

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**Кафедра электротехники и авиационного электрооборудования
Ю.П. Артеменко**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**ПОСОБИЕ
по выполнению лабораторных работ**

*для студентов II курса
направления 162500
всех форм обучения*

Москва – 2013

ББК 6П2.1
А86

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е.Ж. Сапожникова
Артеменко Ю.П.

А86 Электротехника: пособие по выполнению лабораторных работ. - М.: МГТУ ГА, 2013. - 36 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Электротехника» по Учебному плану для студентов II курса направления 162500 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 14.05.13 г. и методического совета 23.05.13 г.

Редактор И.В. Вилкова

Печать офсетная	Подписано в печать 24.09.13 г.	2,06 уч.-изд. л.
2,09 усл.печ.л.	Формат 60x84/16	Тираж 80 экз.
	Заказ № 1670/	

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Редакционно-издательский отдел
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный
технический университет ГА, 2013

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

Лабораторные работы проводятся на стендах в лаборатории «Теоретических основ электротехники» с использованием реального оборудования. Возможно также проведение работ на компьютере с применением моделирующих программ Electronics WorkBench или Multisim, при этом содержание работ остается неизменным.

Для выполнения лабораторных работ учебная группа (подгруппа) разбивается на бригады по 2-4 человека.

Перед проведением работы студенты должны ознакомиться с ее описанием и заданиями, изучить соответствующий раздел теоретического курса, подготовить (начертить) электрические схемы и таблицы для результатов измерений и вычислений.

Допуск студентов к лабораторной работе осуществляется на основе индивидуальной беседы преподавателя со студентом или при условии положительных ответов студента на вопросы автоматизированных средств контроля. Допуск к очередной работе может производиться при условии предварительной защиты предыдущих работ. При недопуске студент обеспечивается индивидуальным учебным заданием и должен находиться до окончания занятий в учебной лаборатории.

Прежде чем приступить к сборке схемы лабораторной работы, нужно подобрать необходимые приборы, вспомогательную аппаратуру (реостаты, шунты, магазины сопротивлений, емкостей и т.п.).

Сборку электрической схемы следует начинать с основных силовых цепей, включающих нагрузки, амперметры, токовые обмотки ваттметров. После чего подключить вольтметры и обмотки напряжений ваттметров. После окончания сборки схемы следует предъявить ее для проверки преподавателю. **Включать схему под напряжение только с разрешения преподавателя!**

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА И ЗАЩИТА

После оформления экспериментальной части лабораторной работы студенты обрабатывают результаты и составляют отчет о проделанной работе. Отчет оформляется в тетради или на специальных бланках выполнения лабораторных работ.

Схемы, таблицы, графики выполняются карандашом в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД. Допускается применение средств компьютерной графики.

Таблицы с данными измерений и вычислений, графики и диаграммы сопровождаются краткими пояснениями.

Защита лабораторной работы производится непосредственно после ее выполнения и оформления на данном или следующем занятии в лаборатории.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

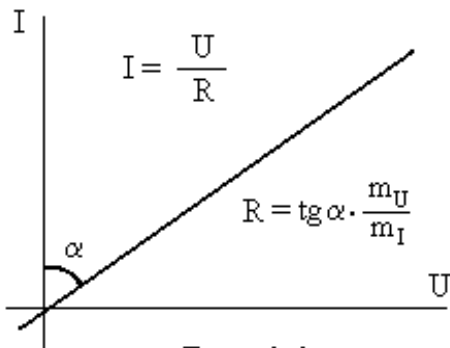
Цель работы: изучение свойств основных элементов электрической цепи постоянного тока; построение вольт-амперных характеристик.

1.1. Основные сведения

Электрические цепи постоянного тока состоят из источников и приемников электрической энергии и соединительных проводов. Каждый элемент электрической цепи описывается своей *вольт-амперной характеристикой*, т.е. зависимостью $U(I)$ или $I(U)$, где I - ток, протекающий через элемент; U - напряжение (разность потенциалов) на его зажимах.

Если вольт-амперная характеристика представляет собой линейную зависимость во всем возможном для данного элемента диапазоне токов и напряжений, то такой элемент называется линейным. В противном случае - нелинейным. Цепи, состоящие только из линейных элементов, называются линейными.

В электрических схемах линейных цепей постоянного тока приемники изображаются в виде *сопротивления* R . При этом величина сопротивления (единица измерения - Ом) представляет собой коэффициент пропорциональности ($U=R \cdot I$), между током в амперах (А) и напряжением в вольтах (В) или тангенс наклона вольт-амперной характеристики (с учетом масштабов напряжения m_U и тока m_I на рис. 1.1).



Сопротивлением соединительных проводов, как правило, пренебрегают или включают его в сопротивление нагрузки. На схеме соединительные провода с нулевым сопротивлением изображаются линиями.

Реальный источник электрической энергии - это элемент, на зажимах которого есть напряжение даже при отсутствии тока (холостой ход). Это напряжение называется напряжением холостого хода (U_{xx}) или ЭДС

источника (E). При подключении нагрузки и увеличении тока напряжение на зажимах реального источника уменьшается вплоть до нуля (короткое замыкание). Ток, протекающий от источника при $U=0$, называется током короткого замыкания ($I_{кз}$). На схеме реальный источник представляется в виде последовательно соединенных источника ЭДС и внутреннего сопротивления R_b (рис.1.2а), либо в виде параллельно соединенных источника тока I_k и внутреннего сопротивления R_b (рис. 1.2б).

Источник ЭДС представляет собой *идеальный* источник электрической энергии бесконечно большой мощности с внутренним сопротивлением, равным нулю; разность потенциалов на зажимах источника ЭДС не зависит от протекающего через него тока.

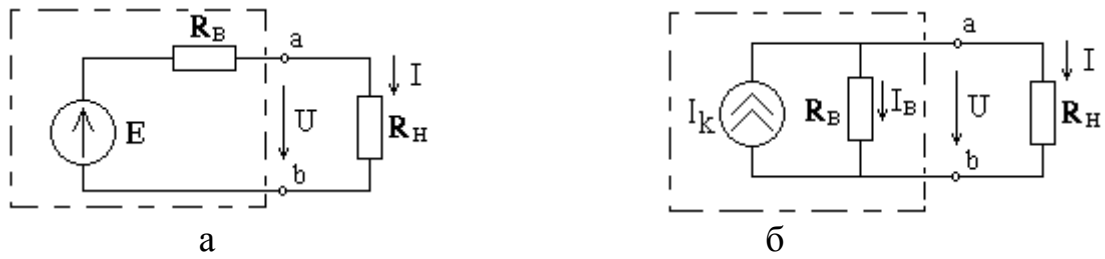


Рис. 1.2

Источник тока - идеальный источник электрической энергии бесконечно большой мощности с бесконечно большим внутренним сопротивлением; ток, протекающий через источник тока, не зависит от разности потенциалов на его концах.

На рис. 1.3а, б, в изображены вольт-амперные характеристики реального источника, источника ЭДС и источника тока.

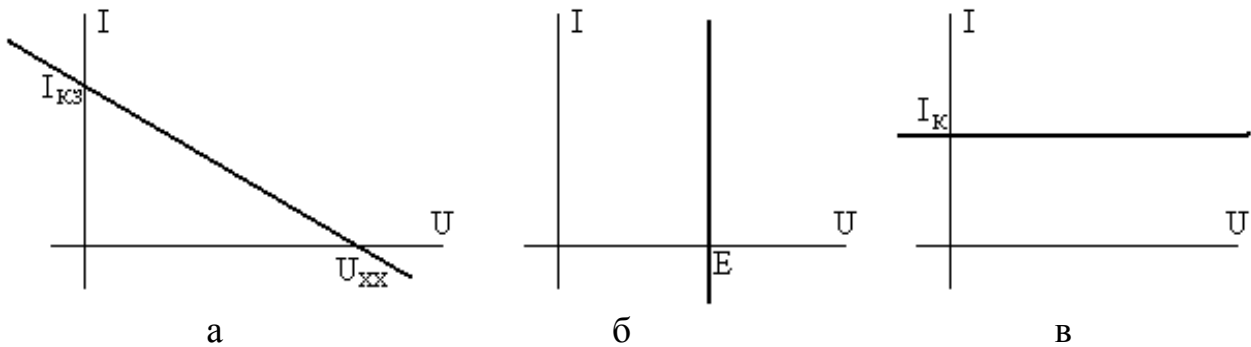


Рис. 1.3

Если к зажимам аb источника электрической энергии подключить сопротивление нагрузки R_H , то в цепи потечет ток I , величина которого определяется по второму закону Кирхгофа

$$E = I \cdot R_B + I \cdot R_H. \quad (1.1)$$

Поделив на R_B , получим

$$\frac{E}{R_B} = I + I \frac{R_H}{R_B}. \quad (1.2)$$

Обозначим $I_k = \frac{E}{R_B}$ - ток короткого замыкания источника электрической

энергии; $I_B = I \cdot \frac{R_H}{R_B}$ - внутренний ток источника тока, тогда

$$I_k = I + I_B. \quad (1.3)$$

Последнему выражению соответствует схема рис. 1.2б.

Таким образом, так как I_k и E связаны соотношением $I_k \cdot R_B = E$, то схемы рис. 1.2а и рис. 1.2б действительно эквивалентны. При этом E равно напряжению холостого хода ($R_H = \infty$) источника электрической энергии, I_k равно току короткого замыкания ($R_H = 0$).

Мощность элемента электрической цепи определяется как произведение напряжения на его зажимах на ток, протекающий через этот элемент

$$P = I \cdot U, \text{ Вт} \quad (1.4)$$

Для приемника, так как $U = R \cdot I$, мощность

$$P_R = I^2 \cdot R, \text{ Вт}, \quad (1.5)$$

и эта мощность всегда потребляется.

Для источника ЭДС мощность

$$P_E = E \cdot I, \text{ Вт}. \quad (1.6)$$

Для источника тока мощность

$$P_J = U \cdot I_{\kappa}, \text{ Вт}. \quad (1.7)$$

Мощность источника ЭДС и источника тока считается положительной, если источник отдает мощность приемникам; при этом внутри источника ток течет от меньшего потенциала к большому.

У реального источника часть развиваемой им мощности рассеивается на внутреннем сопротивлении, а мощность, выделенная на сопротивлении нагрузки, составит

$$P_H = U \cdot I = (E - I \cdot R_B) \cdot I = E \cdot I - I^2 R_B. \quad (1.8)$$

1.2. Описание лабораторной установки

В работе используется источник электрической энергии постоянного тока с добавочным сопротивлением для ограничения мощности короткого замыкания, амперметр, вольтметр, линейные и нелинейные сопротивления.

1.3. Рабочее задание

1. Определить внутреннее сопротивление и ЭДС реального источника электрической энергии.
2. Установить зависимость напряжения и электрической мощности на нагрузке в функции тока.
3. Изобразить схемы замещения источника электрической энергии источником ЭДС с последовательно включенным внутренним сопротивлением, а также источником тока и параллельно включенным внутренним сопротивлением.
4. Снять вольт-амперные характеристики линейного и нелинейного элементов и сравнить их.

1.4. Порядок проведения лабораторной работы

1. Измерить вольтметром ЭДС источника электрической энергии. Включив на известное сопротивление нагрузки источник электрической энергии через амперметр, измерить ток. По величине тока, ЭДС источника к известному сопротивлению, используя формулу (1.1), определить внутреннее сопротивление источника.
2. Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 1.4.

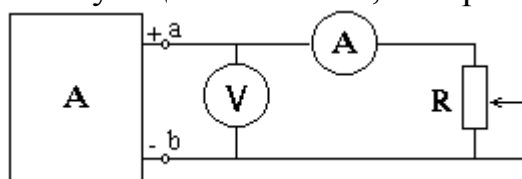


Рис. 1.4

Изменяя сопротивление R так, чтобы ток плавно изменялся $I=0$ до $I=I_{\max}$, измерять ток и напряжение по показаниям амперметра и вольтметра. Результаты измерений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Опыт	I, A								
	$U, \text{В}$								
Расчет	$R = U/I, \text{Ом}$								
	$P = U \cdot I, \text{Вт}$								

На основе результатов опыта построить графики: *вольт-амперную характеристику* источника $U = f(I)$ и зависимость мощности от тока нагрузки $P = f(I)$.

3. Изобразить эквивалентные схемы реального источника электрической энергии, содержащие источник ЭДС и источник тока.

4. Собрать схему, изображенную на рис. 1.5.

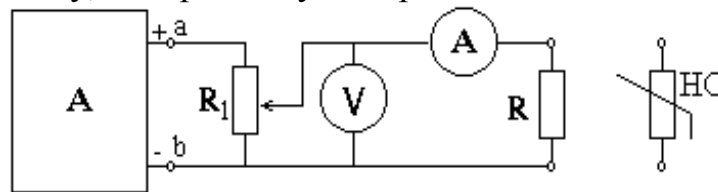


Рис. 1.5

Изменяя приложенное напряжение, снять *вольт-амперные характеристики* линейного (R), а затем нелинейного ($НС$) сопротивлений. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

R	$U, \text{В}$							
	I, A							
$НС$	$U, \text{В}$							
	I, A							

Построить графики *вольт-амперных характеристик* $U = f(I)$ для линейного и нелинейного сопротивлений и сравнить их.

1.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Наименование, тип, класс точности электроизмерительных приборов.
3. Схемы и результаты опытов, расчеты.
4. Графики, схемы замещения, выводы.

1.6. Контрольные вопросы

1. В чем различие между линейным и нелинейным элементами электрических цепей?
2. Как изобразить схему замещения реального источника электрической энергии с помощью источника ЭДС и источника тока?
3. Что такое источник ЭДС и источник тока?
4. Объясните вольт-амперную характеристику реального источника электрической энергии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: проверить экспериментально выполнение *законов Кирхгофа, принципа наложения, а также метод узловых потенциалов и теорему об эквивалентном генераторе.*

2.1. Основные сведения

Законы Кирхгофа

Электрические цепи постоянного тока состоят из определенным образом соединенных элементов: сопротивлений, источников ЭДС и источников тока. Несколько последовательно соединенных элементов, по которым протекает один и тот же ток, образуют одну *ветвь*. Точка соединения нескольких ветвей называется *узлом*. А замкнутая последовательность ветвей образует *контур*.

Токи в ветвях и напряжения на элементах подчиняются *1-му и 2-му законам Кирхгофа.*

1-й закон: Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

2-й закон: Алгебраическая сумма напряжений в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС этого контура.

Физическим смыслом *1-го закона Кирхгофа* является факт того, что сколько тока втекает в узел, столько же из него и вытекает.

Физическим смыслом *2-го закона Кирхгофа* является факт того, что если обойти замкнутый контур, вернувшись в ту же точку, с которой был начат обход, то общее изменение потенциала будет равно нулю.

При составлении уравнений по *законам Кирхгофа* для конкретной цепи обычно напряжения на сопротивлениях сразу выражают в соответствии с законом Ома как произведение тока на сопротивление ($U = I \cdot R$). Тогда количество неизвестных в уравнениях будет совпадать с числом ветвей без источников тока в цепи. Если таких ветвей n , а узлов в цепи – m , то составляют $(m-1)$ уравнения по *1-му закону* и $[n-(m-1)]$ уравнений по *2-му закону Кирхгофа*. Решение полученной системы уравнений с n неизвестными даст значения всех токов цепи.

Принцип наложения

Так как система уравнений, полученная с помощью *законов Кирхгофа*, в линейной цепи является системой линейных алгебраических уравнений, то решение для каждого искомого тока в общем виде может быть записано так

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + \dots + J_1 h_{k1} + J_2 h_{k2} + \dots, \quad (2.1)$$

где I_k - ток k -й ветви; E_1, E_2, \dots - источники ЭДС цепи; J_1, J_2, \dots - источники тока цепи; g_{ki} – коэффициенты, имеющие размерность проводимости и численно равные отношению тока в k -й ветви к ЭДС E_i , если бы в цепи действовала только одна эта ЭДС; h_{ki} – безразмерные коэффициенты, численно равные отношению тока в k -й ветви к току источника тока J_i , если бы в цепи действовал только один этот источник тока. А каждое слагаемое в (2.1) имеет смысл тока в k -й

ветви от каждого источника, если бы действовал только он один, а все остальные были равны нулю.

В этом, собственно, и состоит *принцип наложения*, который формулируют так: ток в любой ветви равен алгебраической сумме частичных токов, вызванных в этой ветви действием каждого источника схемы в отдельности.

Принцип наложения распространяется также и на напряжения между любыми точками цепи.

Метод узловых потенциалов

В качестве искоемых неизвестных в системе уравнений по *законам Кирхгофа* могут также быть приняты не токи ветвей, а *потенциалы узлов*, так как ток ветви можно выразить через потенциалы узлов, к которым эта ветвь подключена, с помощью *закона Ома* для участка цепи



$$I = \frac{\varphi_i - \varphi_j + E}{R} \quad (2.2)$$

Заменяв таким образом каждый ток в уравнениях по *1-му закону Кирхгофа* и приняв потенциал одного из узлов цепи равным нулю, получим систему из $(m-1)$ уравнений относительно неизвестных потенциалов. Решая эту систему, находят потенциалы, а затем, если необходимо, токи по формуле (2.2).

В общем виде система уравнений по методу узловых потенциалов выглядит следующим образом (для схемы с четырьмя узлами):

$$\begin{aligned} \varphi_1 G_{11} + \varphi_2 G_{12} + \varphi_3 G_{13} &= I_{11}; \\ \varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} + \varphi_3 G_{23} &= I_{22}; \\ \varphi_1 G_{31} + \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} &= I_{33}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Здесь: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - искоемые потенциалы узлов (если $\varphi_4 = 0$);
 I_{11}, I_{22}, I_{33} - эквивалентные токи узлов, равные алгебраической сумме произведений ЭДС ветви на ее проводимость для ветвей без источников тока и токов источников тока, сходящихся в соответствующий узел.

При этом ЭДС и токи источников тока, направленные к узлу, берутся со знаком "+", от узла - со знаком "-";

G_{11}, G_{22}, G_{33} - суммы проводимостей ветвей, сходящихся к соответствующему узлу;

G_{12}, G_{13}, G_{23} - суммы проводимостей ветвей, непосредственно включенных между узлами 1 и 2, 1 и 3, 2 и 3. Эти числа входят в систему (2.4) со знаком "-".

Теорема об эквивалентном генераторе

Теорему об эквивалентном источнике электрической энергии (генераторе) формулируют следующим образом:

Любую сложную линейную электрическую цепь можно заменить относительно любых двух ее точек (ab) эквивалентным генератором, ЭДС которого ($E_{ЭГ}$)

равна напряжению холостого хода между точками а и б (U_{abxx}), а внутреннее сопротивление ($R_{вн}$) равно входному сопротивлению цепи относительно точек а-б ($R_{вхab}$).

Иначе говоря, любую часть цепи можно заменить последовательно соединенными источником ЭДС и сопротивлением. Это удобно, когда нет необходимости анализировать токи и напряжения внутри этой части схемы.

С помощью *теоремы об эквивалентном генераторе* можно также найти ток в одной из ветвей цепи. Для этого всю цепь по отношению к этой выделенной ветви заменяют эквивалентным генератором, определяя расчетным путем его параметры: $E_{ЭГ} = U_{abxx}$ и $R_{вн} = R_{вхab}$. Точки а и б в таком случае – это точки, к которым подключена ветвь, в которой необходимо найти ток. Величина тока в выделенной ветви определяется тогда по следующей формуле

$$I = \frac{E_{ЭГ}}{R_{вн} + R}, \quad (2.4)$$

где R - сопротивление выделенной ветви; $E_{ЭГ}$, $R_{вн}$ - параметры эквивалентного генератора.

Параметры эквивалентного генератора могут быть также определены экспериментально из опытов *холостого хода* - U_{xx} (рис. 2.1а) и *короткого замыкания* - $R_{вх}$ (рис. 2.1б).

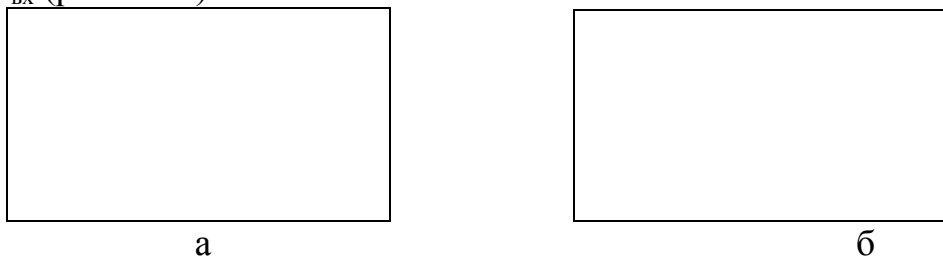


Рис. 2.1

$$R_{вх} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}. \quad (2.5)$$

2.2. Описание лабораторной установки

Испытуемая сложная электрическая цепь состоит из шести ветвей и двух источников ЭДС. В работе используются амперметры и вольтметр.

2.3. Рабочее задание

1. Измерить сопротивления электрической цепи и ЭДС источников.
2. Замерить токи в трех ветвях, а также частичные токи при действии каждого источника в отдельности и проверить *принцип наложения*.
3. Рассчитать потенциалы узлов.
4. Измерить потенциалы узлов и проверить систему уравнений (2.3).
5. Определить параметры *эквивалентного генератора* расчетным и экспериментальным путем.

2.4. Порядок проведения лабораторной работы

До сборки схемы необходимо подготовить рабочее место, ознакомившись с размещением сопротивлений, источников ЭДС и приборов на стенде, записать данные приборов и источников электрической энергии.

1. Определить величины сопротивлений $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ методом вольтметра и амперметра, для чего подключать поочередно сопротивления к источнику, измеряя приборами напряжение и ток. Результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
$U, \text{В}$						
$I, \text{А}$						
$R=U/I, \text{Ом}$						

Измерить вольтметром и записать ЭДС источников электрической энергии

$$E_1 = \dots\dots\dots; \quad E_2 = \dots\dots\dots$$

Примечание. При выполнении работы на компьютере п.1 не выполняется, а значение сопротивлений в схеме устанавливаются по указанию преподавателя.

2. При выключенных источниках ЭДС собрать схему в соответствии с рис. 2.2.

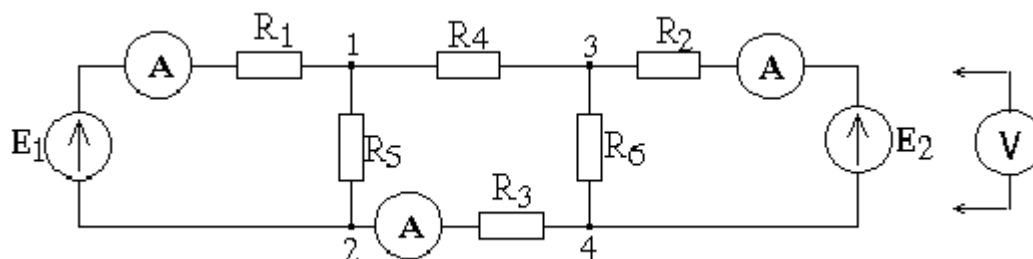


Рис. 2.2

Проверка принципа наложения осуществляется для токов 1-й, 2-й и 3-й ветвей. Отключить источник ЭДС E_2 , а его место в цепи замкнуть; записать показания амперметров в строку 1. Затем восстановить подключение E_2 в цепи, отключить источник ЭДС E_1 , а его место в цепи замкнуть; записать показания амперметров в строку 2. Включить оба источника и измерить токи с помощью амперметров. Результаты записать в строку 3 табл. 2.2.

Таблица 2.2

		$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$
1	$E_1 = \text{В}$ $E_2 = 0 \text{ В}$			
2	$E_1 = 0 \text{ В}$ $E_2 = \text{В}$			
3	$E_1 = \text{В}$ $E_2 = \text{В}$			

Убедиться в том, что токи в цепи при действии обоих источников действительно равны сумме соответствующих частичных токов.

Замечание: Во всех случаях, если стрелка какого-то из амперметров отклоняется влево, необходимо поменять местами подключенные к его клеммам провода, а показания записать в таблицу со знаком «-». При выполнении работы на компьютере это не требуется, так как показания приборов выводятся на экран вместе со знаком.

3. Рассчитать потенциалы узлов цепи, применив метод узловых потенциалов. Потенциал узла 4 принять равным нулю.

4. Для проверки метода узловых потенциалов в схеме (рис. 2.2) принять потенциал узла 4 равным нулю. Тогда потенциалы φ_1 , φ_2 , φ_3 можно определить, замерив напряжения U_{14} , U_{24} , U_{34} соответственно.

Включив источники ЭДС, замерить вольтметром напряжения U_{14} , U_{24} , U_{34} и записать в таблицу 2.3. Выключить источники ЭДС.

Таблица 2.3

$\varphi_1 = U_{14}, \text{ В}$	$\varphi_2 = U_{24}, \text{ В}$	$\varphi_3 = U_{34}, \text{ В}$

По данным опыта проверить систему (2.3). Результаты опыта сравнить с расчетом.

5. Для проверки *теоремы об эквивалентном генераторе* используется та же электрическая цепь. По этой теореме требуется определить ток в ветви с сопротивлением R_3 .

Отключив сопротивление R_3 , подключить источники ЭДС E_1 и E_2 в схему.

Вольтметром измерить напряжение холостого хода между точками 2 и 4 (U_{24xx}). Затем точки 2 и 4 замкнуть на амперметр и измерить ток короткого замыкания ($I_{24кз}$). По данным измерения вычисляют входное сопротивление $R_{24вх}$ по формуле (2.5). Ток в 3-й ветви определяется по формуле

$$I_3 = \frac{U_{24xx}}{R_{24xx} + R_3}.$$

Результаты необходимо сравнить с данными табл. 2.2.

2.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема опыта.
3. Результаты измерений по пунктам, расчеты, выводы.

2.6. Контрольные вопросы

1. Запишите уравнения по законам Кирхгофа для исследуемой в работе схемы.
2. Объясните физический смысл принципа наложения в линейных электрических цепях.
3. В чем сущность метода узловых потенциалов?
4. Как найти токи в ветвях по методу узловых потенциалов?
5. Что такое входные и взаимные проводимости ветвей?
6. Что такое активный двухполюсник?
7. Сформулируйте теорему об эквивалентном генераторе.
8. Как определить параметры эквивалентного генератора экспериментальным путем?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: экспериментально проверить *законы Ома и Кирхгофа* для комплексных токов в цепях синусоидального тока.

3.1. Основные сведения

Синусоидальный ток (напряжение, ЭДС) изменяется во времени по закону

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi), \quad (3.1)$$

где i - мгновенное значение тока, А;

I_m - максимальное значение тока (амплитуда), А;

ω - угловая частота, рад/с;

Ψ - начальная фаза, рад.

Частота (количество колебаний в одну секунду) обычно бывает задана в герцах (Гц) с обозначением f . При этом $\omega = 2\pi f$.

Линейные цепи синусоидального тока удобно анализировать при помощи символического метода расчета. В основу этого метода положено представление синусоидальных процессов в виде векторов, вращающихся на комплексной плоскости. При этом синусоидальному току (3.1) ставится в соответствие комплексный ток

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\Psi}, \quad (3.2)$$

где I - действующее значение синусоидального тока.

$$I = I_m / \sqrt{2}. \quad (3.3)$$

Таким образом, комплексный ток - это вектор на комплексной плоскости, модуль которого равен действующему значению, а фаза - начальной фазе синусоидального тока.

Аналогичные определения можно дать комплексным напряжениям, ЭДС.

Для мгновенных значений и комплексных токов, напряжений и ЭДС справедливы *законы Кирхгофа*. Для мгновенных значений и в символической форме они имеют аналогичный вид.

Первый закон Кирхгофа:

в узле
$$\sum_k i_k = 0, \quad \sum_k \dot{I}_k = 0. \quad (3.4)$$

Второй закон Кирхгофа:

в контуре
$$\sum_k e_k = \sum_k u_k, \quad \sum_k \dot{E}_k = \sum_k \dot{U}_k. \quad (3.5)$$

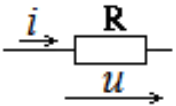
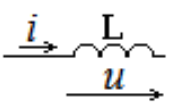
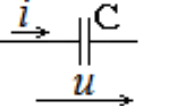
В символической форме записывают также и *закон Ома*:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \dot{U} \cdot Y, \quad (3.6)$$

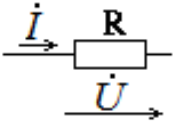
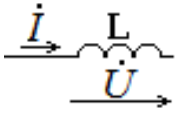
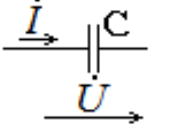
где $Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$, $Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}}$ - комплексные сопротивление и проводимость.

Комплексное сопротивление $Z = z \cdot e^{j\varphi}$ имеет модуль z , равный отношению действующего значения напряжения к действующему значению тока (эта величина называется *полным сопротивлением* участка цепи), и аргумент φ , равный разности начальных фаз напряжения и тока (*сдвиг фаз*).

В цепях переменного тока проявляют себя три элемента, свойства которых определяются характером связи между мгновенными токами и напряжениями.

Активный элемент (резистор)	Индуктивный элемент (катушка)	Емкостной элемент (конденсатор)
 $u = R \cdot i$	 $u = L \cdot \frac{di}{dt}$	 $i = C \cdot \frac{du}{dt}$
R – сопротивление, Ом	L – индуктивность, Гн	C – емкость, Ф

Для комплексных токов и напряжений соответственно.

Активный элемент	Индуктивный элемент	Емкостной элемент
 $\dot{U} = R \cdot \dot{I}$	 $\dot{U} = j\omega L \cdot \dot{I}$	 $\dot{U} = -j \frac{1}{\omega C} \cdot \dot{I}$
комплексное сопротивление $Z = R$	комплексное сопротивление $Z = j\omega L = jX_L$	комплексное сопротивление $Z = -j \frac{1}{\omega C} = -jX_C$

Правила преобразования сопротивлений при последовательном и параллельном соединении элементов для комплексных сопротивлений остаются такими же, как и в цепях постоянного тока.

Для цепи синусоидального тока, содержащей последовательно соединенные активное сопротивление, индуктивную катушку и конденсатор, комплексное сопротивление имеет вид

$$Z = R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = z \cdot e^{j\varphi}, \quad (3.7)$$

где $z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ - полное сопротивление цепи;

$\varphi = \arctg \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}$ - аргумент комплексного сопротивления,

показывает сдвиг фаз между током и напряжением на участке цепи с комплексным сопротивлением Z .

Изображение векторов токов, напряжений и ЭДС на комплексной плоскости в соответствии с законами *Кирхгофа* называют векторной диаграммой. Векторная диаграмма позволяет наглядно представить взаимное фазовое расположение синусоидальных токов и напряжений, а также их абсолютные значения в выбранном масштабе. Пример векторной диаграммы напряжений и токов для последовательной схемы (рис. 3.1) представлен на рис. 3.2.

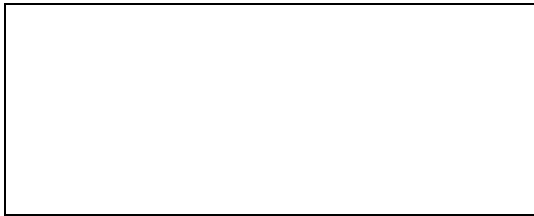


Рис. 3.1

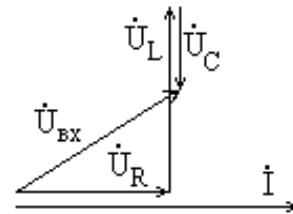


Рис. 3.2

При исследовании цепей синусоидального тока кроме амперметра и вольтметра, показывающих в данном случае действующие значения тока и напряжения соответственно, используется ваттметр, прибор, предназначенный для измерения активной мощности цепи, т.е. величины:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (3.8)$$

Ваттметр имеет две обмотки, начала которых обозначаются звездочкой около клеммы на корпусе прибора. Одна обмотка (токовая) включается в цепь последовательно, подобно амперметру, вторая - параллельно, подобно вольтметру.

Таким образом, использование амперметра, вольтметра и ваттметра в цепях синусоидального тока позволяет определить не только действующие значения токов и напряжений, но и фазовый сдвиг.

3.2. Рабочее задание

1. С помощью двухлучевого осциллографа исследовать фазовый сдвиг между током и напряжением в цепи, содержащей активное сопротивление, индуктивную катушку, конденсатор и источник синусоидальной ЭДС.

2. Измерить активное сопротивление реостата R_p , активное (R_k) и индуктивное (ωL_k) сопротивления катушки и емкостное ($1/\omega C$) сопротивление конденсатора.

3. Проверить закон *Ома* в цепи с последовательно соединенными реостатом, катушкой и конденсатором (значения сопротивлений которых измерены в

п.2) путем сравнения измеренного действующего значения тока и подсчитанного по закону Ома.

В этой же цепи проверить *второй закон Кирхгофа*, построив векторную диаграмму по измеренным напряжениям на входе цепи, реостате, катушке, конденсаторе.

4. Проверить *первый закон Кирхгофа*, собрав цепь с параллельно соединенными индуктивной катушкой и конденсатором.

3.3. Описание лабораторной установки

В работе используется источник синусоидального напряжения, двухлучевой осциллограф, реостат, индуктивная катушка, конденсатор переменной емкости, амперметры, вольтметры, ваттметр.

3.4. Порядок проведения лабораторной работы

1. Подключить через амперметр активное сопротивление к источнику синусоидального напряжения и с помощью двухлучевого осциллографа наблюдать кривые тока и напряжения (схема рис. 3.3).

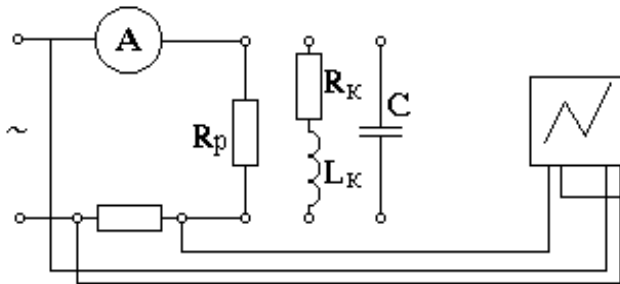


Рис. 3.3

Осциллограммы зарисовать. То же самое проделать при включении индуктивной катушки, а затем конденсатора.

2. Собрать электрическую схему (рис. 3.4) и измерить напряжение, ток и мощность при включенном активном сопротивлении, затем - при индуктивном и емкостном.



Рис. 3.4

Измерения повторить при трех различных значениях входного напряжения. Результаты занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

	Активное сопротивление				Индуктивная катушка					Конденсатор			
	U , В	I , А	P , Вт	R_p , Ом	U , В	I , А	P , Вт	R_k , Ом	X_k , Ом	U , В	I , А	P , Вт	X_c , Ом
1													
2													
3													

Расчетные формулы

$$R = \frac{P}{I^2}; \quad X = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}. \quad (3.9)$$

3. Собрать последовательную цепь по схеме рис. 3.5.

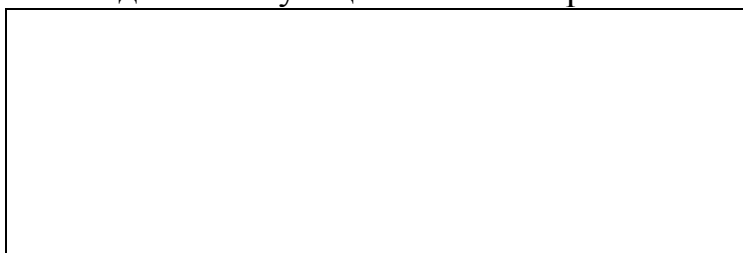


Рис. 3.5

Измерить ток и напряжения на входе и на элементах цепи при трех различных значениях $U_{вх}$. Результаты записать в табл. 3.2.

Таблица 3.2

	$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, А	U_R , В	U_L , В	U_C , В
1					
2					
3					

Построить векторную диаграмму цепи и по ее данным проверить закон Ома и второй закон Кирхгофа.

4. Собрать схему рис. 3.6.

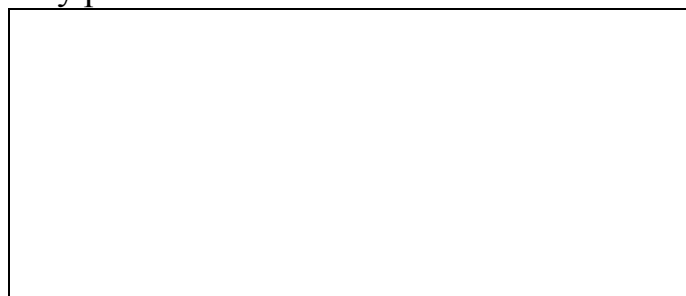


Рис. 3.6

Измерить напряжения на входе и токи на входе и в параллельных ветвях цепи при трех различных значениях $U_{вх}$. Результаты записать в табл. 3.4.

Таблица 3.4

	$U_{\text{ex}}, \text{В}$	$I_{\text{ex}}, \text{А}$	$I_L, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$z_{\text{ex}}, \text{Ом}$
1					
2					
3					

Расчетная формула

$$z_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{I_{\text{ex}}}. \quad (3.10)$$

Построить векторные диаграммы токов и напряжения для всех трех замеров.

3.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Перечень оборудования, используемого в работе.
3. Результаты экспериментов, схемы, расчеты, выводы.
4. Осциллограммы, векторные диаграммы, графики.

3.6. Контрольные вопросы

1. Что такое комплексный ток и напряжение?
2. Как определить сдвиг фаз между током и напряжением в последовательной цепи, содержащей R, L, C ?
3. Как определить комплексное сопротивление цепи по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра?
4. Постройте векторную диаграмму напряжений для последовательной цепи.
5. Сформулируйте законы Кирхгофа в символической форме.
6. Что такое действующее значение переменного тока?
7. Постройте векторную диаграмму токов для параллельного контура.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы: исследовать различные режимы трехфазной цепи, установить основные соотношения в симметричных трехфазных цепях. По данным эксперимента построить векторные диаграммы напряжений и токов.

4.1. Основные сведения

Трехфазная симметричная система ЭДС - это совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе между собой на 120° . Трехфазную систему ЭДС получают от трехфазного генератора. Такие генераторы широко используются в бортовых системах электроснабжения.

Совокупность трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки и соединительных проводов образует *трехфазную цепь*. Пример трехфазной цепи изображен на рис. 4.1.

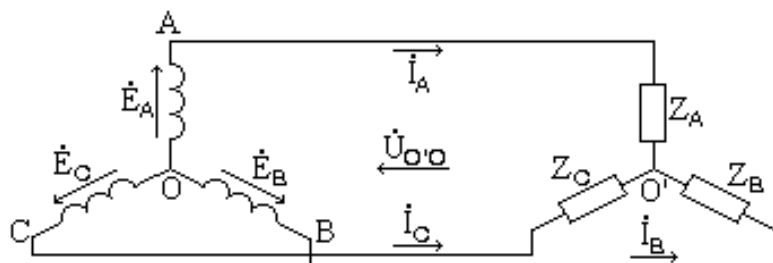


Рис. 4.1

Такое соединение нагрузки называется соединением *звездой без нулевого провода*. Возможны также соединения нагрузки, представленные на рис. 4.2 и рис. 4.3: соединение *звездой с нулевым проводом* и соединение *треугольником*.

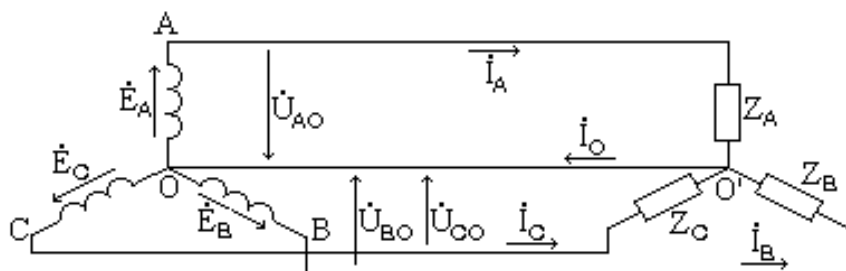


Рис. 4.2

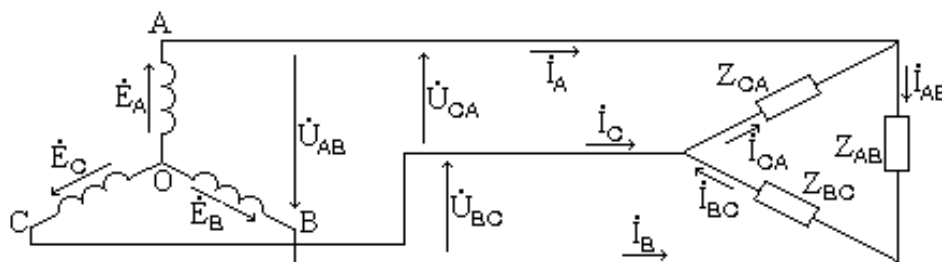


Рис. 4.3

Если комплексные сопротивления нагрузки в фазах равны между собой: $Z_A = Z_B = Z_C$ или $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$, то такая нагрузка называется *симметричной* или *равномерной*.

Токи, протекающие в фазах нагрузки, называют *фазными*, а токи в проводах, соединяющих источник и нагрузку (линейных проводах) - *линейными*. Напряжения между линейными проводами называют *линейными*, а напряжения на фазах источника или нагрузки - *фазными* напряжениями соответственно источника или нагрузки.

Векторная диаграмма симметричной трехфазной системы ЭДС представлена на рис.4.4:

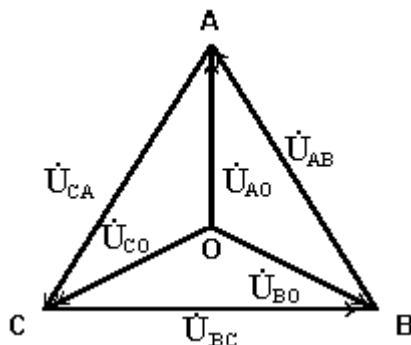


Рис. 4.4

Обычно принимают за ноль начальную фазу синусоиды фазного напряжения фазы A. Тогда комплексные напряжения симметричной трехфазной системы запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AO} &= U_{\Phi}; & \dot{U}_{AB} &= U_{\Lambda} e^{j30^{\circ}}; \\ \dot{U}_{AO} &= U_{\Phi} e^{-j120^{\circ}}; & \dot{U}_{BC} &= U_{\Lambda} e^{-j90^{\circ}}; \\ \dot{U}_{AO} &= U_{\Phi} e^{j120^{\circ}}; & \dot{U}_{CA} &= U_{\Lambda} e^{j150^{\circ}}; \end{aligned} \quad (4.1)$$

Здесь \dot{U}_{AO} , \dot{U}_{BO} , \dot{U}_{CO} - *фазные* напряжения; \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} - *линейные* напряжения.

Для *симметричных трехфазных источников* выполняется следующее соотношение между действующими значениями линейных и фазных напряжений

$$U_{\Lambda} = \sqrt{3}U_{\Phi}.$$

Для *симметричных трехфазных нагрузок* выполняются следующие соотношения между действующими значениями линейных и фазных токов:

для соединения звездой $I_{\Lambda} = I_{\Phi};$

для соединения треугольником $I_{\Lambda} = \sqrt{3}I_{\Phi}.$

Если *нагрузка симметричная*, то фазные и линейные токи также образуют симметричную трехфазную систему. При этом в схеме на рис. 4.1 напряжение $\dot{U}_{O'O} = 0$, а в схеме на рис. 4.2 $\dot{I}_O = 0$.

Если нагрузка не является симметричной, то в схеме (рис. 4.1) возникает *напряжение смещения нейтрали*

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{U}_{AO} Y_A + \dot{U}_{BO} Y_B + \dot{U}_{CO} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (4.2)$$

а напряжения на фазах нагрузки не равны фазным напряжениям источника.

В схеме (рис. 4.2) в этом случае будет протекать *ток нейтрали* $\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$, но напряжения на фазах нагрузки останутся неизменными, то есть равными фазным напряжениям источника. В схеме (рис. 4.3) режим работы каждой фазы нагрузки также не зависит от режима работы остальных фаз.

Приведем расчетные соотношения для определения токов в трехфазной цепи в общем случае несимметричной нагрузки:

$$\begin{aligned} \text{В схеме рис. 4.1} \quad \dot{I}_A &= (\dot{U}_{AO} - \dot{U}_{O'O}) / Z_A; \\ \dot{I}_B &= (\dot{U}_{BO} - \dot{U}_{O'O}) / Z_B; \\ \dot{I}_C &= (\dot{U}_{CO} - \dot{U}_{O'O}) / Z_C, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где $\dot{U}_{O'O}$ определяется выражением (4.2).

$$\begin{aligned} \text{В схеме рис. 4.2} \quad \dot{I}_A &= \dot{U}_{AO} / Z_A; \\ \dot{I}_B &= \dot{U}_{BO} / Z_B; \\ \dot{I}_C &= \dot{U}_{CO} / Z_C; \\ \dot{I}_O &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{В схеме рис. 4.3} \quad \dot{I}_{AB} &= \dot{U}_{AB} / Z_{AB}; & \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ \dot{I}_{BC} &= \dot{U}_{BC} / Z_{BC}; & \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ \dot{I}_{CA} &= \dot{U}_{CA} / Z_{CA}; & \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.2. Описание лабораторной установки

В качестве источника электрической энергии в работе используется трехфазный трансформатор; в качестве активной нагрузки - специальные колонки, смонтированные на стенде; измерительные приборы - амперметры, ваттметры, вольтметр.

4.3. Рабочее задание

Измерить токи, напряжения и мощность в трехфазной цепи в следующих режимах:

1. Соединение нагрузки звездой с нулевым проводом:
 - а) симметричная активная нагрузка;
 - б) несимметричная нагрузка - переменное активное сопротивление в фазе А;
 - в) несимметричная нагрузка в фазах, различная по характеру.
2. Соединение нагрузки звездой без нулевого провода:
 - а) симметричная активная нагрузка;
 - б) несимметричная нагрузка - переменное активное сопротивление в фазе А;
 - в) несимметричная нагрузка в фазах, различная по характеру.
3. Соединение нагрузки треугольником:
 - а) симметричная активная нагрузка;
 - б) несимметричная нагрузка в фазах, различная по характеру;
 - в) обрыв линейного провода.

Для симметричной нагрузки установить основные соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.

Для всех исследованных режимов построить векторные диаграммы напряжений и токов по результатам измерений.

5.4. Порядок выполнения лабораторной работы.

1. Собрать схему, изображенную на рис.4.5:

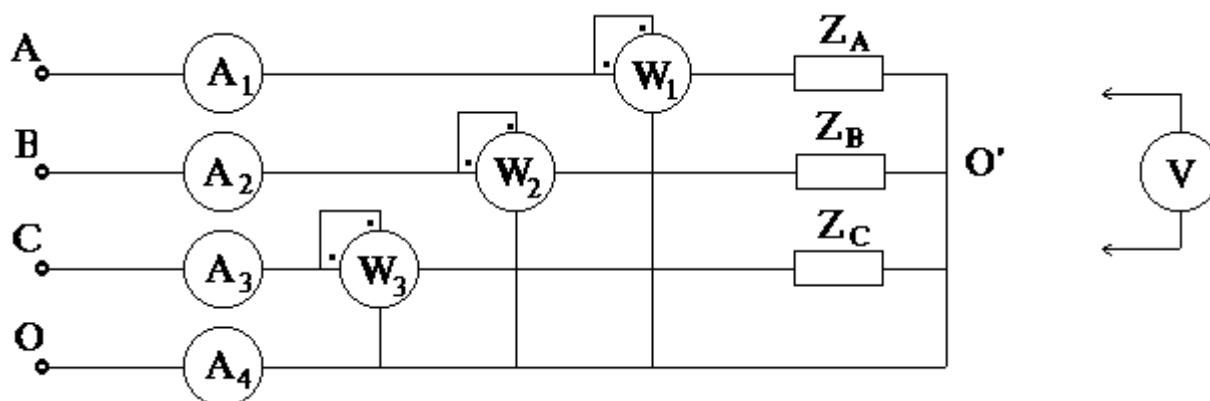


Рис. 4.5

а) установить в каждой фазе одинаковые активные сопротивления. Снять показания всех приборов, измерить вольтметром фазные и линейные напряжения. Снять показания всех амперметров. Результаты измерений занести в табл. 4.1;

б) в той же схеме изменять сопротивление в фазе А в соответствии с указаниями руководителя работ. Показания приборов занести в табл. 4.1;

в) включить в фазы несимметричную нагрузку, выбрав ее по указанию руководителя лабораторных работ. Показания приборов занести в табл. 4.1.

3. Собрать схему, изображенную на рис. 4.7:

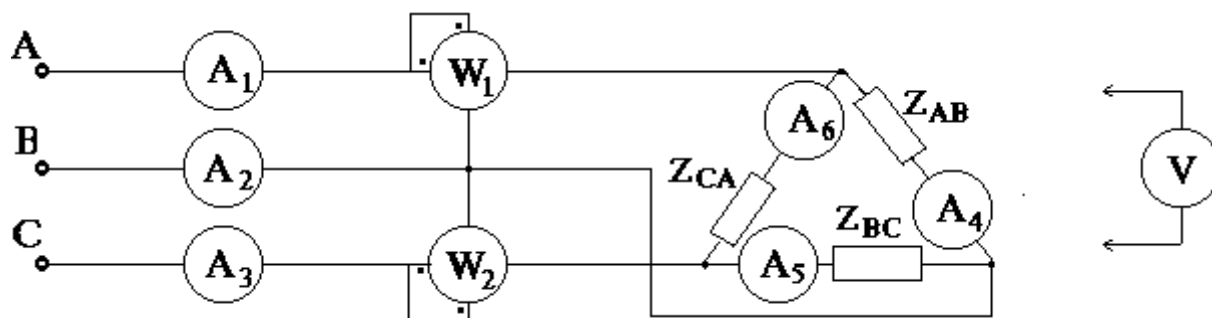


Рис. 4.7

а) установить в фазах активную симметричную нагрузку. Снять показания приборов, результаты занести в табл. 4.3;

б) включить в фазы несимметричную нагрузку, выбрав ее по указанию руководителя работ. Результаты измерений занести в табл. 4.3;

в) установив предварительно симметричную нагрузку в фазах, отключить затем один из линейных проводов. Провести измерения всех токов и напряжений, результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$I_{AB},$ А	$I_{BC},$ А	$I_{CA},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	Примеч.
а)												
б)												
в)												

Построить векторные диаграммы напряжений и токов для всех режимов.

Указания к построению векторных диаграмм

Построение векторных диаграмм напряжений по экспериментальным данным следует начинать с треугольника линейных напряжений. Для этого, выбрав масштаб напряжений, отложить отрезок, соответствующий U_{BC} (рис. 4.8).

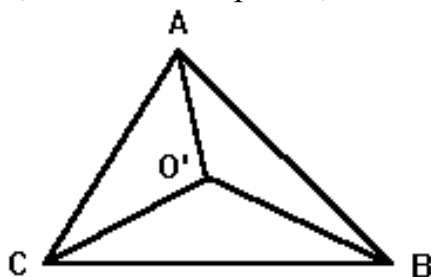


Рис. 4.8

Затем раствором циркуля из точки В отложить отрезок, соответствующий в выбранном масштабе U_{AB} , а из точки С таким же образом - U_{CA} . В точке пересечения получим точку А. Соединив точки А-В-С и расставив стрелки так, как это сделано на рис. 4.8, получим треугольник линейных напряжений.

Для построения векторов фазных напряжений также раствором циркуля из точки А отложить отрезок, соответствующий в выбранном масштабе $U_{AO'}$, а из точки В - $U_{BO'}$. В пересечении получим точку O' . Соединив O' с вершинами А, В, С, получим вектора фазных напряжений. При этом длина отрезка CO' в масштабе напряжений должна соответствовать напряжению $U_{CO'}$, что может служить проверкой правильности замеров и построенной диаграммы.

Для построения векторной диаграммы токов необходимо выбрать масштаб токов, а затем откладывать вектора фазных токов на плоскости, ориентируя их относительно соответствующего фазного напряжения с учетом характера нагрузки в данной фазе. Линейные токи для соединения треугольником находят, пользуясь первым законом Кирхгофа, беря разности соответствующих векторов фазных токов.

4.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрические схемы опытов.
3. Результаты измерений, таблицы, расчеты.
4. Векторные диаграммы напряжений и токов.
5. Выводы.

4.6. Контрольные вопросы

1. Что такое симметричная трехфазная система ЭДС?
2. Что такое симметричная нагрузка трехфазной сети?
3. Какие существуют способы соединения нагрузок в трехфазных цепях?
4. Какова роль нулевого провода в трехфазной системе?
5. Запишите основные соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами для симметричной трехфазной сети в случае соединения звездой и треугольником.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКАХ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Цель работы: экспериментально определить гармонические составляющие несинусоидальных сигналов, исследовать фильтрующие свойства LC -цепей.

5.1. Основные сведения

Периодическими несинусоидальными или негармоническими токами и напряжениями называются токи и напряжения, изменяющиеся во времени по периодическому несинусоидальному закону. Такие токи и напряжения возникают в электрических цепях при действии в них источников несинусоидальных ЭДС, либо в цепях с синусоидальными источниками при наличии одного или нескольких нелинейных элементов.

Периодические несинусоидальные сигналы могут быть представлены в виде ряда Фурье, то есть суммы постоянной составляющей и гармонических составляющих

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \Psi_k), \quad (5.1)$$

где $u(t)$ - несинусоидальное напряжение;

U_0 - постоянная составляющая;

U_{mk} , Ψ_k - амплитуда и начальная фаза k -й гармоники;

$k = 1, 2, \dots$ - номер гармоники;

$\omega = 2\pi/T$ - угловая частота 1-й или основной гармоники;

T - период несинусоидального сигнала.

Форма (6.1) удобна для приложений в электротехнике и радиотехнике, так как в ней в явном виде фигурируют амплитуды и фазы гармоник, однако в математике ряд Фурье чаще записывается также в следующем виде

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t), \quad (5.2)$$

$$\text{где числа } a_0 = 2 \cdot U_0, \quad a_k = U_{mk} \sin \Psi_k, \quad b_k = U_{mk} \cos \Psi_k \quad (5.3)$$

называют коэффициентами Фурье.

$$\text{Обратно } U_0 = a_0 / 2, \quad U_{mk} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \Psi_k = \arctg a_k / b_k. \quad (5.4)$$

Если несинусоидальная функция $u(t)$ задана аналитическим выражением (формулой), то её коэффициенты Фурье (a_k , b_k) определяются по формулам

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(k\omega t) dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(k\omega t) dt, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5.5)$$

Если функция $u(t)$ не может быть выражена аналитически, то берут её значения в n точках периода (t_i), равноотстоящих друг от друга, и вычисляют коэффициенты Фурье по приближенным формулам:

$$U_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} u_i ;$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} u_i \cdot \cos \frac{2\pi k i}{n} ; \quad k=1,2,\dots,n/2 \quad (5.6)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} u_i \cdot \sin \frac{2\pi k i}{n}$$

где u_0, u_1, \dots, u_{n-1} - значения функции $u(t)$, соответствующие моментам времени t_0, t_1, \dots, t_{n-1} .

В данной лабораторной работе при ее выполнении на реальном оборудовании для наблюдения несинусоидального сигнала будет использована катушка со стальным сердечником (дроссель Dp), являющаяся в силу нелинейности кривой намагничивания стали нелинейным элементом.

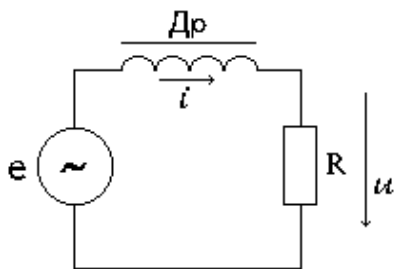


Рис. 5.1

Катушка подключается к источнику синусоидальной ЭДС (сеть переменного тока) (рис. 5.1). Ток, протекающий в такой цепи, а следовательно, и напряжение на резисторе будут несинусоидальными.

Примерный характер кривой $i(t)$ изображен на рис. 5.2:

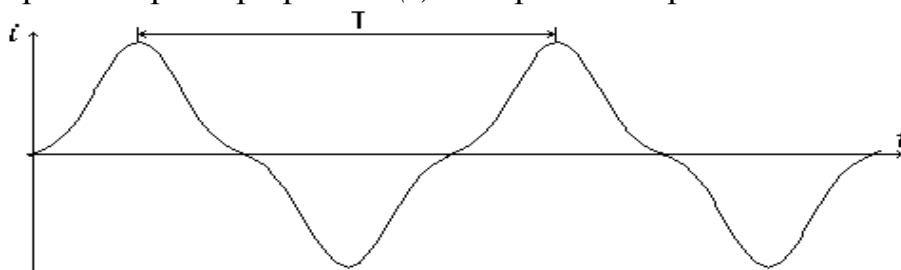


Рис. 5.2

При выполнении работы на компьютерной модели катушка не потребует-ся, так как источник несинусоидального сигнала смоделирован заранее в качестве готового блока.

Электрические фильтры

Для исключения из сигнала нежелательных гармонических составляющих или, наоборот, выделения нужных применяют электрические фильтры, принцип работы которых основан на зависимости сопротивления реактивных элементов от частоты.

Электрический фильтр – это четырехполосник, который включают между источником сигнала и нагрузкой с целью пропускания к приемнику частот и

задержания токов других частот.

Диапазон частот, пропускаемых фильтром без затухания, называется *полосой прозрачности*; диапазон частот, пропускаемых фильтром с затуханием, - *полосой затухания*. Граничная частота между полосой прозрачности и полосой затухания называется *частотой среза* - ω_c .

Фильтры обычно собирают из индуктивных катушек и конденсаторов по симметричной Т - или П - образной схеме (рис.5.3а; 5.4а):

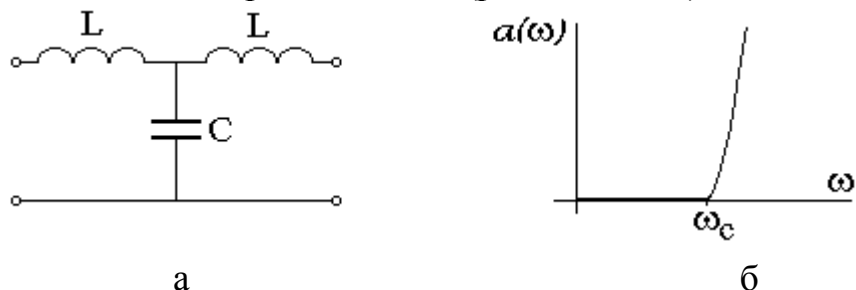


Рис. 5.3

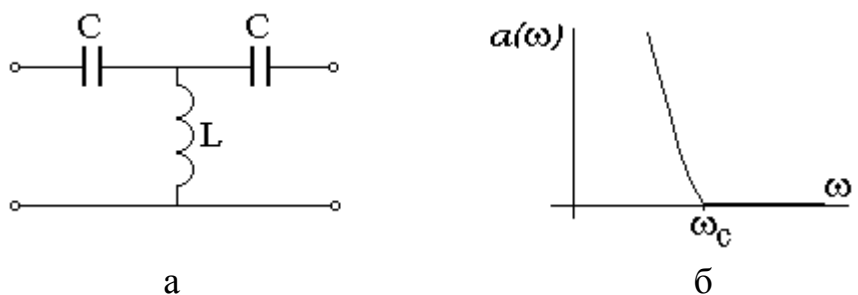


Рис. 5.4

На рис.5.3б и рис. 5.4б – зависимости коэффициента затухания от частоты при согласованной нагрузке. Из теории четырехполюсников известно, что согласованной нагрузкой называется случай, когда сопротивление нагрузки четырехполюсника равно его характеристическому сопротивлению: $R_H = Z_c$. Для LC-фильтров Z_c – чисто активное, но при этом зависит от частоты. На базе теории четырехполюсников может быть осуществлен и расчет фильтра.

Для фильтра нижних частот (НЧ), показанного на рис. 5.3а, получены следующие результаты:

$$\text{частота среза - } \omega_c = \sqrt{\frac{2}{LC}} ; \quad (5.7)$$

$$\text{согласованная нагрузка - } R_H = \sqrt{2 \frac{L}{C} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2}\right)} . \quad (5.8)$$

Для фильтра верхних частот (ВЧ) на рис. 5.4а:

$$\text{частота среза - } \omega_c = \sqrt{\frac{1}{2LC}} ; \quad (5.9)$$

$$\text{согласованная нагрузка - } R_H = \sqrt{2 \frac{L}{C} \left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}\right)} . \quad (5.10)$$

5.2. Рабочее задание

1. Определить по осциллограмме сигнала его коэффициенты Фурье, постоянную составляющую, амплитуды и фазы гармоник.

2. Рассчитать параметры Т-образного LC -фильтра низких частот, обеспечивающего выделение 1-й гармоники сигнала.

3. Собрать схему фильтра НЧ с рассчитанными параметрами. Снять осциллограммы сигнала на входе и выходе фильтра. Сравнить амплитуду сигнала на выходе с результатами п.1.

4. Рассчитать параметры Т-образного LC -фильтра высоких частот, обеспечивающего выделение высших гармоник сигнала.

5. Собрать схему фильтра ВЧ с рассчитанными параметрами. Снять осциллограммы сигнала на входе и выходе фильтра. Сравнить амплитуду сигнала на выходе с результатами п.1.

5.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает источник синусоидального напряжения частотой $f=50\text{Гц}$, дроссель со стальным сердечником, сопротивления, индуктивные катушки, конденсаторы, амперметр и осциллограф.

5.4. Порядок выполнения лабораторной работы

При описании порядка выполнения работы схемы на рисунках с индексом «а» соответствуют реальному оборудованию, а с индексом «б» - компьютерной моделирующей программе Electronics Workbench.

1. Собрать схему, изображенную на рис. 5.5:

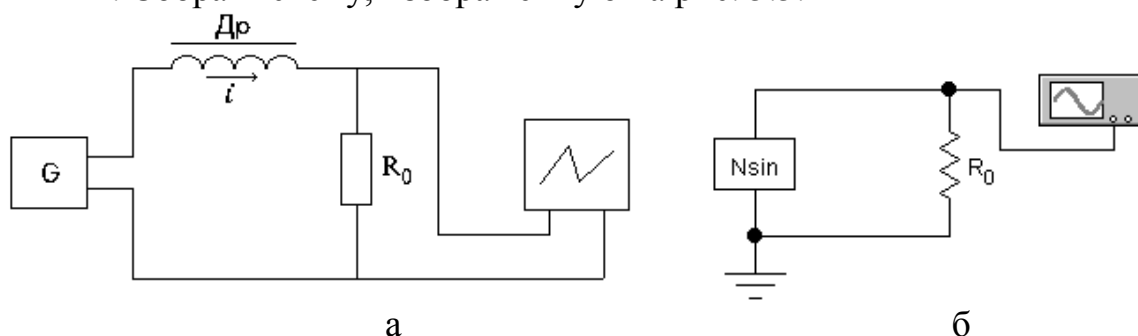


Рис. 5.5

В качестве R_0 установить сопротивление 30 Ом. Осциллограмму сигнала зарисовать. По экрану осциллографа снять девять значений сигнала за его период, беря отсчеты через равные интервалы времени. Результаты занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

	i_0	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8
$i(t_i)$									

Таблица 5.2

Постоянная составляющая	1-я гармоника	2-я гармоника	3-я гармоника	4-я гармоника
$I_0=$	-	-	-	-
-	$a_1=$	$a_2=$	$a_3=$	$a_4=$

-	$b_1=$	$b_2=$	$b_3=$	$b_4=$
-	$I_{m1}=$	$I_{m2}=$	$I_{m3}=$	$I_{m4}=$
-	$\Psi_1=$	$\Psi_2=$	$\Psi_3=$	$\Psi_4=$

Расчет коэффициентов Фурье, амплитуд и фаз гармоник вести по формулам (5.5) и (5.4). Результаты занести в табл. 5.2.

2. При расчете фильтров в данной лабораторной работе следует исходить из имеющихся в вашем распоряжении индуктивностей, иначе говоря, величина L будет известна либо в результате предварительных измерений, либо сообщена руководителем работ. (При выполнении на Electronics Workbench значением индуктивности можно задаться произвольно.)

Для фильтра НЧ используйте формулы (5.7), (5.8). Чтобы выделить первую гармонику надо задаться частотой среза так, чтобы первая гармоника оказалась в полосе прозрачности, а все высшие гармоники - в полосе затухания. Так как в исследуемом сигнале практически отсутствует вторая гармоника, то значит $\omega_1 < \omega_c < \omega_3$. Если выбрать $\omega_c = \omega_2 = 2\pi \cdot 2f$ рад/с, то емкость фильтра и величина согласованного на первой гармонике сопротивления нагрузки определятся по формулам:

$$C = \frac{2}{\omega_2^2 L} = \frac{2}{(4\pi f)^2 L} ; \quad R_H = \sqrt{2 \frac{L}{C} \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}\right)} = \sqrt{\frac{3L}{2C}} .$$

3. Собрать схему рис. 5.6, установив рассчитанные значения емкости C и сопротивления R_H .

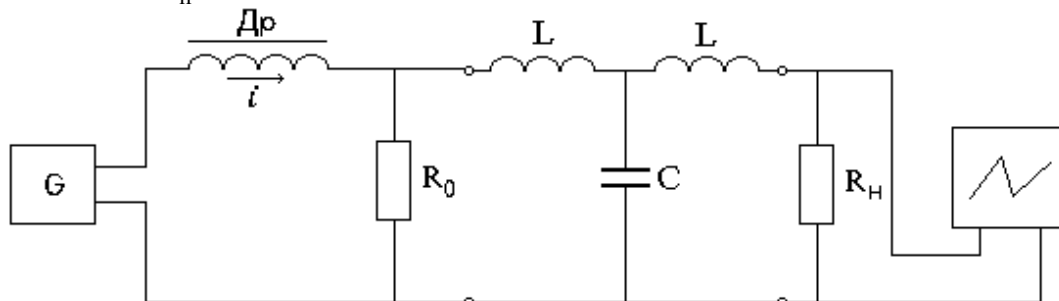


Рис. 5.6, а

Снять осциллограммы сигнала на входе и выходе фильтра. Определить амплитуду и частоту сигнала на выходе фильтра.

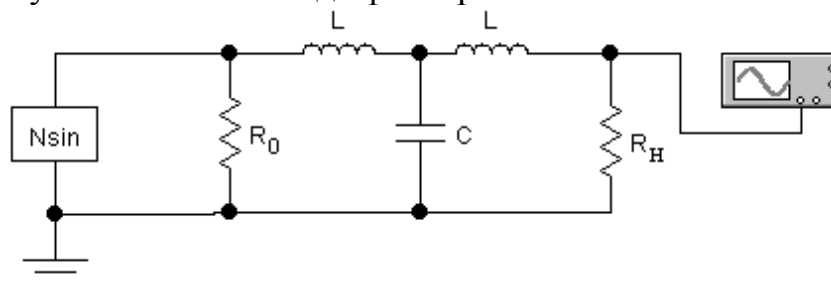


Рис. 5.6, б

4) Для фильтра ВЧ используйте формулы (5.9), (5.10). Чтобы выделить высшие гармоники надо задаться частотой среза так, чтобы первая гармоника

оказалась в полосе затухания, а все высшие гармоники - в полосе прозрачности. То есть частота среза теперь должна быть выше частоты первой гармоники $\omega_c > \omega_1$. Так как в исследуемом сигнале практически отсутствует вторая гармоника, то можно выбрать, как и в первом случае, $\omega_c = \omega_2 = 2\pi \cdot 2f$ рад/с. Тогда емкость фильтра и величина согласованного на третьей гармонике сопротивления нагрузки определяются по формулам:

$$C = \frac{1}{2\omega_2^2 L} = \frac{1}{2(4\pi f)^2 L}, \quad R_H = \sqrt{2 \frac{L}{C} \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_3^2}\right)} = \sqrt{\frac{10 L}{9 C}}.$$

5) Собрать схему рис. 5.7, установив рассчитанные значения емкости C и сопротивления R_H .

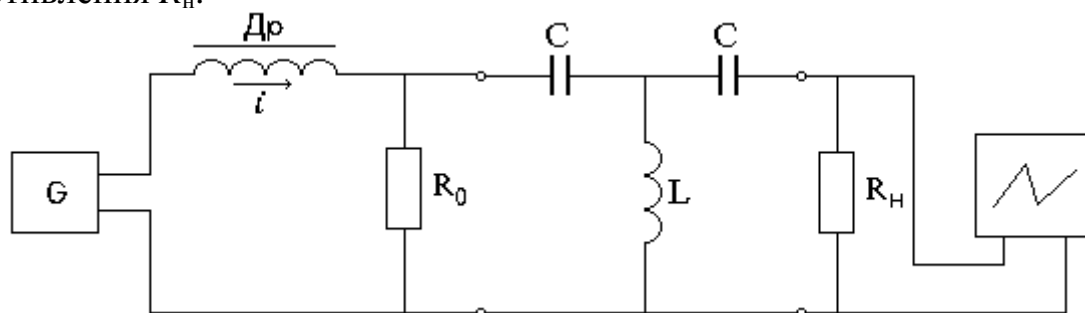


Рис. 5.7, а

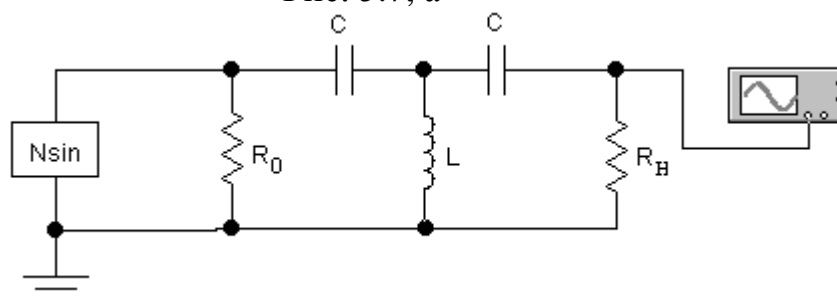


Рис. 5.7, б

Снять осциллограммы сигнала на входе и выходе фильтра. Определить амплитуду и частоту сигнала на выходе фильтра.

5.5. Содержание отчета

- 1) Название и цель работы.
- 2) Электрические схемы опытов.
- 3) Результаты измерений, таблицы, расчеты.
- 4) Осциллограммы и выводы.

5.6. Контрольные вопросы

- 1) Выведите формулы для приближенного вычисления коэффициентов Фурье.
- 2) Что такое электрический фильтр?
- 3) Что такое полоса прозрачности и полоса затухания фильтра?
- 4) Объясните порядок расчета фильтров в лабораторной работе?
- 5) Что такое согласованный фильтр?

б) Как изменяется характеристическое сопротивление фильтра при изменении частоты в пределах полосы прозрачности для НЧ и ВЧ фильтров?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Цель работы: экспериментальное исследование явления взаимной индукции в цепях переменного тока, определение коэффициента взаимной индукции двух индуктивно связанных катушек, исследование воздушного трансформатора.

6.1. Основные сведения

Наведение ЭДС в одной катушке при изменении во времени тока в другой катушке называется явлением взаимной индукции. ЭДС взаимной индукции определяется по закону электромагнитной индукции Ленца-Фарадея:

$$e_M = -M \frac{di}{dt}, \quad (6.1)$$

где M - взаимная индуктивность, Гн (генри).

Для синусоидальных токов и напряжений то же может быть записано в символической форме:

$$\dot{E}_M = -j\omega M \dot{I}, \quad \dot{U}_M = j\omega M \dot{I}. \quad (6.2)$$

Индуктивно связанные катушки могут иметь, а могут и не иметь электрической связи друг с другом. ЭДС взаимной индукции наводится магнитным потоком взаимной индукции, сцепленным с обеими катушками и созданным катушкой с током.

Действующее значение ЭДС взаимной индукции и взаимную индуктивность можно измерить в схеме электрической цепи, изображенной на рис. 6.1.

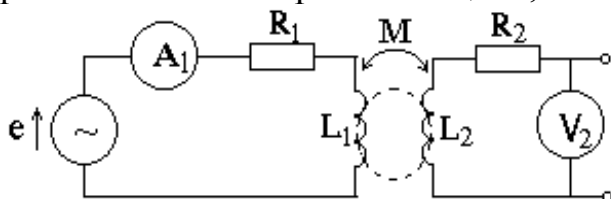


Рис. 6.1

Напряжение, которое покажет вольтметр V_2 , равно действующему значению ЭДС взаимной индукции

$$U_2 = |\dot{U}_2| = |j\omega M \dot{I}_1| = I_1 \omega M, \quad (6.3)$$

откуда

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}. \quad (6.4)$$

Если токи протекают по обеим катушкам L_1 и L_2 с магнитной связью, то существуют два магнитных потока взаимной индукции, возбуждаемые обеими катушками. Эти два магнитных потока будут индуцировать две ЭДС взаимной индукции: потоком, созданным первой катушкой, - во второй, и потоком, созданным второй катушкой, - в первой. В этом можно убедиться, если включить две катушки согласно (рис. 6.2, а) и встречно (рис. 6.2, б).

Здесь R_1 , R_2 - внутренние активные сопротивления катушек; знаком (•) обозначены “начала” обмоток катушек.

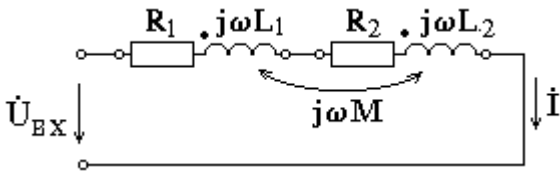


Рис. 6.2, а

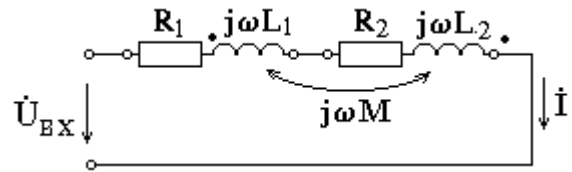


Рис. 6.2, б

При согласном включении имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ex} &= R_1 \dot{I} + (j\omega L_1 \dot{I} + j\omega M \dot{I}) + R_2 \dot{I} + (j\omega L_2 \dot{I} + j\omega M \dot{I}) = \\ &= \dot{I} [(R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)], \end{aligned} \quad (6.5)$$

при встречном включении:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ex} &= R_1 \dot{I} + (j\omega L_1 \dot{I} - j\omega M \dot{I}) + R_2 \dot{I} + (j\omega L_2 \dot{I} - j\omega M \dot{I}) = \\ &= \dot{I} [(R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)]. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Таким образом, при одном и том же входном напряжении U_{ex} в цепи последовательно соединенных катушек ток при встречном их включении будет больше, чем при согласном. Это обстоятельство можно использовать для определения взаимной индуктивности и полярности индуктивно связанных катушек.

Если известны активные сопротивления катушек R_1 и R_2 , то взаимную индуктивность M нетрудно определить по измеренному току и напряжению на входе цепи из двух опытов включения:

$$M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega} \quad \text{Гн}, \quad (6.7)$$

где $X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M)$, Ом;

$X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M)$, Ом; (6.8)

$$X_{\text{согл}} = \sqrt{\left(\frac{U_{ex}}{I_{\text{согл}}}\right)^2 - (R_1 + R_2)^2};$$

$$X_{\text{встр}} = \sqrt{\left(\frac{U_{ex}}{I_{\text{встр}}}\right)^2 - (R_1 + R_2)^2}.$$

Явление взаимоиндукции используется, например, в воздушном трансформаторе, который состоит из двух имеющих индуктивную связь между собой обмоток-катушек, расположенных в воздухе или на сердечнике из неферромагнитного материала. К одной обмотке подключен источник энергии переменного тока, к другой - нагрузка (рис. 6.3).

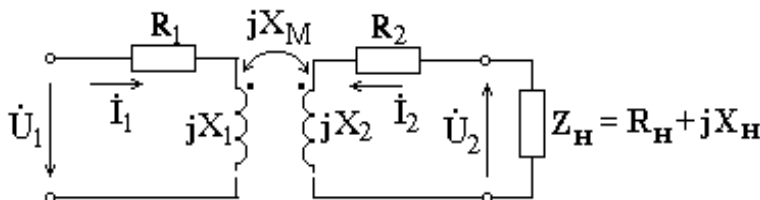


Рис. 6.3

Воздушный трансформатор описывается следующими уравнениями, вытекающими из 2-го закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1 + jX_M \dot{I}_2 &= \dot{U}_1; \\ R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2 + jX_M \dot{I}_1 + Z \dot{I}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Решая относительно токов I_1 и I_2 , имеем:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{(R_1 + R_{\text{вн}}) + j(X_1 - X_{\text{вн}})}, \quad (6.10)$$

где

$$R_{\text{вн}} = \frac{(R_2 + R)X_M^2}{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X_{\text{вн}})^2} \quad \text{-вносимое активное сопротивление};$$

$$X_{\text{вн}} = \frac{(X_2 + X)X_M^2}{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X_{\text{вн}})^2} \quad \text{-вносимое реактивное сопротивление}.$$

$$\dot{I}_2 = \frac{jX_M \dot{U}_1}{[R_1 + j(X_1 - X_M)]\{(R_2 + R) + R_{\text{вн}} + j[(X_2 + X) - X_{\text{вн}}]\}}, \quad (6.11)$$

где

$$R_{\text{вн}} = \frac{R_1 X_M^2}{R_1^2 + X_1^2} \quad X_{\text{вн}} = \frac{X_1 X_M^2}{R_1^2 + X_1^2} \quad (6.12)$$

6.2. Рабочее задание

- 1) Определить индуктивность и активное сопротивление двух катушек.
- 2) Определить взаимную индуктивность двух индуктивно связанных катушек.
- 3) Построить частотные характеристики $I_{\text{ex}}(\omega)$, $I_{\text{вых}}(\omega)$ воздушного трансформатора при емкостном характере нагрузки.

6.3. Описание лабораторной установки

В работе используются: источник регулируемого синусоидального напряжения переменной частоты, две катушки индуктивности, конденсатор переменной емкости, реостат, вольтметры, амперметры, ваттметр.

6.4. Порядок проведения лабораторной работы

- 1) Для определения собственной индуктивности и активного сопротивления катушек собрать схему (рис. 6.4).

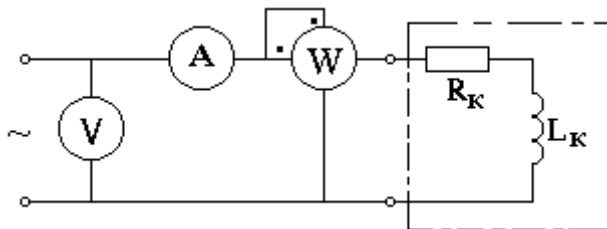


Рис. 6.4

Для каждой катушки замеры провести при 3-х различных значениях питающего напряжения. Результаты занести в таблицу 6.1.

В строку 4 для каждой катушки заносится средний результат по трем замерам.

Таблица 6.1

		Опыт			Расчет	
		$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$R_k, Ом$	$L_k, Гн$
Катушка №1	1					
	2					
	3					
	4				$R_k =$	$L_k =$
Катушка №2	1					
	2					
	3					
	4				$R_k =$	$L_k =$

Расчет производится по формулам:

$$R_k = \frac{P}{I^2}; \quad L_k = \frac{1}{2\pi \cdot f} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_k^2}.$$

2) Установив катушки в непосредственной близости одну от другой, определить взаимную индуктивность. Для этого собрать схему (рис 6.5) и измерить напряжение и ток при согласном и встречном включении.

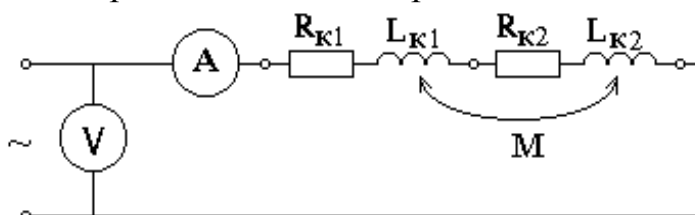


Рис. 6.5

В первом случае концы катушек подключаются произвольным образом, во втором - концы одной из катушек меняются местами. Результаты опыта записываются в таблицу 6.2. Расчет вести по формулам (6.7, 6.8).

Таблица 6.2

	Согласное включение			Встречное включение		
	Опыт		Расчет	Опыт		Расчет
	$U, В$	$I, А$	$X_{согл}, Ом$	$U, В$	$I, А$	$X_{встр}, Ом$
1						
2						
3						
4			$X_{согл} =$			$X_{встр} =$
5	$M =$					

Определить взаимную индуктивность по схеме (рис. 6.6).

Результаты занести в таблицу 6.3. Расчет вести по формуле (6.4).

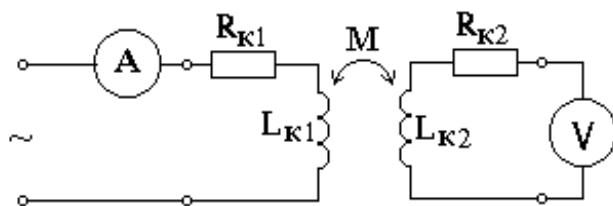


Рис. 6.6

Таблица 6.3

	Опыт		Расчет
	I_1, A	U_2, B	$M, Гн$
1			
2			
3			
4			$M =$

Результаты сравнить с п.2.1.

3) Для исследования частотных характеристик воздушного трансформатора собрать схему (рис. 6.7).

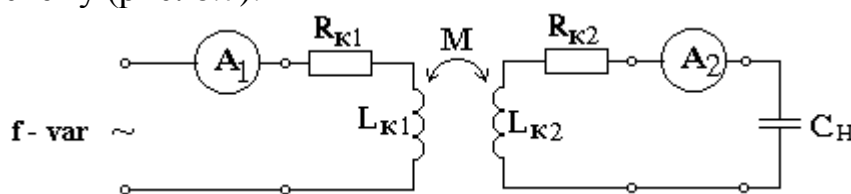


Рис. 6.7

Изменяя частоту питающего напряжения, снять и построить зависимости $I_1(\omega)$, $I_2(\omega)$. Результаты занести в таблицу 6.5.

Таблица 6.5

$f, Гн$						
I_1, A						
I_2, A						

6.5. Содержание отчета

- 1.) Название и цель работы.
- 2) Наименование и тип измерительных приборов, класс точности.
- 3) Схемы опытов, таблицы.
- 4) Расчетные формулы, расчеты, графики. Выводы.

6.6. Контрольные вопросы

- 1) Объяснить явление взаимной индукции.
- 2) Как определить взаимную индуктивность двух индуктивно-связанных катушек?
- 3) Как определить полярность индуктивно-связанных катушек?
- 4) Что такое согласное и встречное включение катушек?
- 5) Напишите основные уравнения воздушного трансформатора.
- 6) Объясните характер частотных характеристик воздушного трансформатора.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для бакалавров. - М.: Издательство Юрайт, 2012

2. Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. – М.: ДМК Пресс, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Организация работ.....	3
Оформление отчета и защита.....	3
Лабораторная работа № 1. Основные элементы электрической цепи постоянного тока.....	4
Лабораторная работа № 2. Исследование разветвленной цепи постоянного тока.....	8
Лабораторная работа № 3. Исследование установившихся процессов в цепях синусоидального тока	13
Лабораторная работа № 4. Исследование трехфазных электрических цепей.....	19
Лабораторная работа № 5. Исследование электрических цепей при не-синусоидальных токах. Электрические фильтры.....	26
Лабораторная работа № 6. Исследование явления взаимной индукции.....	32
Рекомендуемая литература.....	37