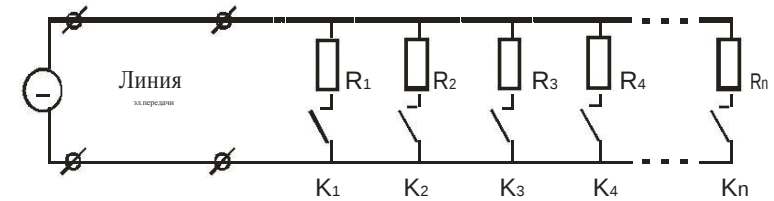


Рис. 1. Исходная принципиальная схема

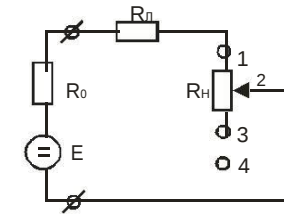


Рис. 2. Схема замещения

Реальные объекты (числом n) заменены переменным резистором R_H , включенным по реостатной схеме. R_L — сопротивление линии (двух проводов).

Режимы цепи:

1. Режим холостого хода (точка 4). Все потребители отключены; ток от генератора равен нулю. При этом $U_{\Gamma} = E = 230 \text{ В}$.
2. Режим короткого замыкания (точка 1). При этом ток в цепи:

$$J_K = \frac{E}{R_0 + R_L}.$$

Пусть сопротивление линии $R_L = 0,8 \text{ Ом}$, тогда

$$J_K = \frac{230}{0,2 + 0,8} = 230 \text{ А};$$

$$P_{\text{ист.к}} = 230^2 \cdot 1 = 52,9 \text{ кВт};$$

$$P_H = 0.$$

Поэтому вся мощность генератора рассеивается внутри самого его и в линии электропередач. В результате генератор и провода могут сильно нагреться и выйти из строя.

Оба эти режима являются крайними, а нас больше интересуют промежуточные состояния реостата.

Определение зависимости $J = f \frac{R_H}{R_0 + R_L}$ или $J = f \frac{R_H}{R_1}$

Ток цепи $J = \frac{E}{R_1 + R_H}$, где $R_1 = R_0 + R_L = 1 \text{ Ом}$.

$$J = \frac{E}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + R_H/R_1} = \frac{230}{1} \cdot \frac{1}{1 + R_H/R_1} = \frac{230R_1}{R_H + R_1} = \frac{230}{R_H + 1}$$

Далее можно определить остальные параметры схемы для различных значений R_H .

$U_\Gamma = E - JR_0$ — напряжение на зажимах генератора.

$U_H = E - JR_1 = JR_H$ — напряжение на нагрузке (в конце линии).

$U_L = JR_L$ — потери напряжения на линии.

$P_\Gamma = U_\Gamma J$ — мощность генератора.

$P_H = U_H J$ — мощность в нагрузке.

$P_L = U_L J$ — мощность потерь в линии.

Определение КПД:

$$\eta = \frac{P_H}{P_\Gamma} = \frac{J^2 R_H}{J^2 (R_H + R_1)} = \frac{R_H}{R_H + R_1} = \frac{1}{1 + R_1/R_H}$$

Проведем анализ схемы. По расчетным данным построены графики (рис. 3 и 4). Из их рассмотрения видно, что рабочим участком можно признать лишь диапазон отношения R_H в пределах 10—20, R_1

т. к. только здесь U_H мало, а КПД источника весьма высок.

Таким образом, исследование системы «генератор—потребитель» дает возможность оптимизировать процессы энергопотребления.

Номера измерений	Измерения			
	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$
1				
2				
3				
4				

4. Для проведения опыта короткого замыкания:

а) собрать электрическую цепь, принципиальная схема которой приведена на рис. 6

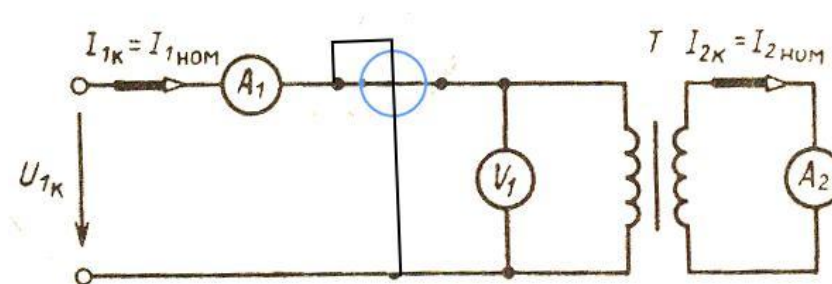


Рис. 6. Схема для опыта короткого замыкания

б) плавно изменяя напряжение на первичной обмотке трансформатора от нуля до значения $U_{1к}$, при котором токи в обмотках достигнут $I_{1 \text{ ном}}$ и $I_{2 \text{ ном}}$, определяемых по паспортным данным, записать значения измеряемых величин в табл.

5. По результатам измерений, проведенных в опыте холостого хода трансформатора (см. п. 2), определить:

Измерения		
$U_{1г}, \text{В}$	$I_{1к}, \text{А}$	$I_{2к}, \text{А}$

а) коэффициент трансформации трансформатора

$$n = U_{1 \text{ ном}} / U_{2 \text{ ном}};$$

б) амплитудные значения магнитного потока и магнитной индукции в сердечнике трансформатора

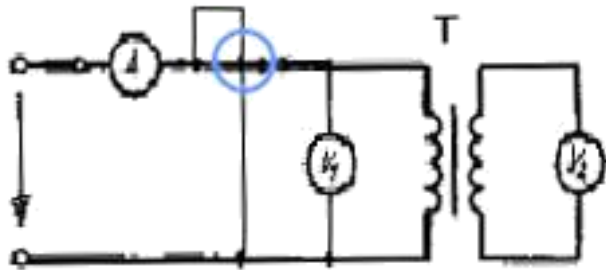


Рис. 4. Схема для опыта холостого хода

$$U_1 = U_{1\text{ном.}}$$

Измерения			Вычисления
$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	η

3. Провести опыт нагрузки трансформатора. Для этого:

а) собрать электрическую цепь, принципиальная схема которой для проведения опыта нагрузки исследуемого трансформатора приведена на рис. 5

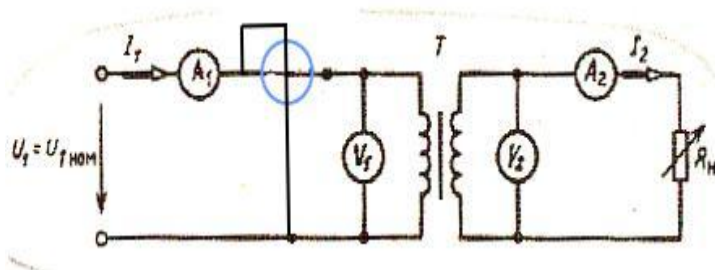


Рис. 5. Схема для снятия внешней характеристики

б) в качестве нагрузки к зажимам вторичной обмотки трансформатора подключить резисторы с переменными и постоянными параметрами, суммарное сопротивление которых рассчитать с учетом того, что ток во вторичной обмотке должен изменяться от $I_2 = 0,1I_{2\text{ном}}$ до $I_2 = (1,2 \dots 1,25)I_{2\text{ном}}$; $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$.

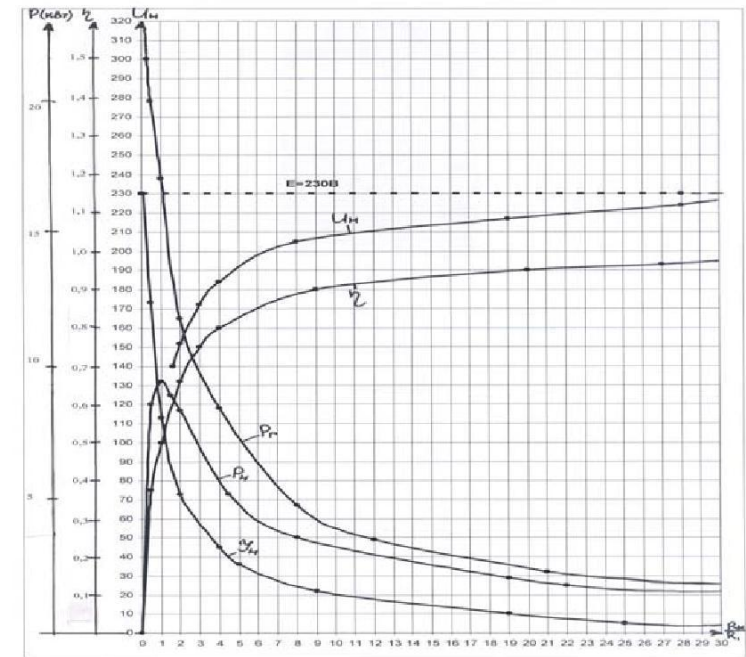


Рис. 3.

1.3 Порядок проведения работы

1. Собрать схему и проверить ее.
2. Провести исследования по программе и занести их результаты в табл.

R_n	$I, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_L, \text{В}$	$P_H, \text{кВт}$	$P_G, \text{кВт}$	$P_L, \text{кВт}$	$\eta, \%$	R_n/R_1	Прим
1	100	180	100	80	10	18	8	55,5	1	
2	66	186,8	132	52,8	8,7	12,3	3,48	70,6	2	
4	40	192	160	32	6,4	7,68	1,28	83,3	4	
9	20	196	180	16	3,6	3,92	0,3	91,8	9	
14	13,3	197,7	186	10,6 4	2,5	2,6	0,14	94	14	
19	10	198	190	8	1,9	1,98	0,08	95,9	19	
39	5	199	195	4	0,97	1	0,03	97,9	39	

Для $E = 200$, $R_0 = 0.2 \text{ Ом}$ $J =$ — .

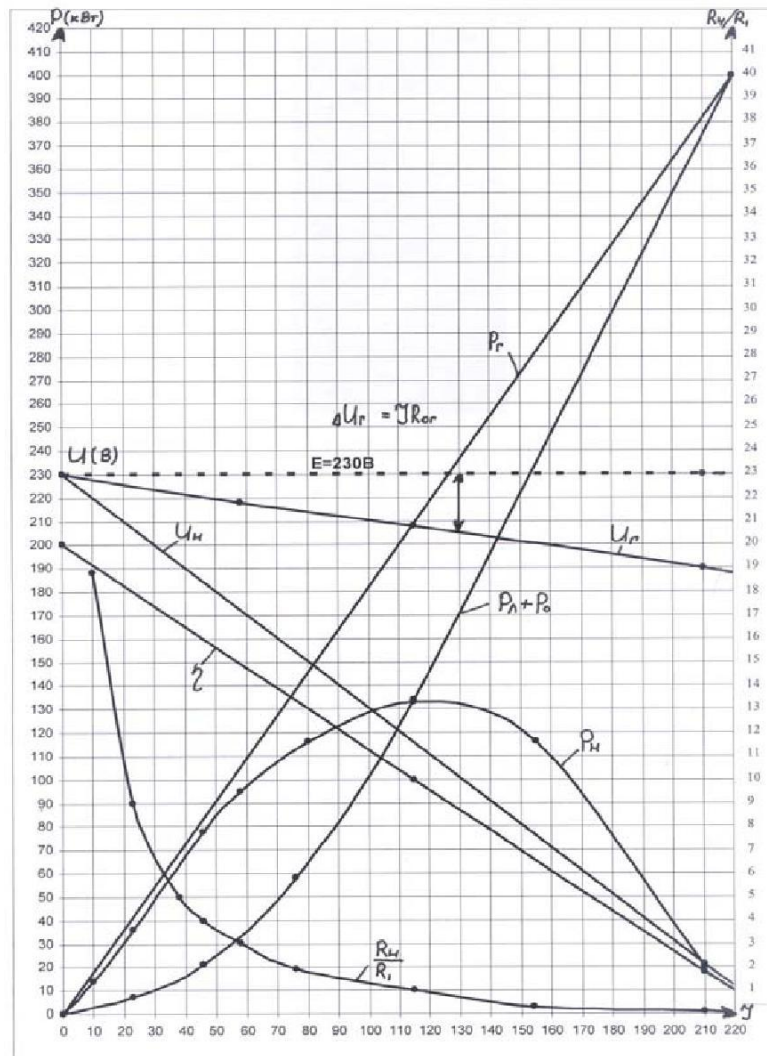


Рис. 4. Расчетные графики в схеме источника питания с переменной нагрузкой

форматора. КПД современных трансформаторов весьма высок. С увеличением номинальной мощности трансформатора КПД растет, причем для мощных трансформаторов он достигает значений порядка 98—99 %.

5.3 Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством и паспортными данными однофазного трансформатора.
2. Провести опыт холостого хода исследуемого однофазного трансформатора.
3. Осуществить режим нагрузки однофазного трансформатора путем включения в его вторичную цепь переменного активного сопротивления.
4. Провести опыт короткого замыкания однофазного трансформатора.
5. На основании полученных экспериментальных данных определить основные параметры трансформатора и построить его рабочие характеристики.
6. Составить краткие выводы по работе.

5.4 Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с приборами, аппаратами и оборудованием стенда, используемыми при выполнении работы, и занести в отчет по лабораторной работе номинальные технические данные исследуемого трансформатора.
2. Провести опыт холостого хода. Для этого:
 - а) в соответствии с принципиальной схемой рис. 4 собрать электрическую цепь;

Для этого достаточно к первичной обмотке трансформатора подвести напряжение U_1 , сниженное (в зависимости от типа и мощности трансформатора) в 10—20 раз по сравнению с соответствующим номинальным значением напряжения $U_{1\text{ ном}}$.

Можно считать, что при опыте короткого замыкания вся мощность P_K , потребляемая трансформатором, идет на нагрев обмоток трансформатора, т. е. равна электрическим потерям $P_э$ в проводах обмоток при номинальной нагрузке:

$$P_K = P + P \approx R I_{2\text{ ном}}^2 \quad I_1' = I_{2\text{ ном}}^2 (R_1 + R_2) = I_{2\text{ ном}}^2 R_K,$$

где $I_{1\text{ ном}}$ и $I_{2\text{ ном}}$ — номинальные значения токов соответственно в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

К нагрузочным характеристикам трансформатора относятся зависимости вторичного напряжения U_2 , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и коэффициента полезного действия η от тока нагрузки I_2 потребителя электроэнергии при $\cos\varphi_2 = \text{const}$.

Характер этих зависимостей представлен на рис. 2 и 3.

Зависимость $U_2(I_2)$ напряжения на зажимах вторичной обмотки от тока нагрузки является внешней характеристикой трансформатора.

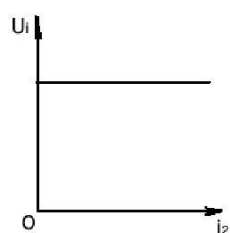


Рис. 2

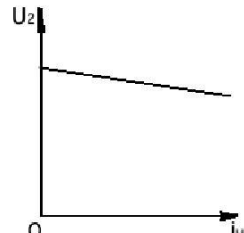


Рис. 3

Коэффициент полезного действия трансформатора, как известно, представляет собой отношение полезной мощности к мощности, потребляемой им из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P} = \frac{P_2}{P_1 + P_2 + P_3},$$

где P_M — потери в магнитопроводе трансформатора (находят из опыта холостого хода); $P_э$ — электрические потери в обмотках транс-

1.4 Задание по работе

1. Порядок проведения работы.

1.1. Собрать схему (рис. 5)

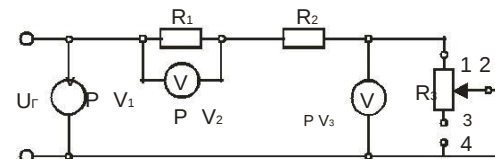


Рис. 5. Схема лабораторного стенда

$$R_1 = 1E;$$

$$R_2 = 4,7E \mid 5,1E;$$

$$R_3 = 100E \mid 150E.$$

В качестве генератора используется выпрямительный блок, имеющий два выхода — нестабилизированный и стабилизированный.

1.2. Записать данные приборов и элементов схемы.

1.3. Подключить цепь (рис. 5) к источнику питания (розетка на линии постоянного напряжения) с разрешения преподавателя.

1.4. Записать данные 8—10 измерений при различных положениях движка реостата R_3 (в том числе 2 крайних) в табл.

ЭКСПЕРИМЕНТ				РАСЧЕТ						
№	U_1	U_2	U_3	U_L	$P_Г$	P_H	P_L	η	R_H	R_H/R_1
	В	В	В	В	Вт	Вт	Вт	ед.	Ом	ед.

1.5. В эту же таблицу занести данные испытаний схемы при ее питании от стабилизированного выходного напряжения генератора (5—6 точек)

1.6. По данным табл. (U_1 , U_2 , U_3) определить величины других параметров схемы.

1.7. Построить графики зависимостей $U_2(J)$, $U_3(J)$, $U_L(J)$, $P_G(J)$, $P_H(J)$, $P_L(J)$, $P(\eta)$, а также $U_2 = U_G$, $U_3 = U_H$, P_G , P_H , P_L , η от соотношения $\frac{R_H}{R_1} = K_H$, где $R_1 = R_0 + R_L$ для двух режимов

работы (см. п. 1.5).

1.8. Составить краткие выводы по работе.

1.9. Провести исследование схемы на ЭВМ и сопоставить результаты обоих исследований.

1.5 Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием (платой для монтажа)

Прибор PV_2 служит для измерения тока

$$J = \frac{U}{R_1} = \frac{U}{10 \text{ Ом}}$$

В этой связи сопротивление линии $R_L = R_1 + R_2$.

2. Положение движка реостата в точке 4 можно имитировать размыканием цепи. Можно отделить движок от обмотки реостата прокладкой из бумаги.

3. В режимах больших токов, особенно в точке короткого замыкания измерения проводить быстро во избежание перегрева резисторов и выхода их из строя.

4. Графики построить на миллиметровой или клетчатой бумаге, аккуратно и разборчиво, подписать их.

5. Методика работы на компьютере приведена ниже.

1.6 Вопросы для самопроверки

1. Описать схему и назначение элементов.
2. Пояснить графики на рис. 3 и 4.
3. Почему графики $U_H(J)$ и $U_H(KH)$ для режима со стабилизированным питающим напряжением отличаются от нестабилизированного напряжения?
4. Дать характеристику согласованного режима работы электрической цепи.

трансформатор является повышающим; при $E_1 > E_2$ он будет понижающим.

Опыт х. х. проводится в целях определения коэффициента трансформации n , магнитного потока Φ_m , а также потерь мощности $P_{м ном}$ в сердечнике магнитопровода трансформатора при номинальном режиме.

Ток холостого хода I_0 , значение которого обычно невелико и составляет порядка 4—10 % от номинального значения тока в первичной обмотке $I_{1 ном}$.

Активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода P_0 , затрачивается на потери мощности в магнитопроводе и электрические потери мощности в первичной обмотке: $P_0 = P_M + P_{\Sigma 1}$.

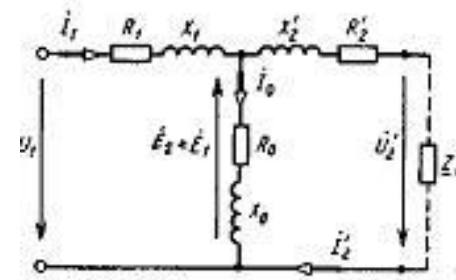


Рис. 2. Схема замещения трансформатора

Опыт короткого замыкания трансформатора проводится в процессе исследований трансформатора для определения электрических потерь мощности в проводах обмоток и параметров упрощенной схемы замещения трансформатора. Этот опыт проводится при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора. При этом напряжение на вторичной обмотке равно нулю ($U_2 = 0$).

При проведении опыта короткого замыкания трансформатора, в отличие от опасного режима короткого замыкания, возникающего в аварийных условиях самопроизвольно, к первичной обмотке трансформатора подводится такое напряжение $U_{1к}$, при котором в обмотках возникают токи, равные соответствующим номинальным их значениям $I_1 = I_{1 ном}$, $I_2 = I_{2 ном}$.

Переменный ток, проходя по виткам первичной обмотки трансформатора, возбуждает в сердечнике магнитопровода переменный магнитный поток Φ . Изменяясь во времени по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, этот поток пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток трансформатора. При этом в соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотках будут наводиться ЭДС, мгновенные значения которых соответственно для первичной и вторичной обмоток можно записать в следующем виде:

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

где w_1 и w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора; E_{m1} и E_{m2} — амплитудные значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках.

Из полученных уравнений следует, что ЭДС E_1 , также как и ЭДС E_2 трансформатора, будут опережать магнитный поток на угол $\frac{\pi}{2}$.

Ток первичной обмотки трансформатора при отключенном потребителе электроэнергии является током холостого хода I_0 . Пренебрегая влиянием насыщения, несинусоидальный намагничивающий ток можно заменить эквивалентным синусоидальным:

$$I_0 = I_{m0} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

При синусоидальном изменении магнитного потока и отсутствии насыщения магнитной системы действующие значения ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора, определяются по формулам:

$$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m,$$

где f — частота переменного тока; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока трансформатора; w_1 и w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора. Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называется коэффициентом трансформации трансформатора:

$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = n$. Если $E_1 < E_2$, то

5. Почему в силовых электрических цепях не применяется согласованный режим?

6. От чего зависит КПД источника питания и как его повысить?[2]

Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы электрических цепей

2.1 Цель работы

Определение токов и напряжений в электрических цепях различной конфигурации экспериментальным и расчетным путем. Моделирование их на ЭВМ.

2.2 Теоретическая часть

Из теории электрических цепей известно несколько методов расчета схем различной конфигурации.

1. Метод контурных токов.
2. Метод расчета по законам Ома и Кирхгофа.
3. Метод наложения.
4. Метод узловых потенциалов.
5. Метод эквивалентного генератора.

На примере исследуемых схем рассмотрим два из этих метода.

На рис. 1 приведена схема для заряда аккумулятора.

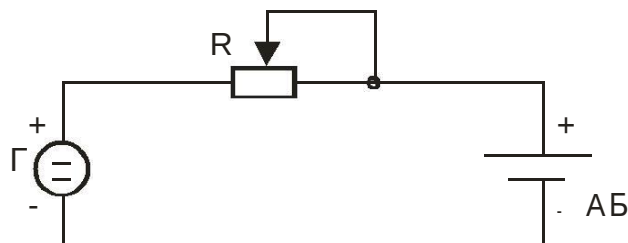


Рис. 1. Схема заряда аккумулятора

Автомобильная аккумуляторная батарея (АБ) заряжается от генератора постоянного тока через резистор R (рис. 1).

Пусть $E_{AB}=10,55$ В — начальная ЭДС стартерной батареи 6СТ-80 из 6 элементов емкостью 80 ампер-часов (Ач);

Лабораторная работа № 5. Однофазный трансформатор

5.1 Цель работы

Ознакомление с принципом работы, характеристиками и методами исследования однофазных трансформаторов.

5.2 Основные теоретические положения

Трансформатор — статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Трансформатор состоит из стального сердечника, собранного из тонких листов электротехнической стали, так же как в катушках индуктивности с ферромагнитным сердечником, изолированных друг от друга с целью снижения потерь мощности на гистерезис и вихревые токи.

На сердечнике однофазового трансформатора (рис. 1) в простейшем случае расположены две обмотки, выполненные из изолированного провода. К первичной обмотке подводится питающее напряжение U_1 . Со вторичной его обмотки снимается напряжение U_2 , которое подводится к потребителю электрической энергии.

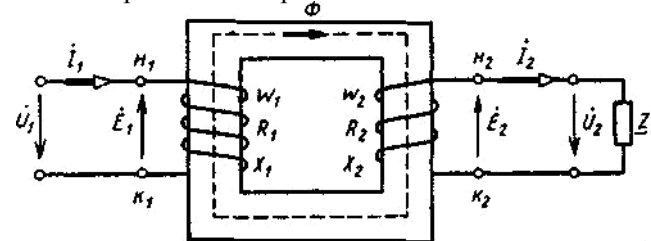


Рис. 1. Принципиальная схема однофазного трансформатора

Во многих случаях трансформатор имеет не одну, а две или несколько вторичных обмоток, к каждой из которых подключается свой потребитель электроэнергии.

3. Как изменится вольт-амперная характеристика катушки индуктивности при увеличении воздушного зазора магнитопровода при питании от сети постоянного и от сети переменного тока?

4. Укажите, как изменится вольт-амперная характеристика катушки индуктивности при увеличении частоты питающего напряжения.

5. Поясните влияние сечения магнитопровода на значение индуктивности катушки.

6. Укажите причину изготовления магнитопровода катушки индуктивности из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

7. В каком случае применяется сплошной магнитопровод катушки индуктивности?

8. Поясните структуру потерь мощности катушки индуктивности при питании постоянным и переменным токами.

9. Объясните причину искажения синусоидальной формы тока при питании катушки индуктивности синусоидальным напряжением.

10. Приведите формулы для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом.[1]

$R_0=0,008$ Ом — внутренне сопротивление АБ;

$U_{\Gamma}=36$ В — напряжение генератора (при токе $J_{\Gamma}=8$ А); $R_{0\Gamma}=0,15$

Ом — внутреннее сопротивление генератора. Определить режимы источников энергии и необходимое сопро-

тивление реостата R в начале и конце зарядки АБ, если в конце зарядки ее ЭДС одного элемента при этом должно быть равно 2,7 В. Составить баланс мощностей.

Для решения применим *метод наложения* к вычислению тока. Его можно определить как алгебраическую сумму токов, созданных источником в отдельности. Для этого изобразим 2 схемы замещения, где действует по одной ЭДС (рис. 2 и 3).

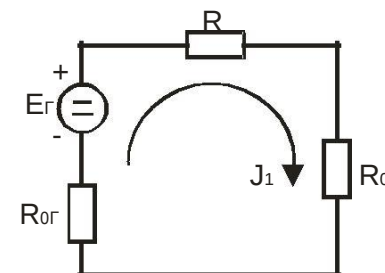


Рис. 2. Первая расчетная схема

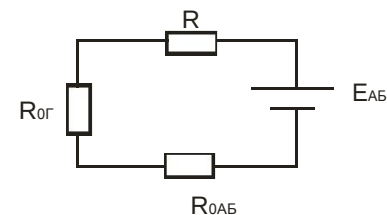


Рис. 3. Вторая расчетная схема

$$J_1 = \sum \frac{E_{\Gamma}}{R},$$

$$J = \frac{E_{0AB}}{\sum R},$$

$$J = J_1 - J_2 = \frac{E_1 - E_2}{\sum R}, \quad (1)$$

где $\sum R = R_{0Г} + R + R_0$.

Рассмотрим режимы работы источников.

Если ток и ЭДС одинаково направлены, то источник работает в режиме генератора. Напряжение на его зажимах $U_{Г} = E_{Г} - JR_{0Г}$. Для нашего случая $E_{Г} = U_{Г} + JR_{0Г} = 36 + 8 \cdot 0,15 = 37,2$ В (2). Если они направлены встречно, то источник работает в режиме приемника энергии, т. е. потребителя, и его можно заменить эквивалентным резистором.

$$R_{АБ} = \frac{U_{АБ}}{J}, \text{ где } U_{АБ} = E_{АБ} + JR_{0АБ}, \quad (3)$$

т. е. напряжение АБ в режиме зарядки больше, чем его ЭДС. Для нашей АБ при токе $J = 8$ А

$$U_{2НАЧ} = 10,55 + 8 \cdot 0,008 = 10,618 \text{ В, а в конце зарядки}$$

$$U_{2КОН} = E_{01} \cdot n + JR_{0АБ} = 2,7 \cdot 6 + 8 \cdot 0,008 = 16,26 \text{ В, где } n = 6 \text{ число элементов АБ.}$$

Определим сопротивление реостата.

$$\text{Из (1) } \sum R = \frac{E_1 - E_2}{J}$$

$$\text{Для начала зарядки } \sum R_{НАЧ} = \frac{37,2 - 10,55}{8} = 3,33 \text{ Ом.}$$

$$\text{Отсюда } R_1 = \sum R_{НАЧ} - R_{0Г} - R_{0АБ} = 3,33 - 0,158 = 3,17 \text{ Ом.}$$

$$\text{В конце зарядки } \sum R_{КОН} = \frac{37,2 - 16,26}{8} = 2,62 \text{ Ом.}$$

$$R_2 = \sum R_{КОН} - R_{0Г} - R_{0АБ} = 2,62 - 0,158 = 2,46 \text{ Ом.}$$

Таким образом, для поддержания постоянства тока заряда аккумуляторной батареи (режим, к которому обычно стремятся) необходимо уменьшать сопротивление реостата от 3,17 до 2,46 Ом.

Составление баланса мощностей.

$$P_{Г} = P_{АБ} + P_{R}.$$

$$U_1 J = J^2 R + U_{АБ} J.$$

Табл. 2.

Но- мера опы- тов	Воздушный зазор, мм	Измеряемые величины, их единицы измерения	Номера измерений					
			1	2	3	4	5	6
1	0	$U, \text{ В}$						
		$I_0, \text{ мА}$						
		$P, \text{ Вт}$						
2	3	$U, \text{ В}$						
		$I_0, \text{ мА}$						
		$P, \text{ Вт}$						
3	5	$U, \text{ В}$						
		$I_0, \text{ мА}$						
		$P, \text{ Вт}$						

6. Обработка результатов измерений:

а) по результатам измерений п. 2, 3 и 4 построить вольт-амперные характеристики $U(I_0)$ при различных воздушных зазорах магнитопровода катушки;

б) по результатам измерений п. 2 рассчитать сопротивление провода катушки при различных значениях воздушного зазора в магнитопроводе и сделать соответствующие выводы по результатам расчетов;

в) по результатам измерений п. 4 построить зависимость тока катушки от воздушного зазора магнитопровода при номинальном напряжении на зажимах катушки, т. е. $I_0(\delta)$ при $U = U_{НОМ} = const$;

г) по результатам измерений п. 4 рассчитать полное сопротивление катушки при номинальном напряжении и различных воздушных зазорах магнитопровода; построить зависимость $Z(I_0)$ при $U = U_{НОМ} = const$;

д) по заданным преподавателем значениям воздушного зазора в магнитопроводе и напряжениям рассчитать параметры схемы замещения и эквивалентную индуктивность катушки.

4.4 Вопросы для самопроверки

1. Объясните назначение магнитопровода катушки индуктивности.
2. Поясните влияние магнитопровода на значение индуктивности катушки.

Синусоидальное напряжение при этом контролируется по вольтметру источника регулируемого переменного напряжения.

3. Снять вольт-амперные характеристики катушки индуктивности при других, указанных в п. 2, воздушных зазорах магнитопровода катушки, полученные результаты занести в табл. 1.

4. Снять вольт-амперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником для трех значений воздушного зазора магнитопровода ($\delta = 0; 3$ и 5 мм) при питании от источника переменного напряжения. Для этого:

а) собрать по монтажной схеме рис. 10 электрическую цепь и подключить ее к регулируемому источнику синусоидального напряжения; измерения тока, напряжения и потребляемой катушкой мощности провести с помощью цифрового амперметра, цифрового вольтметра и ваттметра измерительного комплекта K505;

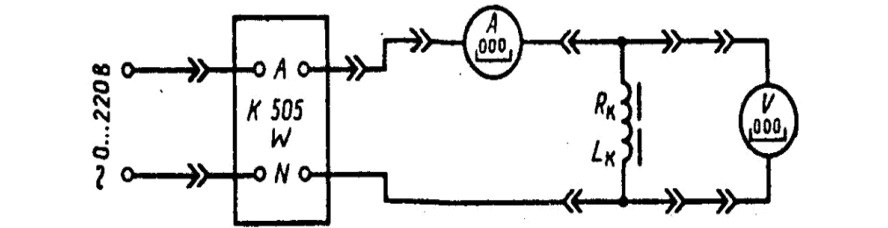


Рис. 10. Схема испытательного стенда для переменного тока

б) установить заданный воздушный зазор магнитопровода катушки и, плавно изменяя напряжение на ее зажимах, примерно через 50 В от нуля, до значения, превышающего номинальное на $10\text{--}15\%$, включая номинальное напряжение 220 В , записать показания всех измерительных приборов в табл. 2. Аналогичные измерения произвести для двух других значений воздушного зазора магнитопровода и записать их в табл. 2.

5. Получить кривую тока катушки с магнитопроводом на экране осциллографа при питании ее синусоидальным напряжением, включив в цепь тока соответствующий шунт. Зарисовать на кальку осциллограммы тока при трех значениях напряжения на зажимах катушки.

В начале зарядки $36 \cdot 8 = 288$
 Вт. $8^2 \cdot 3,17 + 8 \cdot 10,61 = 288$
 Вт.

В конце зарядки $36 \cdot 8 = 288$
 Вт. $8^2 \cdot 2,46 + 8 \cdot 16,26 = 287,82$ Вт.

Таким образом, баланс генерируемой и потребляемой мощностей соблюдается в различных стадиях процесса зарядки АБ.

1) Рассмотрим схему для заряда одновременно двух аккумуляторов и разряда их на нагрузку.

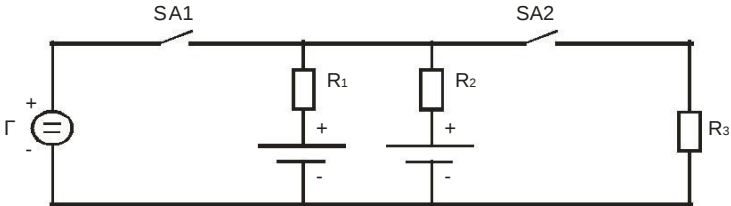


Рис. 4. Схема заряда двух аккумуляторов
 Схема, где Г — генератор (источник питания с внутренним сопротивлением $R_{0Г}$ и ЭДС $EГ$); А1, А2 — аккумуляторы с ЭДС $E1, E2$ и внутренними сопротивлениями R_{01} и R_{02} ; R_1, R_2 — ограничительные резисторы; SA1, SA2 — ключи.

Возможны 4 режима работы схемы. Если обозначить разомкнутое состояние — 0, а замкнутое состояние — 1, тогда имеем

Табл. 1. 4 режима работы схемы

Режимы работы элементов цепи				
№	SA1	SA2	Г	A1 A2
1	0	0	Х.Х.	Х.Х. Х.Х.
2	1	0	источник	потребители
3	0	1	Х.Х.	источники потребители
4	1	1	Источник	источники потребители

Х.Х. — холостой ход

2) Произведем расчет схемы для режима № 3.

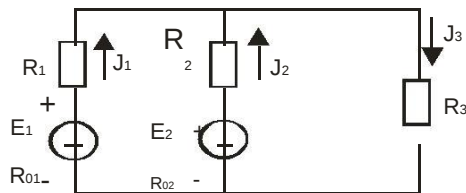


Рис. 5. Расчетная схема замещения

Условие задачи.

Два параллельно включенных аккумулятора E_1 и E_2 через ограничительные резисторы R_1 и R_2 питают общий потребитель R_3 . Определить токи и мощности элементов.

Дано:

$$E_1 = 11 \text{ В};$$

$$R_{01} = 0,02 \text{ Ом};$$

$$R_1 = 0,2 \text{ Ом};$$

$$E_2 = 12 \text{ В};$$

$$R_{02} = 0,01 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 0,2 \text{ Ом};$$

$$R_3 = 5 \text{ Ом}.$$

Определить: $J_1, J_2, J_3, P_1, P_2, P_3, P_{R1}, P_{R2}$

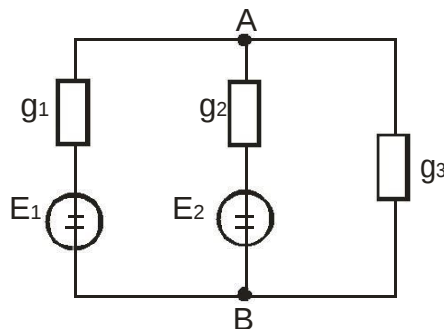


Рис. 6. Схема замещения для расчета методом узловых потенциалов

а) собрать по монтажной схеме рис. 9 электрическую цепь и подключить ее к регулируемому источнику питания постоянным током;

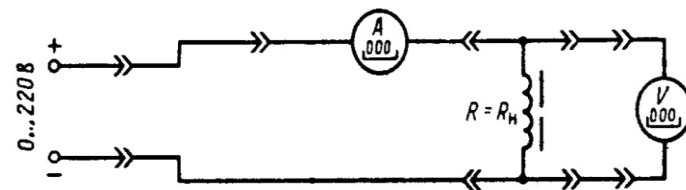


Рис. 9. Схема испытательного стенда для постоянного тока

б) установить заданный воздушный зазор магнитопровода и, изменяя напряжение на входе цепи от нулевого значения до значения, при котором ток в катушке станет равным номинальному, записать измеренные значения тока и напряжения в табл. 1

Табл. 1.

Номера опытов	Воздушный зазор, мм	Измеряемые величины, их единицы измерения	Номера измерений				
			1	2	3	4	5
1	0	$U, \text{В}$					
		$I_0, \text{мА}$					
2	3	$U, \text{В}$					
		$I_0, \text{мА}$					
3	5	$U, \text{В}$					
		$I_0, \text{мА}$					

в) снизить питающее напряжение на катушке индуктивности до нуля во избежание межвиткового замыкания, отключить катушку от источника постоянного напряжения и размагнитить магнитопровод.

Размагничивание магнитопровода проводится включением катушки на регулируемое синусоидальное напряжение, значение которого необходимо плавно изменять от нулевого до номинального и обратно, несколько раз. Перед операцией размагничивания магнитопровода катушки необходимо отключить вольтметр и зашунтировать амперметр, используемые при измерении напряжения и тока катушки.

Характер изменения индуктивности и тока катушки с изменением воздушного зазора в цепи магнитопровода показан на рис. 8. Путем изменения величины воздушного зазора в магнитопроводе можно регулировать ток катушки индуктивности (дресселя) при включении ее в цепь переменного тока при неизменном подводимом напряжении.

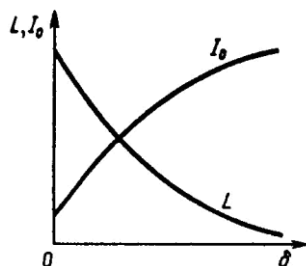


Рис. 8.

4.3 Задания по работе

1. Провести экспериментальные исследования катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником с регулируемым воздушным зазором при питании от источника постоянного и переменного напряжений.

2. По экспериментальным данным построить вольт-амперные характеристики и зависимости тока от воздушного зазора магнитопровода и рассчитать параметры катушки индуктивности.

3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы.

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, используемыми при выполнении исследований. Занести в отчет по лабораторной работе технические данные исследуемой катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником.

2. Снять вольтамперные характеристики $U(I)$ катушки индуктивности при трех различных воздушных зазорах магнитопровода ($\delta = 0$; 3 и 5 мм) и питании ее от источника постоянного напряжения. Для этого:

Составим схему замещения и решим задачу методом узловых потенциалов (двух узлов).

Здесь $g_1 = \frac{1}{R_1 + R_{01}}$ — проводимость цепи R_1, R_{01}, E_1 ;

$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_{02}}$ — проводимость цепи R_2, R_{02}, E_2 ;

$g_3 = \frac{1}{R_3}$ — проводимость цепи R_3 .

Для метода двух узлов применяется формула [2]

$$U_0 = \frac{\sum E g}{\sum g} = U_{AB} \text{ или } U_{AB} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3}.$$

$$g_1 = \frac{1}{0,22} = 4,54545 \text{ см.}$$

$$g_2 = \frac{1}{0,21} = 4,762 \text{ см.}$$

$$g_3 = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ см.}$$

$$U_{AB} = \frac{11 \cdot 4,5454 + 12 \cdot 4,762}{4,5454 + 4,762 + 0,2} = \frac{50 + 57,144}{9,51} = \frac{107,144}{9,51} = 11,266 \text{ В}$$

Определим направление токов.

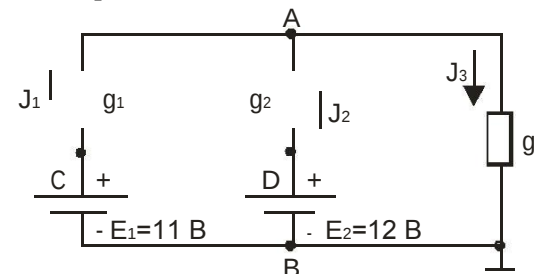


Рис. 7. Расчетная схема для определения направления токов

Потенциал т. А выше потенциала т. С и ниже т. D. Таким образом, направления токов определены (рис. 7).

Определение величины токов и мощностей.

Очевидно, что

$$J_1 = (U_{AB} - E_1) g_1 = 0,26 \cdot 4,54545 = 1,182 \text{ A};$$

$$J_2 = (E_2 - U_{AB}) g_2 = (12 - 11,26) \cdot 4,762 = 3,524$$

$$\text{A}; J_3 = U_{AB} \cdot g_3 = 11,26 \cdot 0,2 = 2,252 \text{ A};$$

$$P_1 = J_1^2 R_{01} = 0,0279 \text{ Вт};$$

$$P_2 = J_2^2 R_{02} = 0,1242 \text{ Вт};$$

$$P_3 = J_3^2 R_3 = 25,3575 \text{ Вт};$$

$$P_{R1} = J_1^2 R_1 = 0,2794 \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = J_2^2 R_2 = 2,4837 \text{ Вт}.$$

Выводы:

1. Схемы, содержащие одну или несколько ветвей с источниками, удобно рассчитывать с помощью методов наложения и узловых потенциалов.

2. В зависимости от параметров схемы питания мощной нагрузки от нескольких генераторов возможны такие режимы ее работы, когда некоторые генераторы сами потребляют энергию.

3. В цепях, содержащих аккумуляторы, могут одновременно происходить процессы заряда и разряда их. (Варианты № 3 и 4)

4. В случае варианта № 2 оба аккумулятора только заряжаются (проверить).

2.3 Задание по работе

1. Экспериментально определить токи и напряжения в электрических цепях с двумя источниками постоянного тока.
2. Определить режимы их работы.
3. Проверить данные опыта с расчетом на ЭВМ.
4. Сделать краткие выводы по работе.

2.4 Порядок проведения работы

1. Цепь «генератор—аккумулятор». Для зарядки аккумулятора используется простейшая цепь — источник питания и регулируемый резистор.

Принимая во внимание, что $B = \mu H$, а $\Phi = Bs$, полученное выражение можно записать относительно магнитного потока в виде закона Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{I_0 w}{\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_k s_k} + \frac{\delta}{\mu_0 s_0}} = \frac{F}{R_m},$$

где R_m — магнитное сопротивление магнитной цепи; μ_k — магнитная проницаемость, соответствующая напряженности магнитного поля H_k участка магнитопровода длиной l_k , s_0 — сечение магнитопровода в воздушном зазоре.

Магнитная проницаемость материала магнитопровода несоизмеримо больше магнитной проницаемости воздушного зазора ($\mu \gg \mu_0$),

поэтому составляющая $\frac{\delta}{\mu_0 s_0}$ является наибольшей, определяющей

$$\text{магнитное сопротивление магнитной цепи, величиной } R_m = \frac{\delta}{\mu_0 s_0}.$$

Вследствие этого при появлении в магнитной цепи воздушного зазора значительно увеличивается ее магнитное сопротивление, что в соответствии с приведенным ранее выражением должно привести к уменьшению магнитного потока. Однако этого не происходит, т. к. при неизменном питающем напряжении $U \approx E = 4,44 f w \Phi_m = \text{const}$ магнитный поток должен оставаться неизменным за счет возрастания магнитодвижущей силы F , а, следовательно, возрастания тока катушки индуктивности до значения, при котором сохраняется постоянство

отношения $\frac{F}{R_m}$ в выражении для магнитного потока Φ .

Катушки индуктивности с магнитопроводом, имеющим регулируемый воздушный зазор (дрессели), используются в качестве регулируемых сопротивлений в цепях переменного тока. Это связано с тем, что с увеличением воздушного зазора при неизменном действующем напряжении магнитное сопротивление магнитопровода и ток дросселя возрастают за счет уменьшения полного сопротивления катушки вследствие уменьшения ее реактивного сопротивления в результате уменьшения индуктивности.

эквивалентному синусоидальному току $I_{\text{ЭК}}$, имеющему одинаковое с соответствующим несинусоидальным током действующее значение при одинаковой частоте и развивающему одинаковую с ним активную мощность при одинаковом значении коэффициента мощности:

$$I_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{I_{\text{ЭК}}}{\sqrt{2}},$$

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{UI_0} = \cos \phi_{\text{ЭК}} = \frac{P_0}{UI_{\text{ЭК}}}.$$

Полное сопротивление катушки индуктивности с магнитопроводом при расчетах находят по закону Ома: $Z = \frac{U}{I_0}$.

Эквивалентное активное сопротивление $R_{\text{ЭК}}$ катушки определяется при этом по значению активной мощности P_0 , потребляемой катушкой, и ее току или по значению потерь мощности в магнитопроводе $P_{\text{М0}}$ и активному сопротивлению R проводов катушки:

$$R_{\text{ЭК}} = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{P_{\text{М0}}}{I_0^2} + R = R_{\text{М0}} + R.$$

Индуктивное эквивалентное сопротивление катушки $X_{\text{ЭК}} = X + X_0 = \sqrt{Z^2 - R_{\text{ЭК}}^2}$. При этом индуктивность катушки

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2\pi f}.$$

В соответствии с законом полного тока для катушки индуктивности, схема которой представлена на рис. 10.2, магнитодвижущая сила

$$F = I_0 w = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_b \delta,$$

где H_1, H_2, H_3 — напряженности магнитного поля на участках магнитопровода длиной l_1, l_2, l_3 , H_b — напряженность поля в воздушном зазоре; δ — величина воздушного зазора.

$$\text{В общем виде: } I_0 w = \sum_n H_1 l_1 + H_b \delta,$$

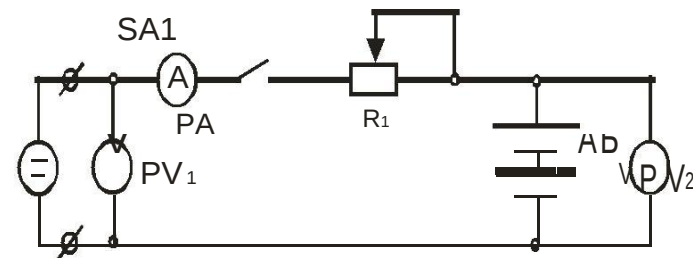


Рис. 8. Схема для заряда аккумулятора неизменным током

1.1. Для контроля параметров режима зарядки аккумуляторов АБ используются измерительные приборы.

PV_1 — измеряет величину ЭДС и напряжения источника питания (генератора Г).

PA — измеряет ток заряда АБ.

PV_2 — измеряет напряжение АБ.

R_1 — регулирует ток заряда (до необходимой величины).

$SA1$ — коммутирует цепь заряда.

1.2. Собрать схему, измерить ЭДС Г и АБ. Перед этим сравнить показания PV_1 и PV_2 . До начала заряда АБ необходимо ознакомиться с инструкцией по ее эксплуатации, в частности с рекомендуемым режимом зарядки.

1.3. Установить движок реостата R_1 в положение максимального сопротивления. Включить $SA1$, установить ток реостатом R_1 , измерить напряжения $U_{\text{АБ}}$ и $U_{\text{Г}}$. Данные занести в таблицу (через определенные промежутки времени).

2. Цепи для одновременной зарядки нескольких аккумуляторных батарей, или питания общей нагрузки (R_3) от двух источников электроэнергии $U_{\text{Г1}}, U_{\text{Г2}}$.

2.1. Собрать схему (рис. 9) и проверить все режимы согласно табл. 1.

2.2. Данные измерения записать в табл. 2 и проанализировать их.

Собрать схему (рис. 10) для одновременной зарядки нескольких аккумуляторов и проверить режим. Данные записать в табл. 3. При отсутствии АБ здесь можно включить последовательно 2 источника питания.

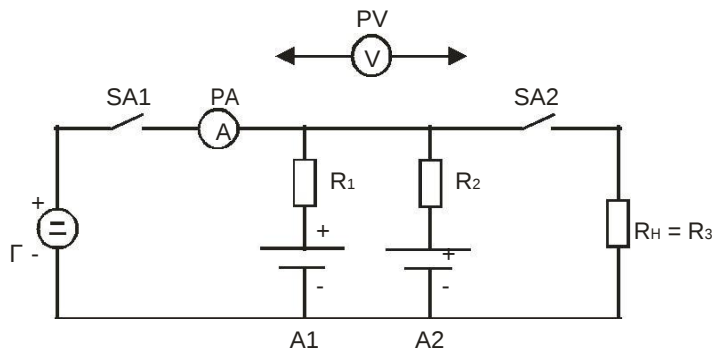


Рис. 9. Схема для заряда-разряда 2х аккумуляторов

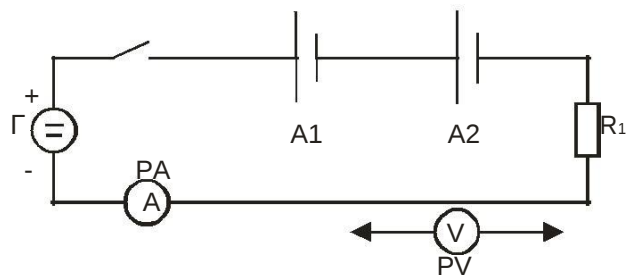


Рис. 10.

3. Данные опытов записать в табл. 2. При этом токи можно определять по закону Ома, подключив к резисторам R_1 , R_2 и R_3 вольтметр. Естественно, необходимо знать точные значения величины этих резисторов.

2.5 Порядок оформления отчета по работе

1. Отчет должен содержать основные сведения, относящиеся к ее содержанию — фамилии, названия, назначения, основные этапы ее выполнения, таблицы, графики, выводы.

2. После моделирования одной из схем на ЭВМ необходимо построить графики зависимостей в Microsoft Excel. Пример таких графиков приведен на рис. 11 и 12.(см. приложение).

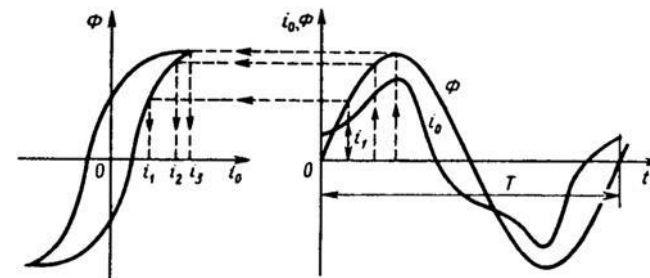


Рис. 6.

Из представленных зависимостей видно, что ток и магнитный поток катушки достигают максимальных значений одновременно, однако их нулевые значения не совпадают по времени, ток достигает этого значения раньше, чем магнитный поток, т. е. магнитный поток отстает по фазе от тока катушки на гистерезисный угол α вследствие явления гистерезиса. В соответствии с этим и с учетом активного и реактивного падений напряжений на рис. 7 представлена векторная диаграмма реальной катушки индуктивности.

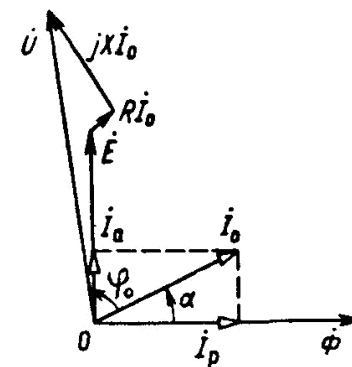


Рис. 7.

Следовательно, при питании синусоидальным напряжением ток в катушке с ферромагнитным сердечником искажает свою форму и является несинусоидальным во времени. При наличии несинусоидальных токов для упрощения расчетов обычно переходят к

Т. к. напряжение изменяется по синусоидальному закону $u = U_m \sin \omega t$ и в данном случае $u = e$, т. е. $e = U_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t$ и, следовательно, ЭДС и напряжение имеют одинаковую начальную фазу, векторы U и E на векторной диаграмме идеальной катушки без ферромагнитного сердечника (рис. 5) совпадают по фазе.

Полная векторная диаграмма катушки индуктивности с ферромагнитным магнитопроводом согласно уравнению для подводимого напряжения дана на рис. 7. Здесь ток I_0 катушки, опережающий магнитный поток Φ на угол α , разложен на активную составляющую I_a , совпадающую с ЭДС E по фазе, и реактивную составляющую I_p , совпадающую по фазе с магнитным потоком.

ЭДС индукции $e = \pm d\Phi/dt$ изменяется по синусоидальному закону во времени, поэтому магнитный поток, который ее создает, также должен быть синусоидальной функцией времени и, следовательно, его вектор при принятом направлении ЭДС (ЭДС индукции при совпадении ее в замкнутом контуре с током записывается со знаком «-»). При изменении ее направления — против тока, что в данном случае принято для удобства построения векторной диаграммы, знак ЭДС изменяется на «+») должен отставать от нее на угол $\pi/2$, т. е.

$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$, что и показано на векторной диаграмме рис. 5. Как следует из рис. 3, зависимость $B(H)$ является нелинейной, а следовательно, будет нелинейной и зависимость $\Phi(I_0)$. Это означает, что при синусоидальном питающем напряжении $u(t)$, т. е. при синусоидальной зависимости $\Phi(t)$, зависимость между током катушки индуктивности и магнитным потоком $i_0(\Phi)$ также должна быть нелинейной. С учетом этого на рис. 6 приведена зависимость тока $i_0(t)$ при синусоидальном питающем напряжении (синусоидальном магнитном потоке), построение которой ясно из рисунка (в левой части приведена циклическая кривая перемагничивания — петля гистерезиса).

3. Отчет и графики можно оформлять в рукописном виде и на клетчатой бумаге.

2.6 Вопросы для самопроверки

1. Дать определение законов Ома, Кирхгофа, перечислить методы расчета электрических цепей.
2. Решить задачи методом положения и узловых потенциалов.
3. Какие существуют причины перехода источника питания в режим потребителя?
4. Объяснить, почему в конце заряда аккумулятора ограничительный резистор должен иметь меньшее сопротивление.
5. Какие оптимальные условия для параллельной работы генераторов на общую нагрузку?
6. В каких случаях лучше применять параллельное, или последовательное соединение генераторов?
7. Объяснить построенные графики. [2]

Лабораторная работа № 3.

Цепи переменного тока

3.1 Цель работы

Исследование режимов работы элементов в последовательной и разветвленной цепях переменного тока, а также исследование резонансных режимов в цепях переменного тока.

3.2 Основные теоретические положения

В цепи переменного тока (рис. 1а) при $U = U_m \times \sin(\omega t + \varphi)$ возникает ток $i = J_m \times \sin(\omega t + \varphi)$. Для индуктивно-активной цепи вектор напряжения $\bar{U}_L$ будет, сдвинут на опережение в 90 электрических градусов относительно тока. Для активно-емкостной цепи вектор $\bar{U}_C$ будет отставать на угол 90 электрических градусов. Примем для удобства $\psi = 0$. Тогда векторные диаграммы будут выглядеть так (рис. 1б, 1в)

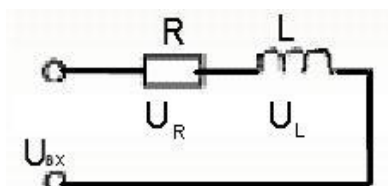


Рис. 1а. Цепь переменного тока

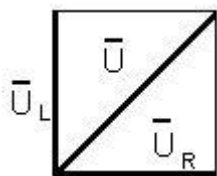


Рис. 1б. Векторная диаграмма RL-цепи

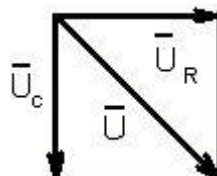


Рис. 1в. Векторная диаграмма RC-цепи

Соответственно для цепи RLC (рис. 2а) можно построить векторную диаграмму (рис. 2б)

ляющими в соответствии с уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа в комплексной (векторной) форме:

$$U = RI_0 + jXI_0 + E = RI_0 + jXI_0 + R_0I_0 + jX_0I_0,$$

где E — ЭДС, обусловленная основным магнитным потоком Φ ; I_0 — ток катушки; R — активное сопротивление проводов катушки; $X = \omega L$ — индуктивное сопротивление катушки ($\omega = 2\pi f$, где f — частота питающего напряжения), обусловленное потоком рассеяния Φ_σ ;

$R_0 = \frac{P_M}{I_0^2}$ — активное сопротивление, обусловленное потерями мощности в магнитопроводе; X_0 индуктивное сопротивление, обусловленное основным магнитным потоком Φ .

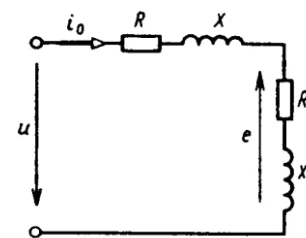


Рис. 4

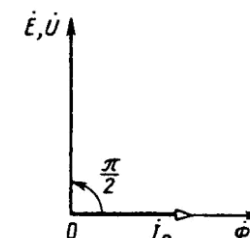


Рис. 5.

На основе полученного уравнения на рис. 4 представлена схема замещения реальной катушки индуктивности с магнитопроводом и учетом действия всех потерь мощности.

Пренебрегая влиянием относительно небольших сопротивлений R и X катушки и потерями мощности в магнитопроводе, имеем $U = E$ и соответственно $U = E = 4,44fw\Phi_m$. Подводимое к катушке напряжение $u = e = U\sin\omega t$ в каждое мгновение полностью компенсируется ЭДС, обусловленной основным магнитным потоком катушки индуктивности. Из полученного выражения следует, что максимальное значение магнитного потока катушки определяется действующим значением синусоидального напряжения, подводимого к катушке, его частотой и числом витков катушки:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44fw} = B_m s.$$

разности между площадью динамической и площадью статической петли гистерезиса (см. рис. 3)

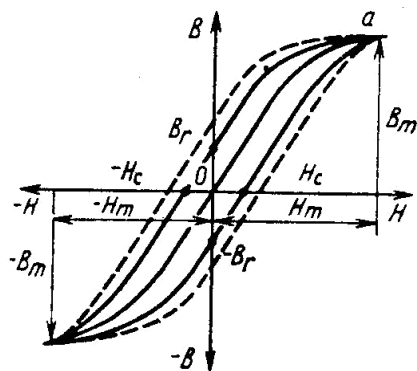


Рис. 3. Петля гистерезиса

Потери мощности от вихревых токов рассчитывают по формуле

$$P_v = P_{ув} f^2 B_m^2 G,$$

где $P_{ув}$ — удельные потери мощности от вихревых токов.

Потери мощности в магнитопроводе P_m , выделяясь в виде теплоты, приводят к нагреву катушки индуктивности и магнитопровода, что ведет к снижению КПД соответствующих устройств.

Для уменьшения потерь мощности на гистерезис в качестве материала для магнитопровода используются ферромагнитные металлы, имеющие узкую петлю гистерезиса. Уменьшение потерь мощности на вихревые токи достигается применением для магнитопровода металлов с большим удельным электрическим сопротивлением, т. е. с повышенным содержанием кремния. При этом магнитопровод набирается из тонких электрически изолированных друг от друга пластин, что способствует уменьшению наводимых в каждой пластине вихревых токов, а следовательно, и снижению потерь мощности от этих токов.

Синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, подводимое к катушке с ферромагнитным магнитопроводом, компенсируется его состав-

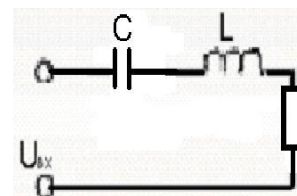


Рис. 2а. Резонансная цепь

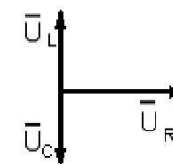


Рис. 2б. Векторная диаграмма для случая $U_L = U_C$

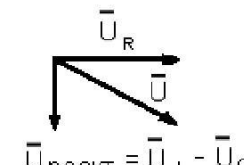


Рис. 2в. Векторная диаграмма для случая $U_L > U_C$

В случае неравенства $\bar{U}_L$ и $\bar{U}_C$ цепь будет иметь индуктивный или емкостный характер (рис. 2в). Если сопротивление X_L и X_C равны, тогда суммарное сопротивление полное.

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R.$$

При этом ток в цепи определяется только активным сопротивлением $J = \frac{U}{R}$. Естественно, что ток будет иметь максимальное значение.

Это случай резонанса напряжений. Его можно получить тремя способами: изменять либо величину L , либо C , либо частоту $f = \frac{\omega}{2\pi}$,

т. к. $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Зависимость величины тока I в функции частоты ω называется резонансной кривой. Условие резонанса — равенство $X_L = X_C$ или $\omega^2 LC = 1$. Очевидно, что его можно достичь тремя способами, а именно изменяя либо частоту $\omega = 2\pi f$, а также величины L и C . Они приведены на рис. 3.

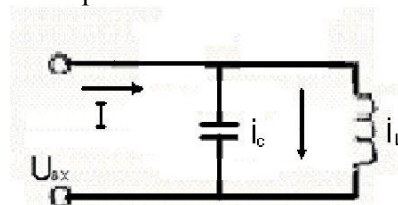


Рис. 3б. Векторные диаграммы

При параллельном соединении дросселя и конденсатора входной ток определяется разностью их токов $\bar{I} = \bar{I}_L + \bar{I}_C$. Логично, что при их равенстве $\bar{I} = 0$.

Это также случай равенства $XL = X_C$. Ведь $\bar{I}_L = \frac{\bar{U}}{X_L}$, а $\bar{I}_C = \frac{\bar{U}}{X_C}$.

Явление резонанса токов заключается в том, что входной ток равен нулю, в то время как токи конденсатора и дросселя могут быть очень большие.

Вывод: экспериментально исследуя цепи переменного тока можно установить, что в цепях с активно-реактивными сопротивлениями возможны режимы, когда полная мощность велика, а активная — мала ($\cos \varphi$ — мал). Также могут быть явления резонанса напряжений и токов. Причем с уменьшением величин R токи растут, а также растут и напряжения на реактивных элементах, что иногда приводит к авариям.

3.3 Описание лабораторного стенда

Блок-схема приведена на рис. 4. Здесь ЗГ — задающий генератор синусоидального напряжения. Его выходное напряжение и мощность весьма малы и усилитель Ус увеличивает их до нужных параметров. Блок питания БП предназначен для обеспечения нужного питающего напряжения постоянного тока для усилителя. Регулятором «F» можно изменять величину частоты ЗГ от 10 Гц до 1 МГц.

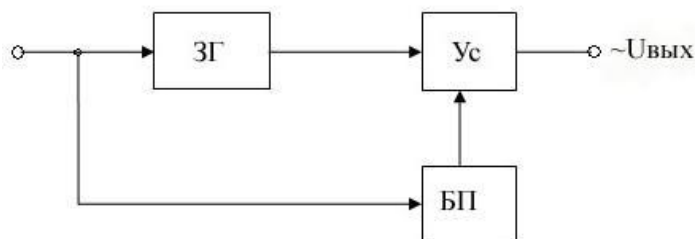


Рис. 4. Блок-схема лабораторной установки

сумме $\Phi_p = \Phi + \Phi_\sigma$, т. к. основной магнитный поток Φ и поток рассеяния Φ_σ не совпадают во времени по фазе.

Величина магнитного потока $\Phi = Bs$ определяется магнитной индукцией магнитного поля, зависящей от напряженности магнитного поля ($B = \mu H$).

Зависимость $B(H)$ — кривая намагничивания — является одной из важнейших характеристик ферромагнитных материалов (рис. 3). Кривая Oa , проходящая через начало координат, является основной кривой намагничивания, она снимается при одностороннем намагничивании не намагниченого материала.

При питании катушки переменным током ферромагнитный магнитопровод вследствие наличия переменного магнитного потока циклически, с частотой тока, перемагничивается по кривой гистерезиса, обусловленной наличием остаточного магнетизма (остаточной магнитной индукции) B_r и коэрцитивной (задерживающей) силы H_c . (см. рис. 3). В процессе циклического перемагничивания за несколько полупериодов переменного тока устанавливается замкнутая симметричная петля гистерезиса.

На циклическое перемагничивание магнитопровода затрачивается мощность, выделяемая в нем в виде теплоты, которая относится к потерям мощности в магнитопроводе.

Потери мощности в магнитопроводе P_M (потери мощности в стали) включают в себя потери на гистерезис P_r и потери от вихревых токов P_B наводимых переменным магнитным потоком в металле магнитопровода:

$$P_M = P_r + P_B.$$

Потери мощности на гистерезис, пропорциональные площади, ограниченной статической петлей гистерезиса (см. рис. 3), определяют по формуле:

$$P_r = 2mP_{yr}fB_mG,$$

где P_{yr} — удельные потери мощности на гистерезис; f — частота питающего тока; B_m — амплитудное значение магнитной индукции; G — масса магнитопровода.

Под действием изменяющегося во времени магнитного потока в магнитопроводе наводятся вихревые токи, вызывающие дополнительные потери мощности и оказывающие размагничивающее действие на магнитопровод. Эти потери пропорциональны площади равной

Отсюда следует, что магнитный поток пропорционален магнитной проницаемости μ , среды, которая для ферромагнитных материалов значительно больше магнитной проницаемости других материалов и на несколько порядков выше магнитной проницаемости μ воздуха (вакуума). Поэтому для уменьшения намагничивающей силы F , а, следовательно, уменьшения тока, необходимого для создания заданного магнитного потока, катушки индуктивности снабжаются магнитопроводом (сердечником) из ферромагнитного материала, чаще всего из электротехнической стали. Т. к. зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов $\mu(H)$ является нелинейной (рис. 1), то зависимость $\Phi(H)$ или $B(H)$ при наличии магнитопровода оказывается также нелинейной. При включении катушки индуктивности с магнитопроводом (в общем случае с воздушным зазором δ , рис. 2) под переменное синусоидальное напряжение $u(t) = U_m \sin \omega t$ в цепи катушки появляется переменный ток $i_0(t)$, под действием которого в магнитопроводе возникает переменный магнитный поток $\Phi(t)$.

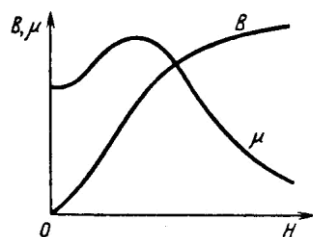


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости от величины поля

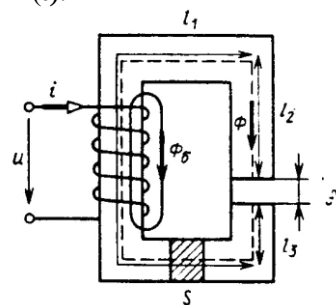


Рис. 2. Схема для намагничивания сердечника с зазором

Основная часть результирующего магнитного потока Φ_p , создаваемого катушкой индуктивности (основной магнитный поток Φ), замыкается по цепи магнитопровода, т. к. магнитная проводимость его во много раз больше магнитной проводимости воздуха, однако незначительная часть результирующего потока (порядка 3—5 %) все же рассеивается и замыкается вокруг отдельных витков катушки индуктивности (поток рассеяния Φ_σ). Результирующий магнитный поток катушки индуктивности с магнитопроводом равен векторной

3.4 Порядок проведения работы

1. План работы.

1.1. Собрать схему (рис. 5). Величины сопротивления, индуктивности и емкости задаются преподавателем. При помощи ключей κ_1 и κ_2 можно задавать различные режимы работы схемы, а именно R , RC , RL , RLC . Измерить токи и напряжения при различных величинах L и C . Специально подобранным конденсатором добиться равенства величин $X_L = X_C$. Естественно, что этого можно добиться, изменяя частоту задающего генератора.

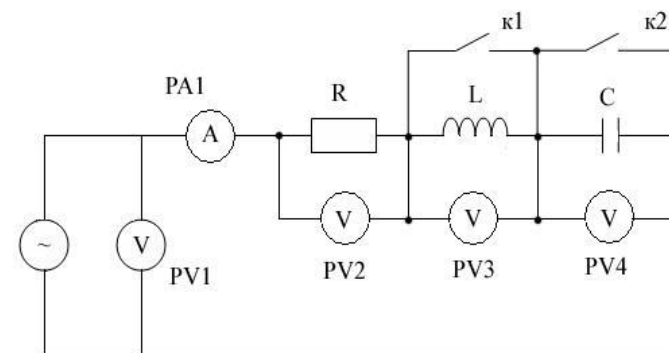


Рис. 5. Схема лабораторной установки

2. Методические указания по работе.

2.1. Измерение производить с помощью вольтметров и амперметра

2.2. По результатам измерений составить таблицу данных.

Примерно она может выглядеть так:

№	$U_{вх}$, В	U_R , В	U_L , В	U_C , В	f , Гц	R , Ом	L , Г	C , мкф	Прим.
1									
2									
3									
4									

3.5 Оформление результатов работы

1. По данным таблицы:
 - 1.1. Определить величины индуктивности и емкости.
 - 1.2. Построить векторные диаграммы для всех опытов.
 - 1.3. Построить резонансные кривые U_{R1}
2. Определить сопротивление (активное) дросселя. Помнить, что существуют 2 способа его определения.
3. Сделать выводы по работе и ответить на вопросы.

3.6 Вопросы для самопроверки

1. Почему векторы напряжений на индуктивности и емкости направлены под углом относительно тока?
2. Выражения для тока, полного сопротивления, мощности для 3-х видов цепей (RL , RC , RLC)?
3. В чем заключается явление резонанса напряжений (тока) и при каких условиях оно возникает?
4. Измерением каких параметров цепи можно добиться резонанса напряжений?
5. С помощью, каких приборов можно определить наличие резонанса напряжения (тока)?
6. К чему приводит изменение активного сопротивления при резонансе напряжения?
7. Определить емкость конденсатора по показаниям вольтметра и амперметра (индуктивности)? [2]

Лабораторная работа № 4. Исследование магнитных сердечников трансформаторов и дросселей

4.1 Цель работы

Исследование катушки индуктивности с магнитопроводом, имеющим регулируемый воздушный зазор, и ее вольтамперных характеристик при намагничивании магнитопровода переменным и постоянным токами; изучение влияния напряжения и воздушного зазора магнитопровода на ток и параметры катушки индуктивности.

4.2 Теоретические положения

Основным элементом конструкции различного рода электрических машин и аппаратов, устройств электроавтоматики, промышленной электроники, вычислительной техники и т. д. является катушка индуктивности. При протекании тока по виткам катушки с поперечным сечением s создается магнитное поле, интенсивность которого характеризуется магнитной индукцией B и магнитным потоком $\Phi = Bs$, который пропорционален магнитодвижущей силе $F = Iw$, равной произведению тока I катушки на число ее витков w . Зависимость $\Phi(I)$ при $w = \text{const}$ катушки при отсутствии ферромагнитного магнитопровода является линейной.

При наличии магнитопровода магнитный поток, создаваемый подобной катушкой индуктивности (дросселем), при прочих равных условиях значительно возрастает, т. к. при этом магнитный поток создается не только непосредственно проводниками с током катушки (источником внешнего магнитного поля), но и соответствующим ферромагнитным веществом магнитопровода (источником внутреннего магнитного поля). Магнитная индукция катушки индуктивности связана с напряженностью H магнитного поля и магнитной проницаемостью и известным соотношением $B = \mu H$. С учетом этого магнитный поток катушки

$$\Phi = Bs = \mu Hs.$$

