

## ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

Лабораторные работы проводятся на стендах в лаборатории «Электротехники» с использованием реального оборудования. Возможно также проведение работ на компьютере с применением моделирующей программы 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 этого 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.

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ В СРЕДЕ MULTISIM

Выполнение лабораторных работ в среде MULTISIM предполагает, что студент имеет базовые знания и умения по работе в ОС Windows XP.

MULTISIM является многофункциональной средой. При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Основы электротехники и электроники» используются лишь некоторые возможности данного программного пакета.

При необходимости открыть файл выполните одно из следующих действий:

- нажмите сочетание клавиш **Ctrl+O**;
- выберите в меню **File** раздел **Open**;
- выполните двойное нажатие *левой* кнопкой мыши на файле в проводнике ОС Windows.

При необходимости добавить элемент электрической цепи на рабочее пространство выполните одно из нижеперечисленных действий:

- нажмите сочетания клавиш **Ctrl+W**;
- выберите в меню **Place** раздел **Component**;
- нажмите *левой* кнопкой мыши на один из элементов панели инструментов Components, изображённой на рис. 1.



Рис. 1

После этого откроется окно, где можно выбрать необходимый вам элемент.

Похожим способом можно поместить на рабочее пространство измерительные приборы и устройства:

- выбрав в меню **Simulate** раздел **Instruments**;
- нажав *левой* кнопкой мыши на один из элементов панели инструментов Instruments, изображённой на рис. 2.



Рис. 2

После выбора одного из приборов возле указателя мыши появится его контур, и для завершения операции необходимо повторное нажатие левой кнопкой мыши на свободную область рабочего пространства.

Изначально измерительный прибор или устройство представлены в виде условных обозначений. Для доступа к информации, показываемой ими, нужно:

- нажав *правой* кнопкой мыши на интересующем вас приборе, выбрать в контекстном меню раздел **Properties**;
- выполнить двойное нажатие *левой* кнопкой мыши на приборе.

После этого откроется окно, уникальное для каждого прибора.

Рассмотрим приборы, которые будут использоваться в лабораторных работах:

1) **Multimeter**. Условное обозначение и окно показаны на рис. 3.

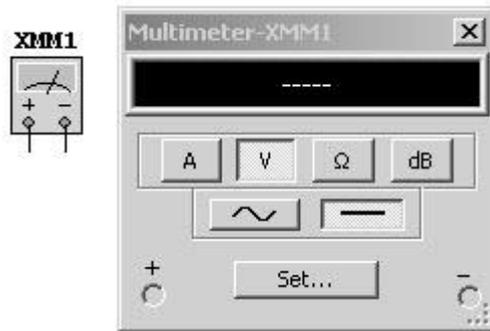


Рис. 3

Является моделью мультиметра. Этим прибором измеряется сила тока (**A**), напряжение (**V**), сопротивление (**Ω**) и коэффициент передачи в логарифмических единицах- децибелах (**dB**) при постоянном (—) и переменном (~) напряжениях. Переключение в необходимый режим производится **однократным** нажатием *левой* кнопки мыши на необходимую кнопку. Способ его включения в цепь зависит от того, какую величину необходимо измерить. Включенный последовательно в какую-либо ветвь, **Multimeter** измеряет ток в ней. Для измерения напряжения прибор включается параллельно участку цепи.

2) **Wattmeter**. Условное обозначение и окно показаны на рис. 4.

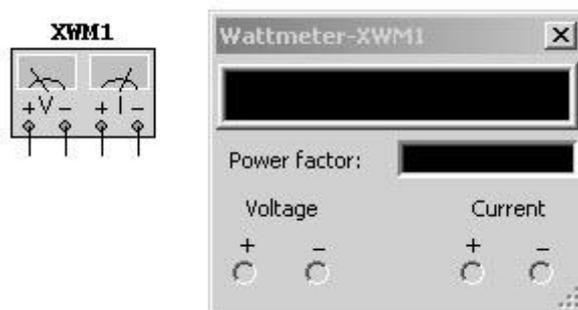


Рис. 4

Является моделью ваттметра. Этим прибором измеряется электрическая мощность. Так же как и в реальном приборе присутствуют две обмотки: токовая (**I**) и напряжения (**V**). Способ его подключения аналогичен реальному прибору. Токовая обмотка включается в цепь последовательно, подобно амперметру, обмотка напряжения - параллельно, подобно вольтметру. Верхнее табло показывает собственно мощность, нижнее (**Power factor**) - коэффициент мощности.

3) **Oscilloscope.** Условное обозначение и окно показаны на рис. 5.

Является моделью двухканального осциллографа. Этим прибором можно исследовать одновременно два электрических сигнала во временной области. Как и в реальном приборе имеется настройка временной (с/деление) развёртки (**Timebase**) по оси абсцисс и отдельно для каждого канала (**Channel A, Channel B**) масштабируется напряжение (В/деление) по оси ординат.

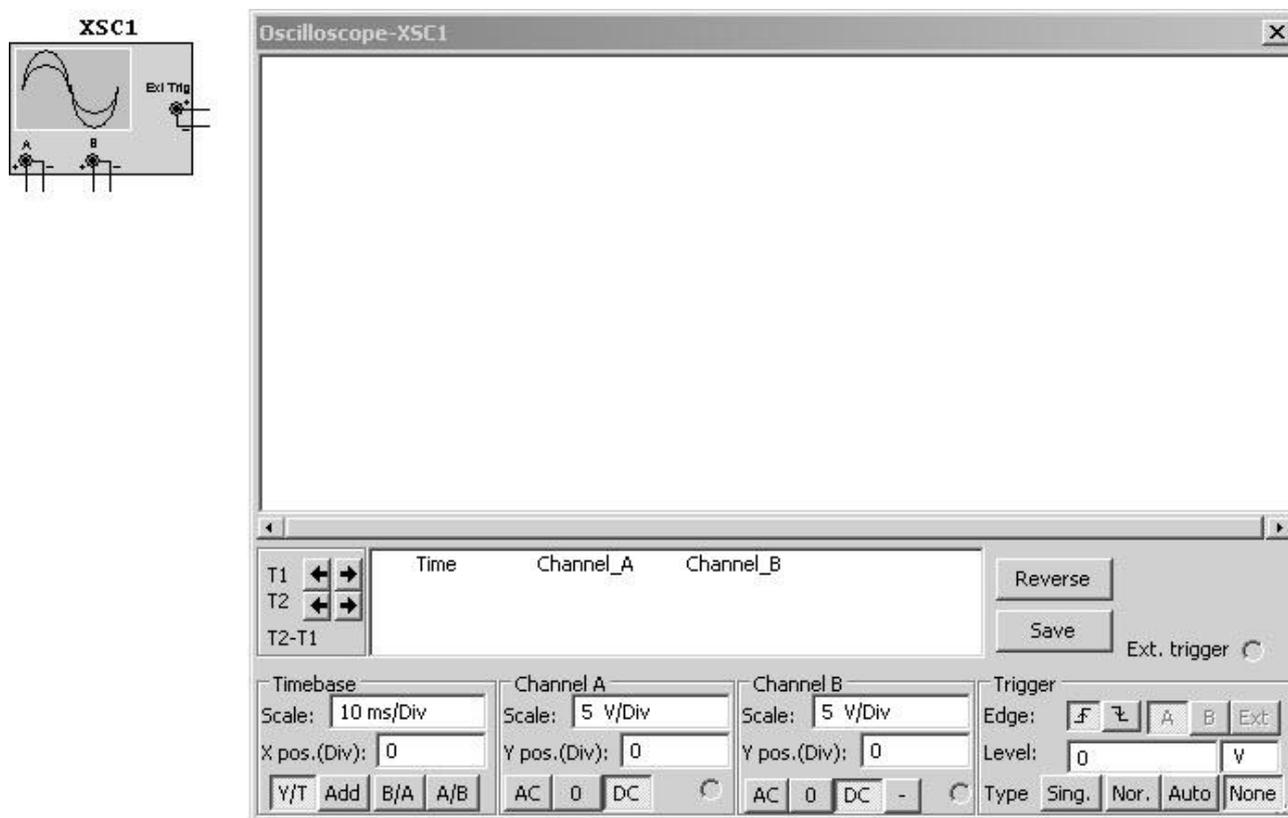


Рис. 5

При использовании элементов с изменяемым параметром (рис. 6) для его изменения необходимо подвести указатель мыши к элементу, после чего около него появится полоса прокрутки. Зажав ползунок *левой* кнопкой мыши, можно изменять количественно значение параметра. Цифры рядом с элементом показывают значение параметра в процентах от его максимального величины.

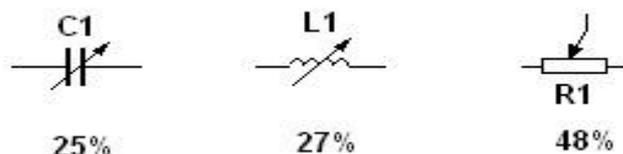


Рис. 6

После размещения всех необходимых элементов и измерительных приборов на рабочем пространстве необходимо их соединить согласно приведённой схеме.

Это выполняется следующим образом:

- подвести указатель мыши к одной из клемм элемента/прибора, при этом вид указателя изменится на «перекрестие»;

- нажать однократно *левую* кнопку мыши, при этом указатель мыши остаётся в виде перекрестия, а за ним от начальной клеммы тянется линия, указывающая путь соединения;

- подвести указатель мыши в виде перекрестия к клемме элемента/прибора или другому проводнику (при этом на конечной клемме или проводнике появится жирная точка, показывающая место соединения) и повторно нажать *левую* кнопку мыши.

После этих действий указатель мыши вернётся к обычному виду и появится необходимое соединение.

Для того чтобы схема перешла в рабочее состояние, необходимо перевести выключатель, изображённый на рис. 7, в положение «I». После этого начнётся моделирование работы схемы, финальным этапом которой будут показания приборов. Как только показания установятся либо в окне осциллографа появится необходимое число периодов сигнала, моделирование можно прекратить, переведя выключатель в положение «0». При этом если схема останется неизменной, показания приборов также сохранятся.



Рис. 7

При выполнении лабораторных работ в среде MULTISIM студентам **ЗАПРЕЩАЕТСЯ** выполнять какие-либо действия без согласия или указания преподавателя.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** экспериментально проверить применение законов Ома и Кирхгофа для расчёта параметров разветвлённой и неразветвлённой цепей и метода наложения.

### 1.1. Основные положения

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 приемники изображаются в виде сопротивления  $R$ . При этом величина сопротивления (единица измерения - Ом) представляет собой коэффициент пропорциональности между током в амперах (А) и напряжением в вольтах (В) для данного приемника, что определяет наклон вольт-амперной характеристики (рис. 1.1)  $R=U/I$ .

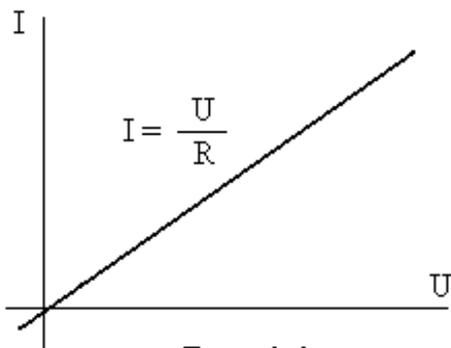


Рис. 1.1

Сопротивлением соединительных проводов, как правило, пренебрегают или включают его в сопротивление нагрузки.

Реальный источник электрической энергии представляется в виде последовательно соединенных источника ЭДС ( $E$ ) и внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  (рис.1.2, а) либо в виде параллельно соединенных источника тока  $I_k$  и внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  (рис. 1.2, б).

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.

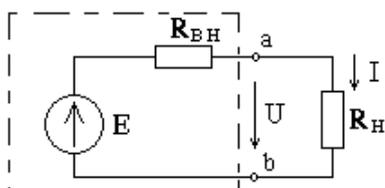


Рис. 1.2, а

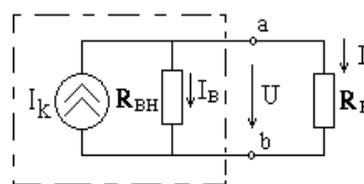


Рис. 1.2, б

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.

Для *реального* источника электрической энергии характерно уменьшение напряжения на его зажимах с увеличением тока.

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

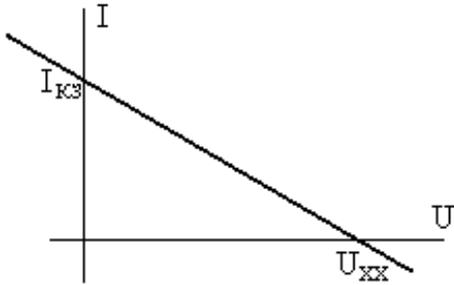


Рис. 1.3, а

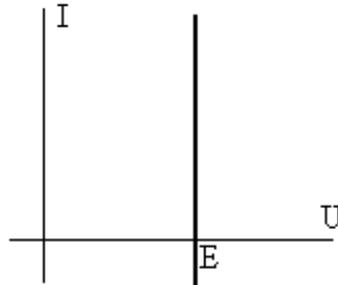


Рис. 1.3, б

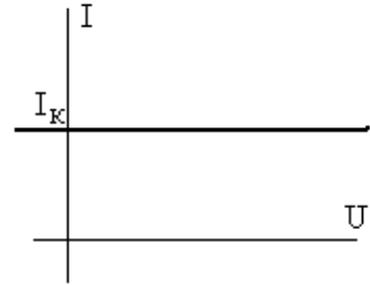


Рис. 1.3, в

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:

$$E = IR_{B\dot{I}} + IR_I . \quad (1.1)$$

Поделив на  $R_{B\dot{I}}$ , получим:

$$\frac{E}{R_{B\dot{I}}} = I + I \frac{R_I}{R_{B\dot{I}}} . \quad (1.2)$$

Обозначим  $I_{\dot{e}} = \frac{E}{R_{B\dot{I}}}$  - ток короткого замыкания источника

электрической энергии;  $I_B = I \frac{R_I}{R_{B\dot{I}}}$  - внутренний ток источника тока, тогда

$$I_{\kappa} = I + I_B . \quad (1.3)$$

Последнему выражению соответствует схема рис. 1.2, б.

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

В электрических цепях токи, напряжения и ЭДС подчиняются двум законам Кирхгофа.

**Первый: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.** То есть сумма втекающих в узел токов равна сумме токов, вытекающих из него.

Узел электрической цепи - это точка, в которой сходится не менее трех ветвей, а ветвь - часть цепи между двумя узлами.

*Второй: алгебраическая сумма напряжений в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре.*

Контур электрической цепи - это совокупность ветвей, начинающаяся и заканчивающаяся в одном узле.

С помощью этих законов могут быть составлены уравнения, позволяющие рассчитать значения любых токов и напряжений цепи при заданных параметрах её элементов.

*Количество уравнений, составленных по законам Кирхгофа, дающее полную систему линейных уравнений, равно количеству ветвей  $n$  минус количество ветвей, содержащих источник тока, причём по первому закону составляется  $(m-1)$  уравнение, где  $m$  – количество узлов схемы.*

*Закон Ома* позволяет определить ток на участке цепи, сила которого прямо пропорциональна напряжению, приложенному к участку, и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка.

В линейных электрических цепях выполняется *Принцип наложения*:

***ток в любой ветви равен алгебраической сумме частичных токов, вызванных каждым источником схемы в отдельности.***

Если в цепи действует несколько источников, то ток в какой-либо ветви складывается из соответствующего числа слагаемых, каждое из которых физически представляет собой ток, который протекал бы в этой ветви, если бы в цепи остался только один конкретный источник.

*Метод наложения* заключается в том, что ток в каждой из ветвей электрической цепи при всех включённых источниках электрической энергии находится как алгебраическая сумма частичных токов в этой же ветви, полученных при включении каждого из источников электрической энергии по очереди и исключении остальных. При этом надо помнить, что на месте исключенного источника ЭДС останется провод (так как внутреннее сопротивление *идеального* источника ЭДС равно нулю), а на месте источника тока будет разрыв цепи (так как внутреннее сопротивление *идеального* источника тока равно бесконечности).

## **1.2. Описание лабораторной установки**

В работе используются два источника электрической энергии постоянного тока GB1 и GB2, резисторы (линейные сопротивления), реостат, амперметры, вольтметр, выключатели.

## **1.3. Рабочее задание**

- 1) Определить значения ЭДС и внутренних сопротивлений источников электрической энергии.
- 2) Определить сопротивления резисторов цепи методом амперметра-вольтметра.
- 3) Проверить опытным путём законы Кирхгофа.
- 4) Проверить опытным путём метод наложения.

### 1.4. Порядок выполнения работы

1) Для определения значений ЭДС и внутренних сопротивлений источников электрической энергии GB1 и GB2 соберите схему, приведенную на рис. 1.4.

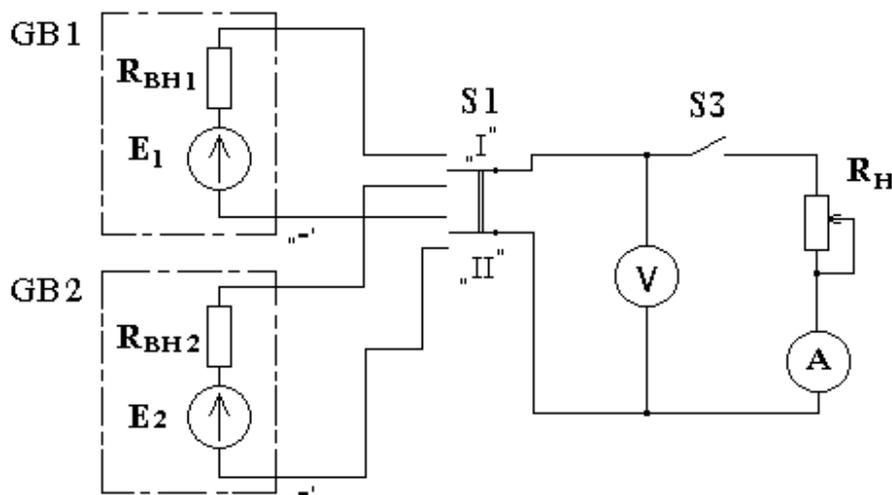


Рис. 1.4

После проверки схемы преподавателем приведите её в исходное положение: переключатель S1 установите в среднее (нейтральное) положение, а ключ S3 – в разомкнутое состояние; движок реостата Rн в положении, обеспечивающем его максимальное сопротивление.

Затем, установив переключатель S1 в положение „I”, измерьте ЭДС E<sub>1</sub> источника GB1 вольтметром V; установив этот переключатель в положение „II”, измерьте ЭДС E<sub>2</sub> источника GB2 тем же вольтметром. Установите S1 в нейтральное положение. Измеренные значения занесите в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Измерено						Вычислено	
E <sub>1</sub> , В	U <sub>1</sub> , В	I <sub>1</sub> , А	E <sub>2</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	I <sub>2</sub> , А	R <sub>вн1</sub> , Ом	R <sub>вн2</sub> , Ом

Далее, замкнув выключатель S3, включите в ту же схему (рис 1.4) нагрузку (реостат Rн) через амперметр А. С помощью переключателя S1 поочередно подключая источники GB1 и GB2, измерьте U<sub>1</sub> и I<sub>1</sub>, а затем U<sub>2</sub> и I<sub>2</sub> соответственно. Результаты измерений занесите в таблицу 1.1.

По измеренным значениям рассчитайте внутренние сопротивления источников R<sub>вн1</sub> и R<sub>вн2</sub> по формуле:

$$R_{вн} = \frac{E - U}{I}.$$

Результаты расчета также занесите в таблицу 1.1.

2) Определите сопротивления резисторов в цепи методом амперметра-вольтметра.

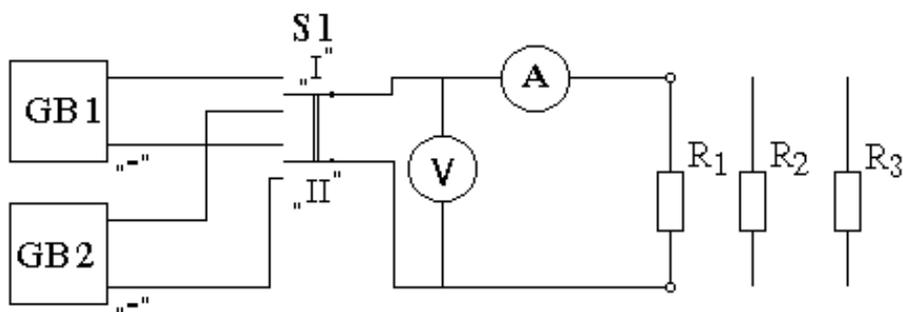


Рис.1.5

Соберите схему рис 1.5. После проверки преподавателем приведите её в исходное состояние (S1 в нейтральном положении).

Подключив источник GB1 (выключатель в положении „I”), измерьте падение напряжения на резисторе R1 вольтметром V и ток в цепи амперметром A. Те же измерения выполните с резистором R2, а затем с резистором R3. Результаты занесите в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Измерено						Вычислено			Примечание
$U_{R1}, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$U_{R2}, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$U_{R3}, \text{В}$	$I_3, \text{А}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	
									Источник GB1
									Источник GB2
									Средние значения

Рассчитайте сопротивления резисторов по формуле:

$$R_n = \frac{U_{Rn}}{I_n}, \text{ где } n = 1, 2, 3.$$

Результаты расчетов также занесите в таблицу 1.2.

Замените источник GB1 источником GB2 (для чего переведите выключатель S1 в положение „II”), повторите весь цикл измерений в схеме рис 1.5. Результаты измерений и расчетов запишите в таблицу 1.2. Установите переключатель S1 в нейтральное положение.

Определите средние значения сопротивлений R1, R2, R3 и занесите их в таблицу 1.2.

3) Для проверки опытным путем законов Кирхгофа и метода наложения соберите схему, приведённую на рис 1.6.

После проверки схемы преподавателем приведите её в исходное состояние (S1 и S2 в нейтральном положении).

Подключите источники GB1 и GB2 (S1 и S2 в положении „I’’) и проверьте выполнение 1-го закона Кирхгофа для любого из узлов схемы по показаниям амперметров.

Составьте уравнения по 2-му закону Кирхгофа для двух произвольно выбранных контуров схемы рис.1.6. Подстановкой измеренных в данном опыте токов и рассчитанных ранее сопротивлений и измеренных ЭДС убедитесь в справедливости 2-го закона Кирхгофа.

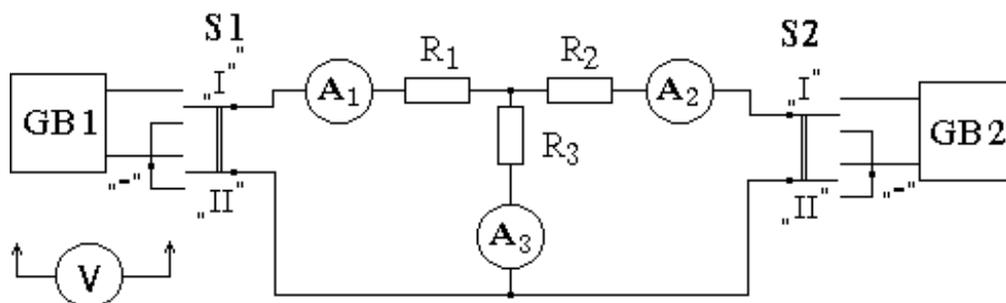


Рис 1.6

4) Проверка метода наложения в схеме рис 1.6 производится для следующих режимов работы:

а) источник GB1 включен (S1 в положении „I’’), источник GB2 исключен (закорочен) переключением S2 в положение „II’’;

б) источник GB2 включен (S2 в положении „I’’), источник GB1 исключен (закорочен) переключением S1 в положение „II’’;

в) оба источника включены (S1 и S2 в положении „I’’).

Показания вольтметра и амперметров занесите в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

		$I_1, A$	$I_2, A$	$I_3, A$
а)	$E_1 = \text{ B}$ $E_2 = 0 \text{ B}$			
б)	$E_1 = 0 \text{ B}$ $E_2 = \text{ B}$			
в)	$E_1 = \text{ B}$ $E_2 = \text{ B}$			

5) Рассчитайте частичные токи  $I'_1, I'_2, I'_3, I''_1, I''_2, I''_3$ , пользуясь схемами:

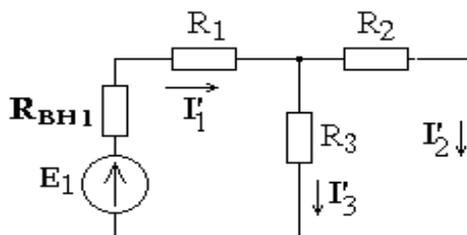


Рис.1.7, а

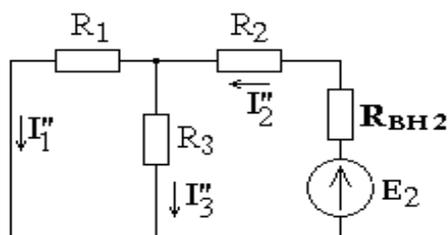


Рис.1.7, б

Полные токи ветвей будут равны:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_1' - I_1'', \\ I_2 &= -I_1' + I_2'', \\ I_3 &= I_3' + I_3''. \end{aligned}$$

Результаты расчетов сравните с данными таблицы 1.3.

### 1.5. Выполнение работы в среде MULTISIM

1) При выполнении лабораторной работы в среде MULTISIM порядок проведения работы и содержание отчёта остаются прежними, однако сборка схем и проведение экспериментов с реальным оборудованием заменяются работой с их моделями.

При этом схеме рис.1.4 соответствует схема модели на рис.1.8,  
схеме рис.1.5 – схема модели на рис.1.9,  
схеме рис.1.6 – схема модели на рис.1.10.

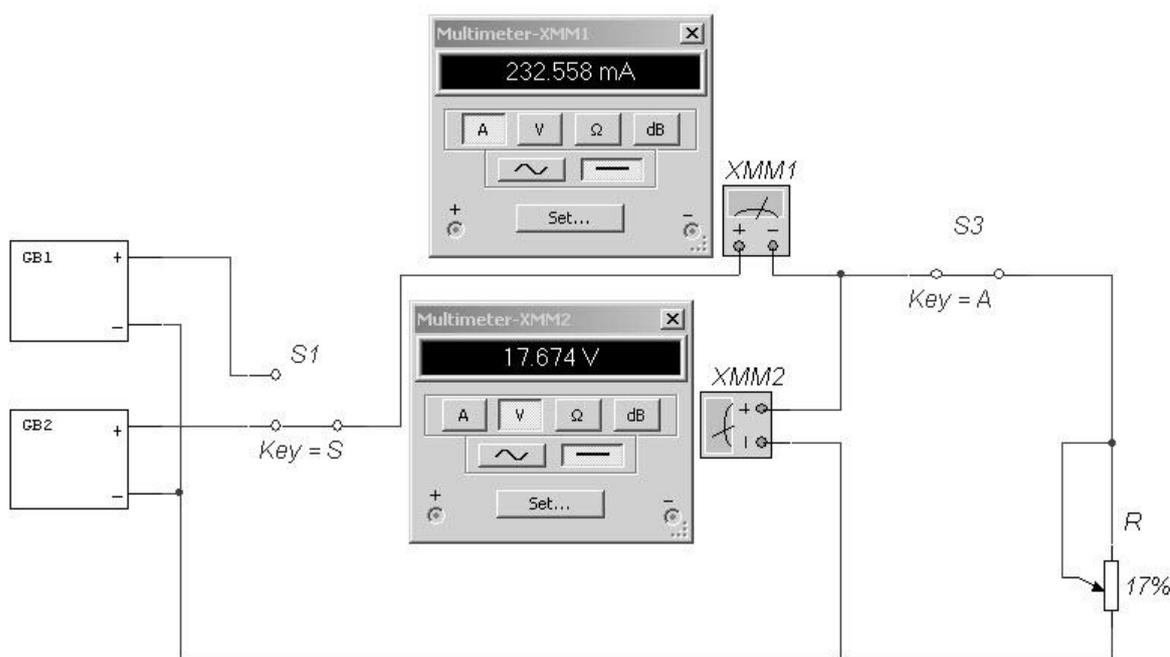


Рис 1.8

2) При выполнении пунктов задания, в которых необходимо перевести переключатель в нейтральное положение или отключить схему, следует прекратить моделирование работы схемы.

### 1.5. Содержание отчета

- 1) Наименование и цель лабораторной работы.
- 2) Электрические схемы опытов.
- 3) Перечень оборудования, используемого в работе.
- 4) Таблицы с результатами измерений и расчетов.
- 5) Расчетные формулы и примеры вычислений.
- 6) Выводы по работе.

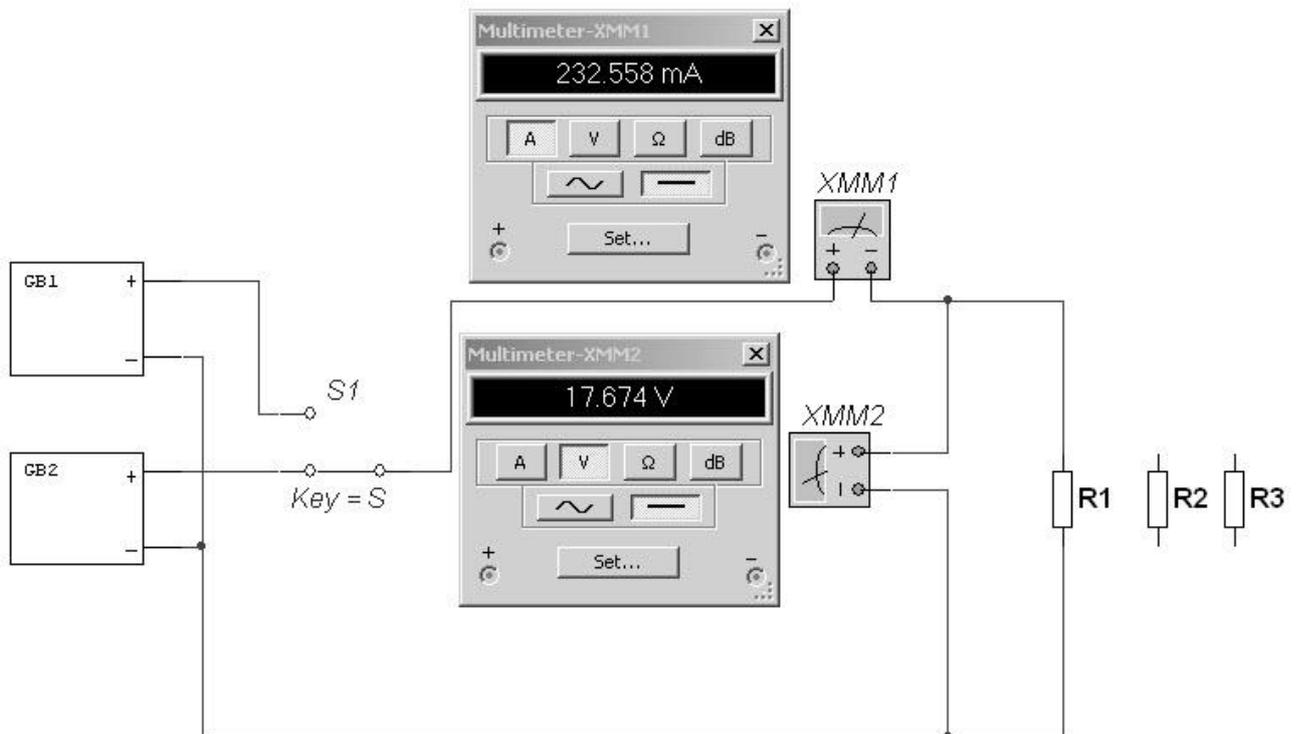


Рис 1.9

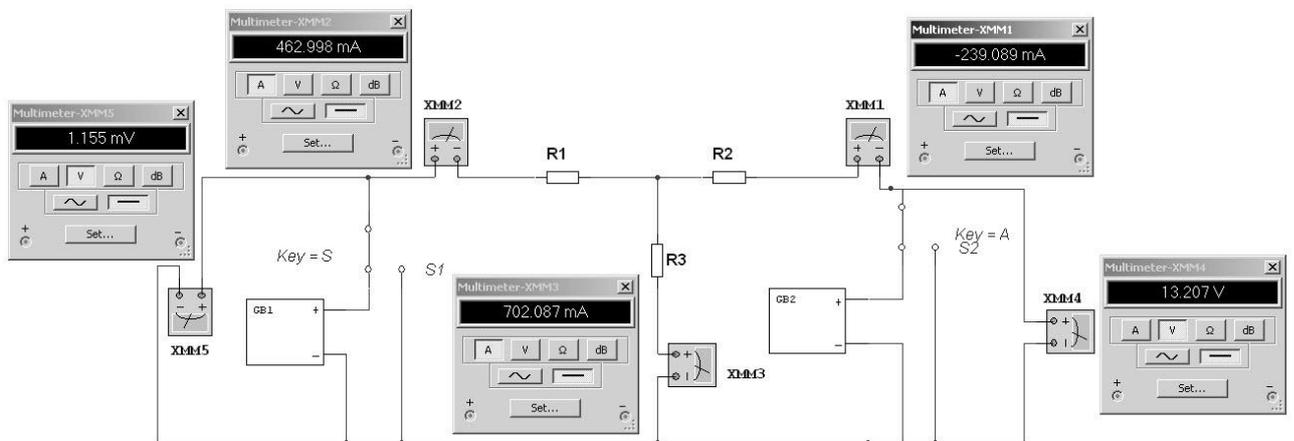


Рис.1.10

### 1.6. Контрольные вопросы

- 1) Назовите основные элементы цепей постоянного тока.
- 2) Изобразите вольт-амперные характеристики реального источника и приемника электрической энергии.
- 3) Что такое источник ЭДС и источник тока?
- 4) Как выглядят схемы замещения реального источника?
- 5) Сформулируйте законы Кирхгофа.
- 6) Сформулируйте принцип наложения. Что такое частичные токи?
- 7) Как при расчете частичных токов по методу наложения исключают из схемы источники ЭДС и источники тока?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

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

### 2.1. Основные положения

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

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi), \quad (2.1)$$

где  $i$  - мгновенное значение тока;

$I_m$  - максимальное значение тока (амплитуда);

$\omega$  - угловая частота;

$\Psi$  - начальная фаза.

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 (2.1) ставится в соответствие комплексный ток

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\Psi}, \quad (2.2)$$

где  $I$  - действующее значение синусоидального тока.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.3)$$

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 комплексных токов, напряжений и ЭДС справедливы законы Ома и Кирхгофа. В символической форме они имеют следующий вид.

Первый закон Кирхгофа:

$$\text{в узле} \quad \sum_k \dot{I}_k = 0. \quad (2.4)$$

Второй закон Кирхгофа:

$$\text{в контуре} \quad \sum_k \dot{E}_k = \sum_k \dot{U}_k. \quad (2.5)$$

$$\text{Закон Ома:} \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \dot{U} \cdot Y, \quad (2.6)$$

где  $Z$ ,  $Y$  - комплексные сопротивление и проводимость.

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

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = z \cdot e^{j\varphi}, \quad (2.7)$$

где  $R$  - активное сопротивление, Ом;

$L$  - индуктивность, Гн;

$C$  - емкость, Ф;

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

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

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 схемы с последовательным подключением элементов (рис. 2.1) представлен на рис. 2.2.

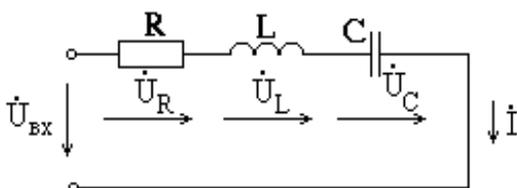


Рис. 2.1

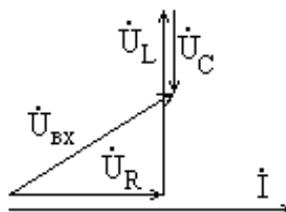


Рис. 2.2

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:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (2.8)$$

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.

## 2.2. Описание лабораторной установки

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

### 2.3. Рабочее задание

1) Исследовать фазовый сдвиг между напряжением и током в цепи, содержащей активное сопротивление, индуктивную катушку, конденсатор и источник синусоидальной ЭДС.

2) Определить экспериментально с помощью вольтметра, амперметра и ваттметра параметры исследуемых элементов:

активное сопротивление реостата  $R_p$ ;

активное  $R_k$  и индуктивное  $X_k$  сопротивления катушки;

емкостное сопротивление конденсатора  $X_C$ .

3) Проверить закон Ома в цепи с последовательно соединёнными реостатом, индуктивной катушкой и конденсатором с известными параметрами.

В этой же цепи проверить второй закон Кирхгофа построением векторной диаграммы напряжений по измеренным напряжениям на входе цепи и её элементах.

Изменяя ёмкость в последовательной цепи, исследовать изменение тока и напряжений.

4) В цепи с параллельно соединёнными катушкой и конденсатором проверить первый закон Кирхгофа, построив векторную диаграмму токов. Изменяя ёмкость, исследовать изменение токов.

### 2.4. Порядок проведения лабораторной работы.

1) Для исследования формы тока, напряжения и фазового сдвига соберите схему рис. 2.3. После проверки схемы преподавателем подключите ее к источнику, зарисуйте осциллограммы тока и напряжения на резисторе. Отключите схему.

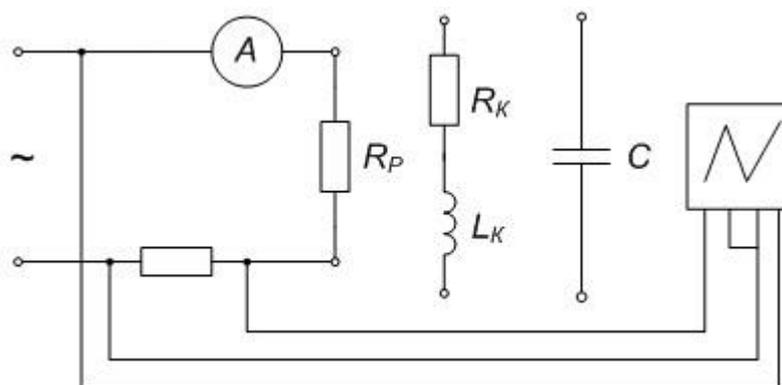


Рис. 2.3

Выполните ту же операцию, заменив резистор индуктивной катушкой, а затем конденсатором.

2) Для измерения параметров различных по характеру сопротивлений соберите схему рис. 2.4. После проверки схемы преподавателем подключите ее к источнику, запишите показания амперметра, вольтметра и ваттметра в таблицу. Отключите схему.

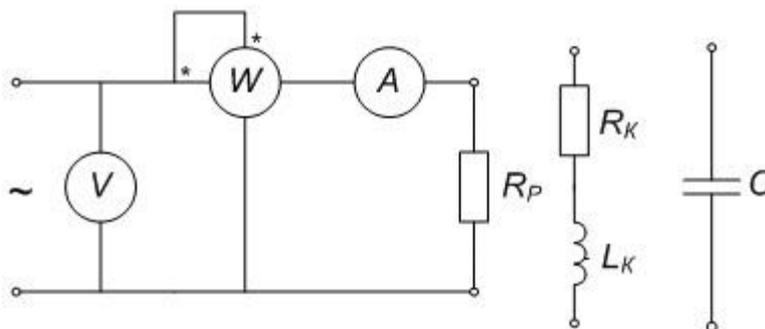


Рис. 2.4

Таблица 2.1

Резистор				Инд. катушка					Конденсатор			
Измерено			Расчет	Измерено			Расчет		Измерено			Расчет
$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$R_P, Ом$	$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$R_K, Ом$	$X_L, Ом$	$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$X_C, Ом$

Выполните ту же операцию, заменив резистор индуктивной катушкой, а затем конденсатором.

По данным измерений рассчитайте активные и реактивные сопротивления. Результаты занесите в таблицу 2.1.

Расчётные формулы:

$$z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad X = \sqrt{z^2 - R^2}; \quad (2.9)$$

3) Для проверки закона Ома, второго закона Кирхгофа и исследования изменения тока и напряжения при изменении емкости конденсатора соберите последовательную цепь, представленную на рис 2.5.

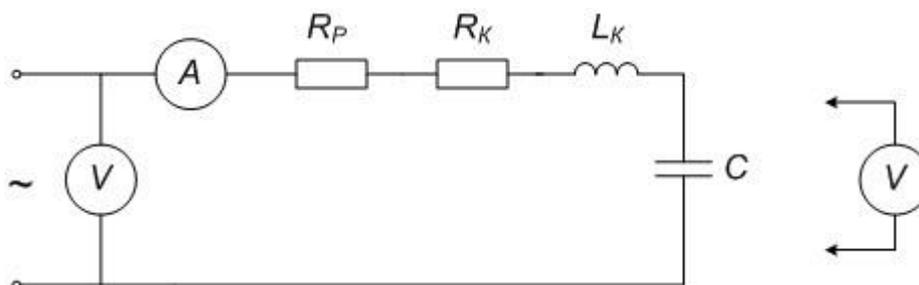


Рис. 2.5

После проверки схемы преподавателем подключите ее к источнику и, изменяя емкость конденсатора, найдите максимум тока. Запишите показания амперметра и вольтметра (для каждого из элементов) в таблицу 2.2. Выполните ту же операцию для большего и меньшего значения емкости. Отключите схему.

Постройте векторные диаграммы для каждого из опытов.

Для всех опытов проверьте выполнение закона Ома и второго закона Кирхгофа.

Таблица 2.2.

Измерено					Примечание
$U_{вх}, В$	$I_{вх}, А$	$U_R, В$	$U_L, В$	$U_C, В$	

4) Для исследования параллельной цепи соберите схему, представленную на рис. 2.6.

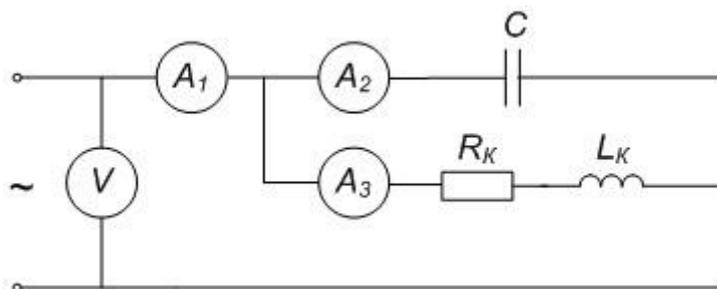


Рис. 2.6.

После проверки схемы преподавателем подключите ее к источнику и, изменяя емкость конденсатора, найдите минимум входного тока. Запишите показания амперметров в таблицу 2.3.

Выполните ту же операцию для большего и меньшего значения емкости. Отключите схему.

Постройте векторные диаграммы для каждого из опытов.

Проверьте для всех опытов выполнение первого закона Кирхгофа.

Таблица 2.3

Измерено				Примечание
$U_{вх}, В$	$I_{вх}, А$	$I_C, А$	$I_L, А$	

## 2.5. Выполнение работы в среде MULTISIM

1) При выполнении лабораторной работы в среде MULTISIM порядок проведения работы и содержание отчёта остаются прежними, однако сборка схем и проведение экспериментов с реальным оборудованием заменяются работой с их моделями.

При этом схеме рис.2.3 соответствует схема модели на рис.2.7,  
схеме рис.2.4 – схема модели на рис.2.8,  
схеме рис.2.5 – схема модели на рис.2.9,  
схеме рис.2.6 – схема модели на рис.2.10.

2) При выполнении пунктов задания, в которых необходимо перевести переключатель в нейтральное положение или отключить схему, следует прекратить моделирование работы схемы.

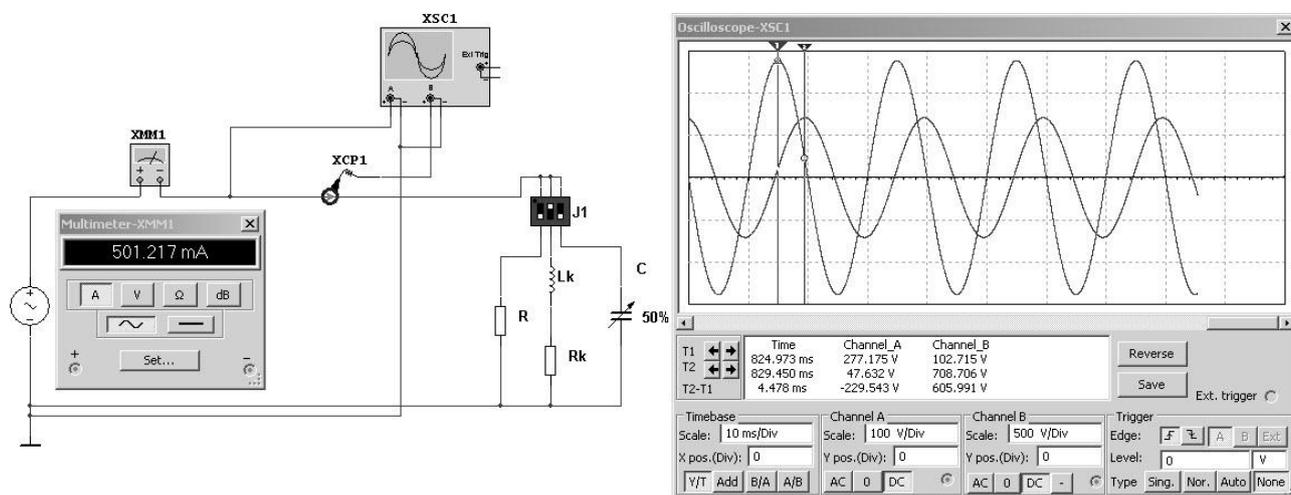


Рис. 2.7

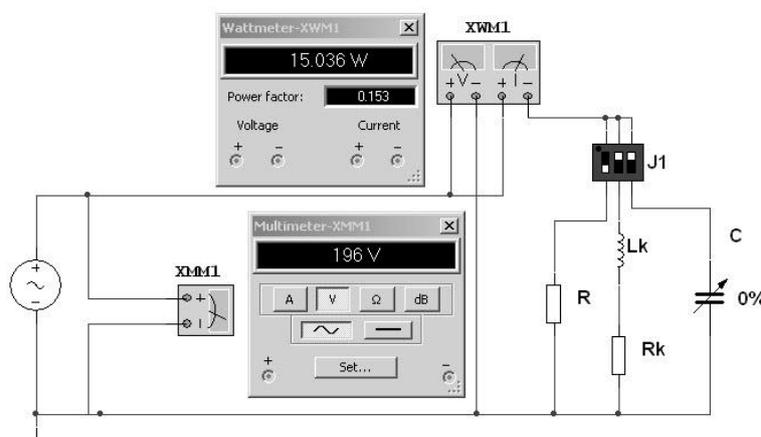


Рис. 2.8

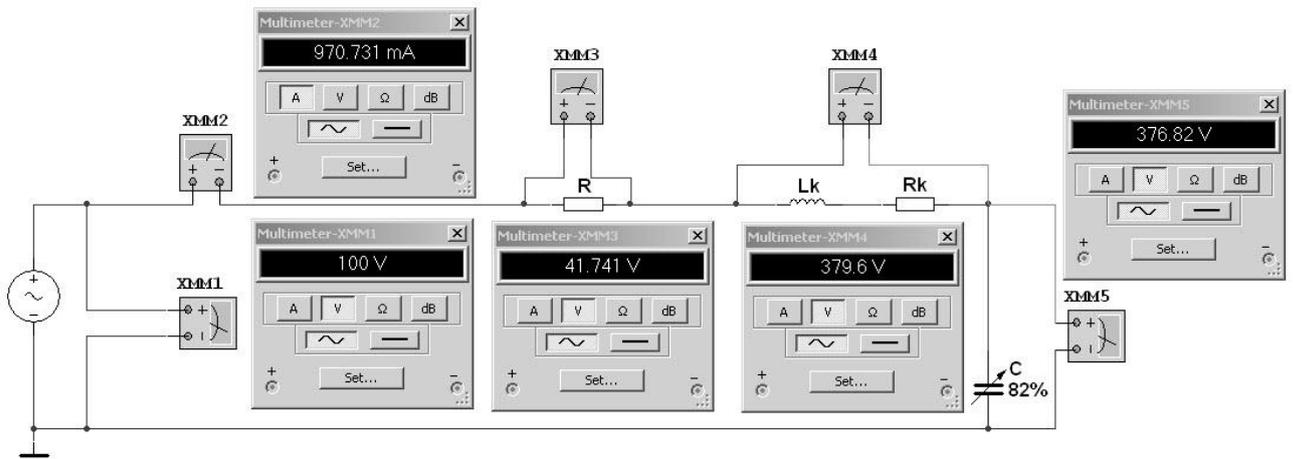


Рис. 2.9

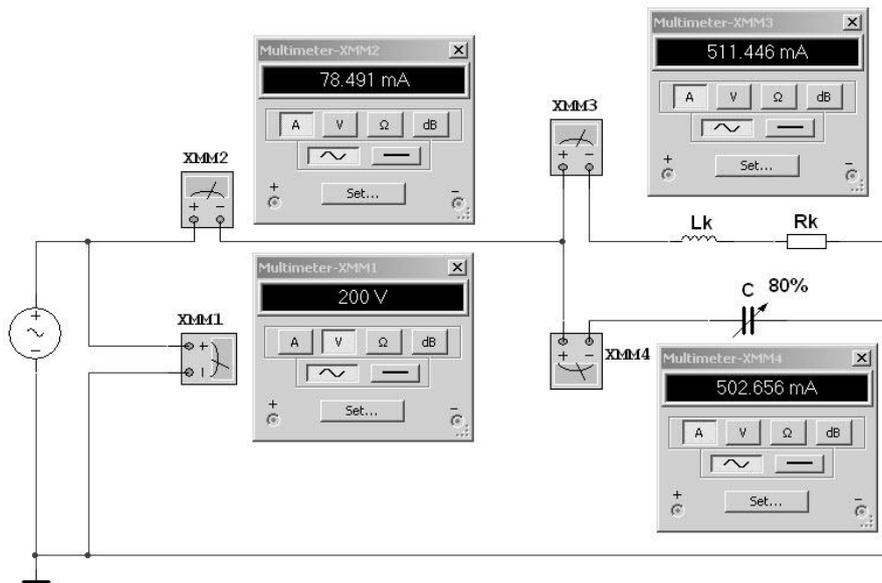


Рис. 2.10

## 2.6. Содержание отчета

- 1) Наименование и цель работы.
- 2) Электрические схемы опытов.
- 3) Перечень оборудования, используемого в работе.
- 4) Таблицы результатов измерений и вычислений.
- 5) Расчетные формулы и примеры вычислений.
- 6) Осциллограммы, векторные диаграммы токов и напряжений.
- 7) Выводы по работе.

## 2.7. Контрольные вопросы

- 1) Что называется мгновенным значением синусоидального тока?
- 2) Изобразите график зависимости синусоидального тока от времени. Укажите на графике амплитуду тока, период, начальную фазу. Как связаны период, частота и угловая частота?
- 3) Что называется действующим значением синусоидального тока? Как оно связано с амплитудой?
- 4) Каков сдвиг фаз между напряжением и током на резисторе, идеальной катушке индуктивности, конденсаторе?
- 5) Изобразите схему замещения реальной катушки индуктивности. Как определить сдвиг фаз между напряжением и током в ней?
- 6) Как определить сдвиг фаз между током и напряжением в последовательной цепи?
- 7) Что такое комплексный ток и напряжение? Сформулируйте законы Кирхгофа в символической форме.
- 8) Что такое комплексное сопротивление? Как его определить по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра?
- 9) Что такое векторная диаграмма?
- 10) Постройте векторную диаграмму напряжений для последовательной цепи, содержащей  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Объясните, почему зависимость  $I_{\text{ex}}(X_c)$  имеет максимум?
- 11) Постройте векторную диаграмму токов для параллельного контура. Объясните, почему зависимость  $I_{\text{ex}}(X_c)$  имеет минимум?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ СОЕДИНЕНИЯ НАГРУЗКИ

**Цель работы:** экспериментальное определение соотношений между фазными и линейными токами и напряжениями при различных видах нагрузки и способах ее подключения; построение векторных диаграмм токов и напряжений для трехфазных цепей.

### 3.1. Основные положения

*Симметричная трёхфазная система ЭДС* – это совокупность трех синусоидальных источников ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$ , или  $2\pi/3$ . Принято считать, что у ЭДС фазы *A* начальная фаза равна  $0^\circ$ , фаза *B* отстает на  $120^\circ$  от фазы *A*, фаза *C* опережает фазу *A* на  $120^\circ$ .

Таким образом выражения для мгновенных значений ЭДС *симметричного трёхфазного источника* записываются следующим образом:

$$e_A(t) = E_m \sin(\omega t); e_B(t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); e_C(t) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (3.1)$$

где  $E_m$  - амплитудное значение ЭДС,

$\omega$  - угловая частота.

Выражения для комплексных ЭДС выглядят так:

$$\dot{E}_A = Ee^{j0} = E; \dot{E}_B = Ee^{-j\frac{2\pi}{3}}; \dot{E}_C = Ee^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad (3.2)$$

где  $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$  - действующее значение ЭДС.

На рис. 3.1 и 3.2 изображены соответственно график мгновенных значений ЭДС фаз и векторы комплексных ЭДС и линейных напряжений.

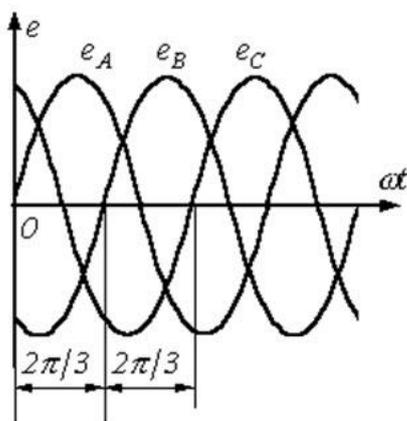


Рис. 3.1

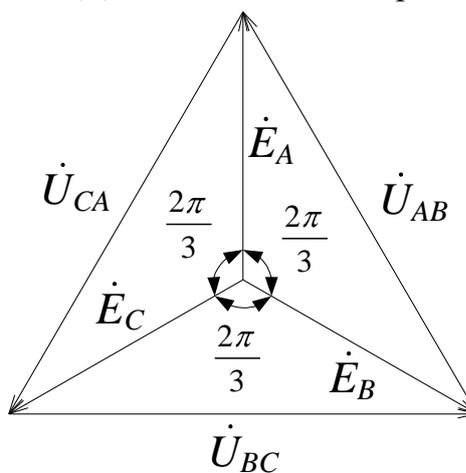


Рис. 3.2

Трёхфазную систему ЭДС получают от трёхфазного генератора. Совокупность трёхфазной системы ЭДС, трёхфазной нагрузки и соединительных проводов образует *трёхфазную цепь*.

Генератор и нагрузка в трёхфазных цепях могут соединяться двумя способами: *звездой* и *треугольником*.

*Звездой* называют такое соединение, когда концы фаз генератора или нагрузки соединяют в одну общую точку, называемую *нейтралью*, или *нулем*.

*Треугольником* называют такое соединение, когда конец первой фазы соединяется с началом второй фазы, конец второй фазы с началом третьей, а конец третьей фазы - с началом первой.

Особенностью соединения *звезда-звезда* является наличие или отсутствие *нулевого провода*, соединяющего *нейтраль* генератора и нагрузки.

Словом *фаза* в трёхфазных цепях называют каждую из трех обмоток генератора (*фаза источника*), в которых возникают соответствующие ЭДС, а также каждое из трех сопротивлений приемника (*фаза нагрузки*).

Начала фаз обозначают *A, B, C*. *Нейтраль* генератора обозначают *O*, нагрузки – *O'*, таким образом, провод *OO'* – *нулевой провод*.

Провода, соединяющие начала фаз генератора и нагрузки, называются *линейными проводами*.

*Фазное напряжение* – напряжение на *фазе*. Таким образом, говорят о фазных напряжениях генератора (источника) ( $\dot{U}_{AO}, \dot{U}_{BO}, \dot{U}_{CO}$ ), равных ЭДС генератора ( $\dot{U}_{AO} = \dot{E}_A, \dot{U}_{BO} = \dot{E}_B, \dot{U}_{CO} = \dot{E}_C, U_{\dot{O}} = E$ ), и фазных напряжениях нагрузки ( $\dot{U}_{AO'}, \dot{U}_{BO'}, \dot{U}_{CO'}$  для *звезды* или  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  для *треугольника*).

*Линейное напряжение* – напряжение между двумя линейными проводами ( $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ ).

При соединении *источника звездой* линейные напряжения находятся по второму закону Кирхгофа в комплексной форме:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A. \quad (3.3)$$

Причём, если источник симметричный, то:

$$\dot{U}_{AB} = U_E e^{j30^\circ}; \dot{U}_{BC} = U_E e^{-j90^\circ}; \dot{U}_{CA} = U_E e^{j150^\circ}; U_E = \sqrt{3}U_{\dot{O}}. \quad (3.4)$$

При соединении *источника треугольником* между линейными проводами включены ЭДС, а значит можно записать, что  $U_E = U_{\dot{O}}$ .

*Фазный ток* – ток, протекающий по фазе ( $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  для *звезды*, или  $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$  для *треугольника*).

*Линейный ток* – ток, протекающий в линейном проводе ( $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ ).

*Ток нулевого провода* – ток, протекающий в нулевом проводе ( $\dot{I}_O$ ).

*Напряжение смещения нейтрали* – напряжение между нейтралью генератора и нагрузки ( $\dot{U}_{OO'}$ ).

Нагрузку называют *симметричной* в случае если:

$Z_A = Z_B = Z_C$  для звезды или  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$  для треугольника, где  $Z$  – комплексное сопротивление фазы нагрузки (приёмника).

Будем называть симметричной трехфазную цепь, где и источник, и нагрузка симметричны.

Порядок расчета токов трехфазной цепи определяется схемой соединения.

На рис. 3.3 и рис. 3.4 изображены соединения типа звезда - звезда и звезда - треугольник.

При соединении звезда-звезда с нулевым проводом (рис. 3.3, а) очевидно, что линейный и фазный токи – это одно и то же (записывается  $I_{\dot{E}} = I_{\dot{O}}$ ), также из-за наличия нулевого провода комплексные потенциалы нейтралей источника и приемника равны, следовательно, фазное напряжение нагрузки равно фазному напряжению генератора.

$$\dot{U}_{AO'} = \dot{U}_{AO} = \dot{E}_A; \dot{U}_{BO'} = \dot{U}_{BO} = \dot{E}_B; \dot{U}_{CO'} = \dot{U}_{CO} = \dot{E}_C. \quad (3.5)$$

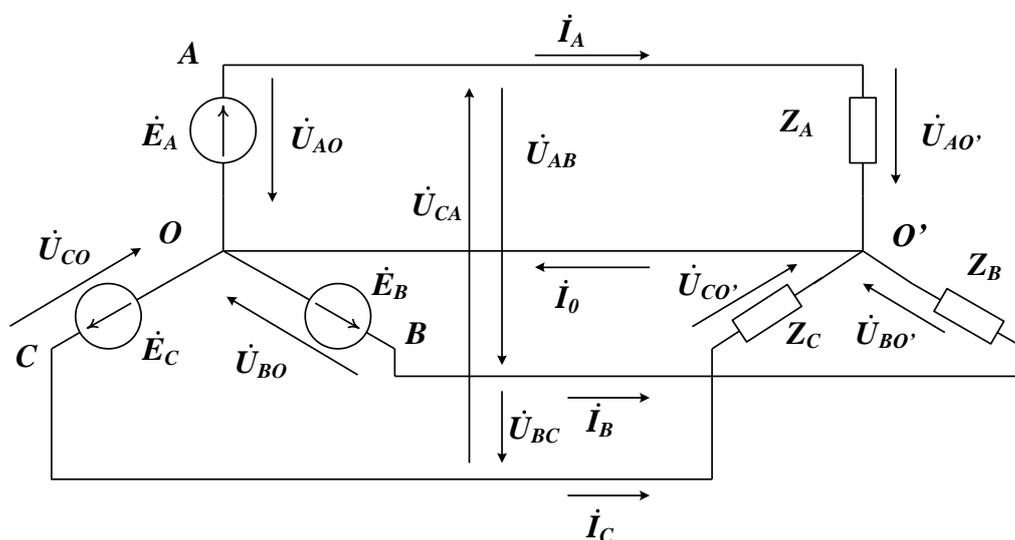


Рис. 3.3, а

Комплексные токи  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  находятся по закону Ома в комплексной форме:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A}; \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{Z_B}; \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{Z_C}. \quad (3.6)$$

Ток в нулевом проводе – по первому закону Кирхгофа в комплексной форме:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (3.7)$$

При симметричной цепи получаются следующие выражения:

$$U_{\dot{O}} = E; I_{\dot{E}} = I_{\dot{O}} = \frac{E}{z} = \frac{U_{\dot{O}}}{z}; I_0 = 0, \text{ где } z \text{ – полное сопротивление фазы.} \quad (3.8)$$

При соединении звезда-звезда без нулевого провода (рис. 3.3, б) потенциалы нейтралей источника и приемника **не** равны, следовательно, фазное напряжение нагрузки **не** равно фазному напряжению генератора.

Его находят, применив второй закон Кирхгофа в комплексной форме для контура, содержащего *фазное напряжение* генератора, *фазное напряжение* нагрузки и *напряжение смещения нейтрали*:

$$\dot{U}_{AO'} = \dot{U}_{AO} - \dot{U}_{O'O'} ; \dot{U}_{BO'} = \dot{U}_{BO} - \dot{U}_{O'O'} ; \dot{U}_{CO'} = \dot{U}_{CO} - \dot{U}_{O'O'} . \quad (3.9)$$

*Напряжение смещения нейтрали* рассчитывается путем применения метода двух узлов (нейтрали генератора и нагрузки  $O$  и  $O'$ ):

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} , Y = \frac{1}{Z} . \quad (3.10)$$

Токи находятся так:

$$\dot{i}_A = \frac{\dot{U}_{AO'}}{Z_A} ; \dot{i}_B = \frac{\dot{U}_{BO'}}{Z_B} ; \dot{i}_C = \frac{\dot{U}_{CO'}}{Z_C} ; \dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C = 0 \quad (3.11)$$

При симметричной цепи  $\dot{U}_{O'O} = 0$  из чего следует, что *звезда-звезда без нулевого провода* ведёт себя также как и *звезда-звезда с нулевым проводом*.

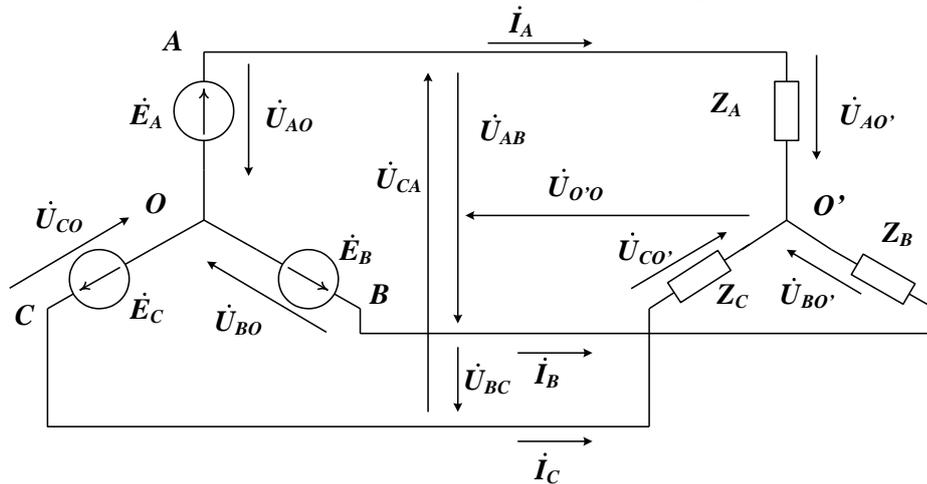


Рис. 3.3, б

При соединении *звезда-треугольник* (рис. 3.4) фазные токи нагрузки находят из закона Ома в комплексной форме (к фазе нагрузки приложено *линейное* напряжение). После этого линейные токи находятся по первому закону Кирхгофа.

$$\dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} ; \dot{i}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} ; \dot{i}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} ;$$

$$\dot{i}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA} ; \dot{i}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB} ; \dot{i}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC} . \quad (3.12)$$

Для симметричной цепи модули соответствующих токов:

$$I_{\dot{O}} = \frac{U_{\dot{E}}}{Z} ; I_{\dot{E}} = \sqrt{3} I_{\dot{O}} . \quad (3.13)$$

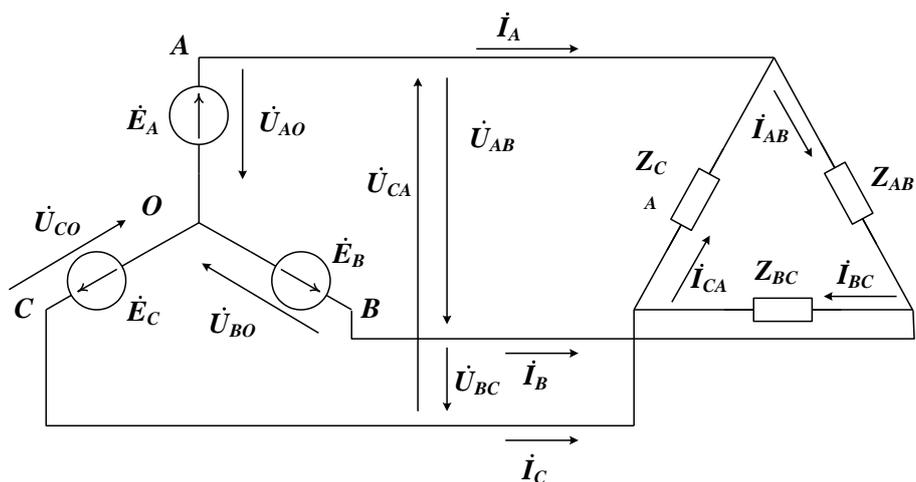


Рис. 3.4

Указания к построению векторных диаграмм:

Строя векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости, надо помнить, что положительное направление оси действительных чисел направлено по оси ординат вверх, поэтому вектор  $\dot{E}_A$  комплексной ЭДС фазы А с нулевой начальной фазой также направлен вверх.

Построение векторных диаграмм напряжений по экспериментальным данным следует начинать с треугольника линейных напряжений. Для этого, выбрав масштаб напряжений, отложить отрезок, соответствующий  $U_{BC}$  (см. рис.3.5).

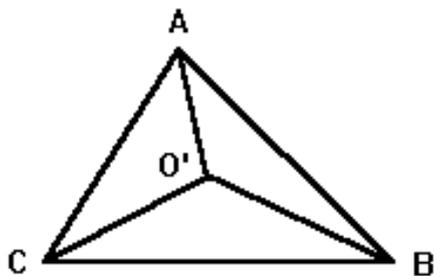


Рис. 3.5

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. 3.2, получим треугольник длин векторов *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 О'. Соединив О' 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 векторы *фазных* токов на комплексной 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.

### 3.2 Описание лабораторной установки

В работе используется источник трехфазного напряжения с нулевым проводом, амперметры, вольтметры, набор резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности для создания нагрузки активного, реактивного и активно-реактивного характера.

### 3.3 Рабочее задание

1) Определить соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении нагрузки *звездой с нулевым проводом* (четырёхпроводная цепь).

2) Определить соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении нагрузки *звездой без нулевого провода* (трехпроводная цепь).

3) Определить соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении нагрузки *треугольником*.

4) Построить векторные диаграммы токов и напряжений по результатам всех опытов.

### 3.4 Порядок проведения лабораторной работы

1) Для определения соотношений между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении нагрузки *звездой с нулевым проводом* (четырёхпроводная цепь) соберите схему, изображенную на рис. 3.6. После проверки схемы преподавателем подключите ее к источнику трехфазного напряжения.

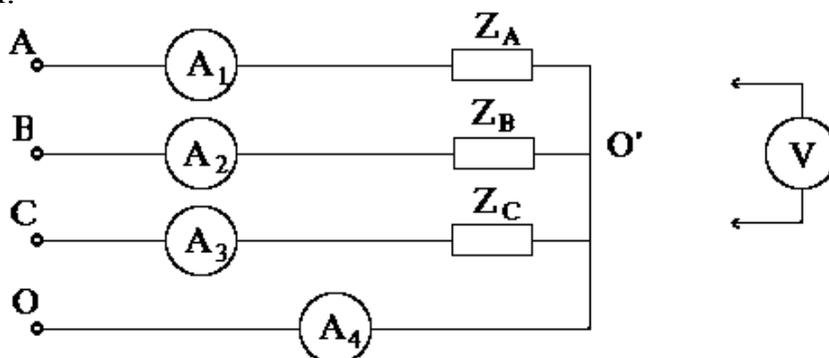


Рис. 3.6

а) Установите в каждой фазе одинаковые активные сопротивления. Измерьте вольтметром фазные и линейные напряжения. Снимите показания всех амперметров. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

б) В той же схеме изменяйте сопротивление в фазе А в соответствии с указаниями преподавателя. Показания приборов занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_{AO}, В$	$U_{BO}, В$	$U_{CO}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_0, А$	Примечание
а)											
б)											

2) Для определения соотношений между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении нагрузки *звездой без нулевого провода* (трёхпроводная цепь) соберите схему, изображенную на рис. 3.7.

После проверки схемы преподавателем подключите ее к источнику трехфазного напряжения.

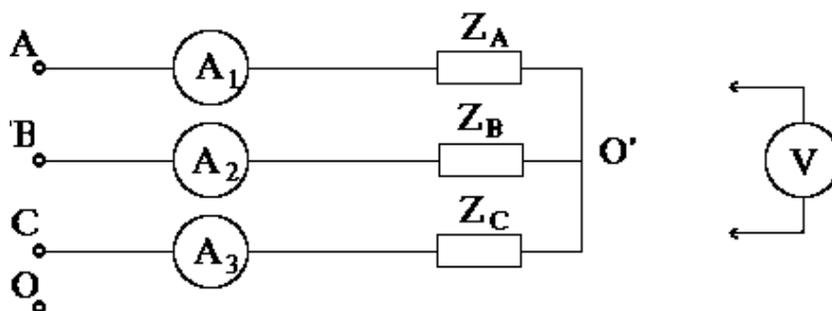


Рис. 3.7

Опыты выполняются так же, как в пункте 1). При изменении активного сопротивления в фазе А допускается его уменьшение до нуля (короткое замыкание в фазе А). Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.

3) Для определения соотношений между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении нагрузки *треугольником* соберите схему, изображенную на рис. 3.8. После проверки схемы преподавателем подключите ее к источнику трехфазного напряжения.

а) Установите в фазах активную симметричную нагрузку. Снимите показания приборов, результаты занесите в таблицу 3.3.

б) В той же схеме изменяйте сопротивление в фазе АВ в соответствии с указаниями преподавателя. Результаты измерений занесите в таблицу 3.3.

в) Установив предварительно симметричную нагрузку в фазах, отключите затем один из линейных проводов. Проведите измерения всех токов и напряжений, результаты занесите в таблицу 3.3.

Таблица 3.2

	$U_{AB,B}$	$U_{BC,B}$	$U_{CA,B}$	$U_{AO',B}$	$U_{BO',B}$	$U_{CO',B}$	$U_{OO',B}$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	Примечание
а)											
б)											

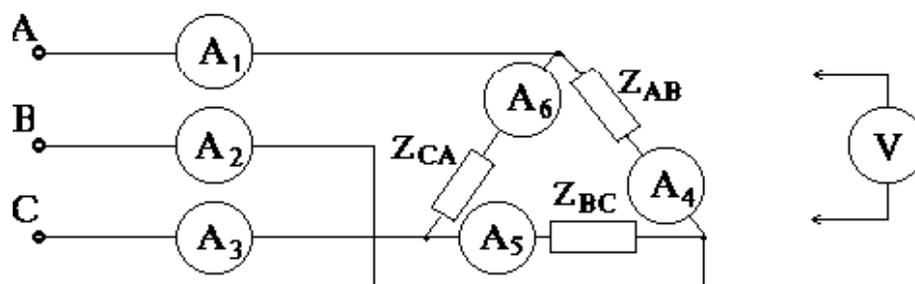


Рис.3.8

Таблица 3.3

	$U_{AB,B}$	$U_{BC,B}$	$U_{CA,B}$	$I_{AB,A}$	$I_{BC,A}$	$I_{CA,A}$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	Примечание
а)										
б)										
в)										

4) Постройте векторные диаграммы токов и напряжений для всех режимов.  
Примечание. Масштаб выбирать одинаковый для всех диаграмм.

### 3.5. Выполнение работы в среде MULTISIM

1) При выполнении лабораторной работы в среде MULTISIM порядок проведения работы и содержание отчёта остаются прежними, однако сборка схем и проведение экспериментов с реальным оборудованием заменяются работой с их моделями.

При этом схеме рис.3.6 соответствует схема модели на рис.3.9,  
схеме рис.3.7 – схема модели на рис.3.10,  
схеме рис.3.8 – схема модели на рис.3.11.

2) При выполнении пунктов задания, в которых необходимо перевести переключатель в нейтральное положение или отключить схему, следует прекратить моделирование работы схемы.

### 3.6. Содержание отчета

- 1) Название и цель работы.
- 2) Электрические схемы опытов.
- 3) Таблицы результатов измерений.
- 4) Расчетные формулы и примеры вычислений.
- 5) Векторные диаграммы токов и напряжений.
- 6) Выводы по работе.

### 3.7. Контрольные вопросы

- 1) Что такое симметричная трехфазная система ЭДС?
- 2) Какие существуют способы соединения нагрузок в трехфазных цепях?
- 3) Назовите условия, при которых нагрузка трехфазной цепи считается симметричной, равномерной, однородной.
- 4) Запишите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при симметричной нагрузке в случае соединения *звездой* и *треугольником*.
- 5) Каково назначение нейтрального провода в трехфазной системе при соединении *звезда – звезда*?
- 6) Как определить величину тока в нулевом проводе?
- 7) Запишите выражение для определения напряжения между нейтралью источника и приемника.
- 8) Как определить комплексные значения фазных напряжений и токов в трехфазной цепи при симметричной системе линейных напряжений и несимметричной нагрузке фаз приемника?
- 9) Как найти линейные напряжения при известных ЭДС источника?

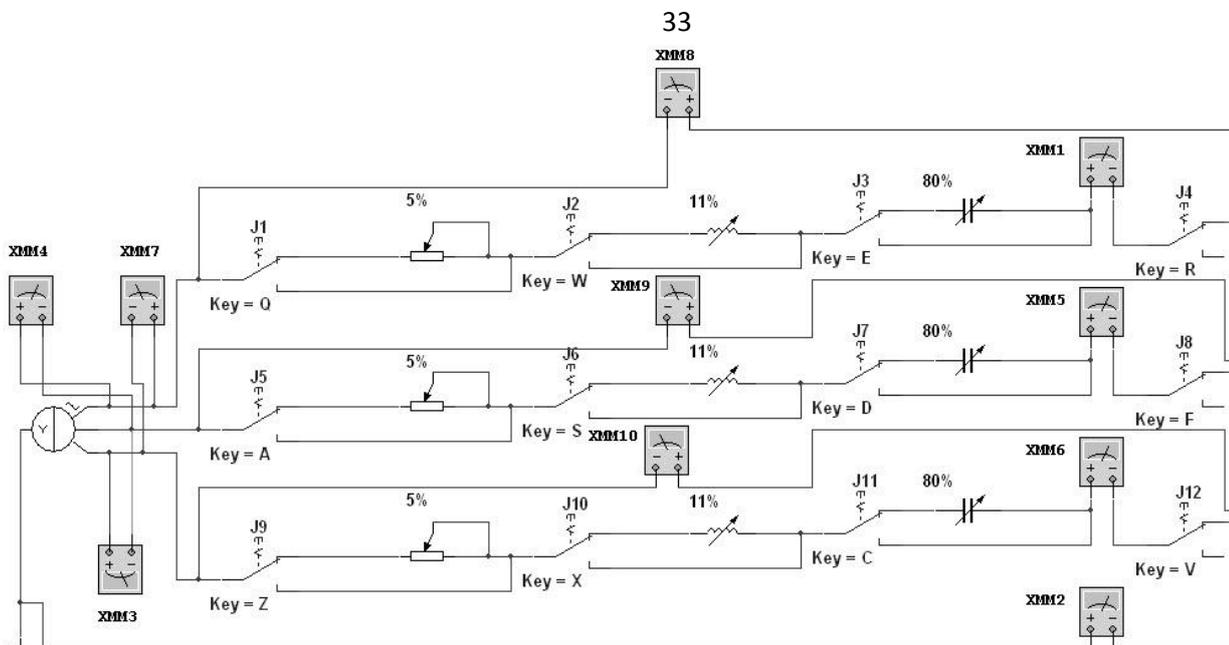


Рис. 3.9

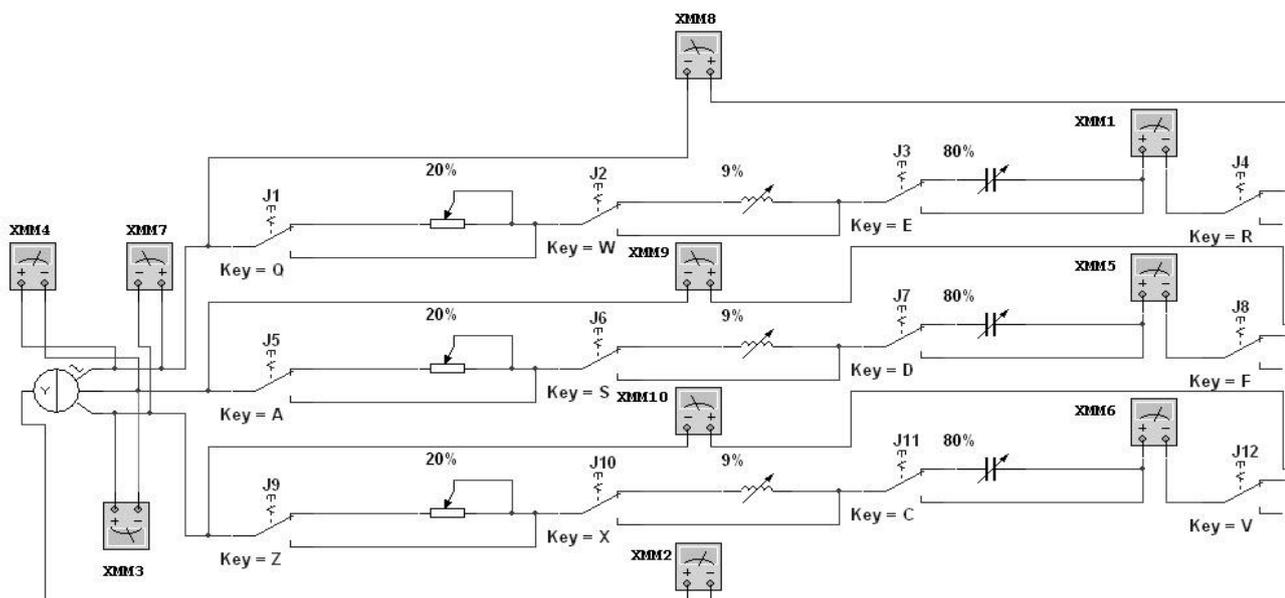


Рис 3.10

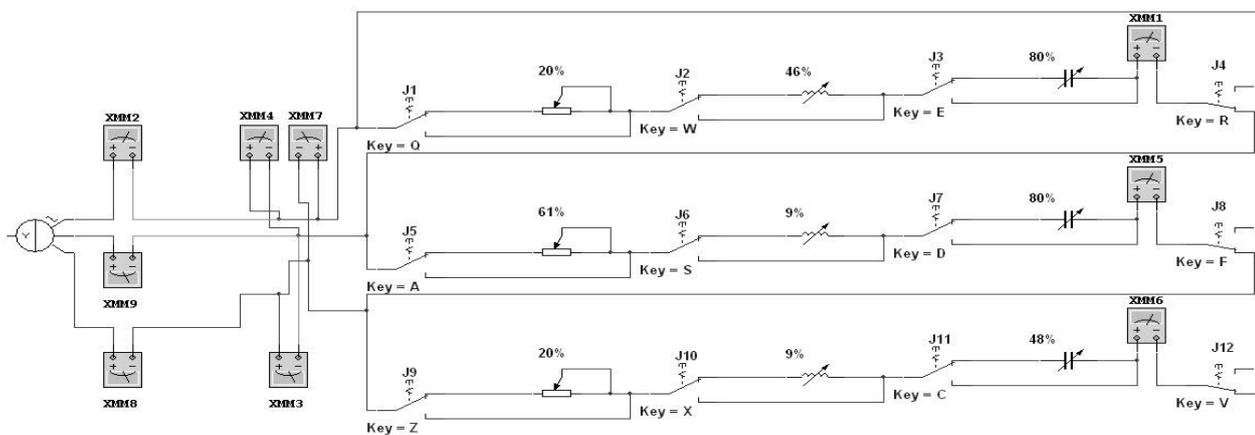


Рис 3.11

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы:** изучение конструкции, принципа действия и свойств однофазного трансформатора, снятие его основных характеристик.

### 4.1 Основные положения

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, имеющий две (или более) индуктивно связанные обмотки, предназначенный для преобразования электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения при неизменной частоте. В трансформаторе передача энергии из первичной обмотки во вторичную осуществляется, как и во всех электрических машинах, посредством магнитного поля. Трансформаторы делятся на однофазные, трехфазные и многофазные. Все соотношения, полученные для однофазных трансформаторов, полностью применимы к каждой фазе трехфазного трансформатора.

Основные свойства трансформатора описываются *характеристиками холостого хода, короткого замыкания, внешней и рабочими*. Также большое значение для исследования трансформатора имеет *схема замещения*, представляющая собой электрическую схему (модель), в которой учтены все процессы, происходящие в реальном электромагнитном устройстве – трансформаторе.

Для получения *схемы замещения* (рис. 4.1) используется приведение вторичной обмотки трансформатора с числом витков  $w_2$  к первичной с числом витков  $w_2' = w_1$  с сохранением энергетических соотношений.

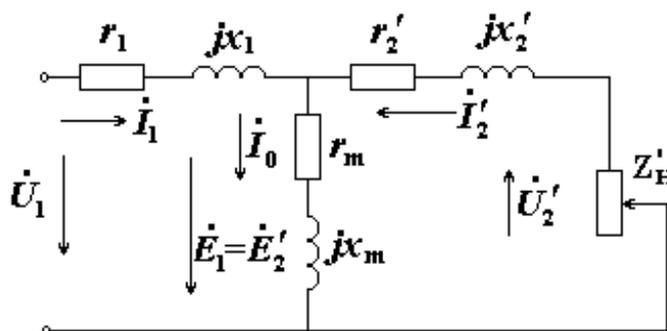


Рис.4.1. Схема замещения трансформатора

Основные уравнения приведенного трансформатора имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot Z_1, \\
 \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' \cdot Z_2', \\
 \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2').
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

*Параметры* (комплексные сопротивления) *схемы замещения* могут быть определены из *опытов холостого хода и короткого замыкания*.

*Опыт холостого хода* проводится при разомкнутой вторичной обмотке ( $Z_H = \infty$ ). При этом по первичной обмотке протекает *ток холостого хода*  $I_1 = I_0$ . По сравнению с *номинальным током*  $I_{1ном}$  первичной обмотки *ток холостого хода* обычно составляет  $I_0 = (0,05...0,1) \cdot I_{1ном}$ . Для маломощных однофазных трансформаторов это соотношение может быть  $I_0 \leq 0,35 \cdot I_{1ном}$ .

*Коэффициент трансформации*  $K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$  может быть определен с достаточной для практики точностью по показаниям вольтметров на зажимах первичной и вторичной обмоток, так как падение напряжения в первичной обмотке  $\dot{I}_0 \cdot (r_1 + jx_1)$ , вызванное *током холостого хода*, пренебрежимо мало, то есть  $U_{1ном} \approx E_1$  (где  $U_{1ном}$  – *номинальное первичное напряжение*), а напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе  $U_{20} = E_2$ :

$$K \approx \frac{U_{1ном}}{U_{20}} \quad (4.2)$$

Комплексное сопротивление схемы замещения при *холостом ходе* равно:

$$Z_{10} = Z_1 + Z_m = \frac{\dot{U}_{1ном}}{\dot{I}_0} = (r_1 + jx_1) + (r_m + jx_m) = (r_1 + r_m) + j(x_1 + x_m) = r_{10} + jx_{10} \quad (4.3)$$

Мощность, потребляемая трансформатором при *холостом ходе*,  $P_{10} = U_{10} \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 = U_{10} \cdot I_{0a}$  (где  $I_{0a}$  – активная составляющая *тока холостого хода*), расходуется на покрытие потерь в меди первичной обмотки (*электрических потерь* первичной обмотки  $\Delta P_{эл10}$ ) и потерь в стали трансформатора (*магнитных потерь*  $\Delta P_{мг}$ ):

$$P_{10} = \Delta P_{эл10} + \Delta P_{мг} \quad (4.4)$$

Электрические потери первичной обмотки при холостом ходе незначительны, поэтому можно считать, что практически вся потребляемая трансформатором мощность идет на покрытие потерь в стали:

$$P_{10} \approx \Delta P_{мг} = \Delta P_{г} + \Delta P_{вт} + \Delta P_{д}, \quad (4.5)$$

где  $\Delta P_{г}$  – потери на гистерезис;

$\Delta P_{вт}$  – потери на вихревые токи;

$\Delta P_{д}$  – добавочные потери, возникающие в местах стыков, шпильках и др.

*Опыт короткого замыкания* проводится при пониженном напряжении  $U_{кн}$ , при котором по обмоткам трансформатора протекают *номинальные токи*  $I_{1к} = I_{2к}' = I_{кн}$ . В этом состоит его отличие от *эксплуатационного короткого*

замыкания, возникающего случайно при номинальном первичном напряжении и являющегося аварийным режимом, так как токи при этом в (10...20) раз превышают номинальные

*Напряжение короткого замыкания*, выраженное в процентах

$$u_{кн} \% = \frac{U_{кн}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{I_{кн} \cdot Z_{к}}{U_{ном}} \cdot 100 \% \quad (4.6)$$

Обычно для авиационных трансформаторов  $u_{кн} \% = (4...10)\%$ . При этом также мал *основной магнитный поток* трансформатора  $\Phi$ , практически пропорциональный напряжению  $U_{кн}$ . Поэтому *током намагничивающего контура* схемы замещения  $I_0$  в режиме короткого замыкания можно пренебречь.

Комплексное сопротивление короткого замыкания

$$Z_{к} = Z_1 + Z_2 = \frac{\dot{U}_{кн}}{I_{кн}} = (r_1 + jx_1) + (r_2' + jx_2') = (r_1 + r_2') + j(x_1 + x_2') = r_{к} + jx_{к} \quad (4.7)$$

Мощность, потребляемая трансформатором в *опыте короткого замыкания*, расходуется на покрытие *электрических потерь* в первичной и вторичной обмотках. Мощность, соответствующая *номинальным токам* при рабочей температуре обмоток, называется *номинальными потерями короткого замыкания*

$$P_{кн} = \Delta P_{эл} = I_{кн}^2 \cdot r_{к}. \quad (4.8)$$

*Напряжение короткого замыкания*  $U_{кн}$  может быть выражено через активную  $U_{ка}$  и реактивную  $U_{кр}$  составляющие:

$$U_{кн} = \sqrt{U_{ка}^2 + U_{кр}^2}. \quad (4.9)$$

При этом

$$\begin{aligned} U_{ка} &= U_{кн} \cdot \cos \varphi_{к} = I_{кн} \cdot r_{к}; \\ U_{кр} &= U_{кн} \cdot \sin \varphi_{к} = I_{кн} \cdot x_{к}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Основной характеристикой трансформатора, используемого в качестве вторичного источника питания, является *внешняя характеристика*  $U_2 = f(I_2)$  — зависимость напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки трансформатора от тока нагрузки  $I_2$  при постоянном питающем напряжении  $U_1 = const$  и заданном характере нагрузки ( $\cos \varphi_2 = const$ ).

По *внешней характеристике* трансформатора может быть определено *изменение вторичного напряжения* при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке:

$$\Delta U_{2ном} \% = \frac{U_{20} - U_{2ном}}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U_{1ном} - U_2'}{U_{1ном}} \cdot 100 \quad (4.11)$$

*Изменение вторичного напряжения* трансформатора при любой нагрузке можно определить по данным *опыта короткого замыкания*:

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр} \cdot \sin \varphi_2) \cdot 100, \quad (4.12)$$

где  $\beta = I_2 / I_{2ном}$  – коэффициент нагрузки трансформатора.

Как видно из приведенного соотношения, при заданных *параметрах короткого замыкания* трансформатора *изменение вторичного напряжения* зависит как от величины, так и от характера нагрузки. В любом режиме работы трансформатора справедливо соотношение:

$$P_1 = P_2 + \sum \Delta P, \quad (4.13)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – подведенная и полезная мощность соответственно;

$$\sum \Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{мг} - \text{сумма потерь.}$$

Тогда КПД трансформатора

$$\eta \% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{P_2 + \sum \Delta P}\right) \cdot 100 \% \quad (4.14)$$

При принятых ранее допущениях  $\Delta P_{мг} \approx P_{10} \approx const$  и  $\Delta P_{эл} = \beta^2 \cdot P_{кн}$ ,

то есть потери в стали остаются постоянными, не зависящими от нагрузки, а потери в меди обмоток пропорциональны квадрату тока нагрузки. Выразив полезную мощность  $P_2$  через номинальную полную мощность  $S_{2ном}$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_{2ном} \cdot \cos \varphi_2,$$

окончательно получаем выражение для определения КПД :

$$\eta \% = \left(1 - \frac{P_{10} + \beta^2 \cdot P_{кн}}{\beta \cdot S_{2ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_{10} + \beta^2 \cdot P_{кн}}\right) \cdot 100 \quad (4.15)$$

При заданном характере нагрузки ( $\cos \varphi_2 = const$ ) единственной переменной величиной здесь является коэффициент нагрузки  $\beta$ .

Зависимость  $\eta = f(\beta)$  или  $\eta = f(I_2)$  является одной из рабочих характеристик трансформатора. Получение такой зависимости путем непосредственного измерения мощностей  $P_2$  и  $P_1$  не дает удовлетворительных результатов, так как погрешности измерений вносят значительные искажения. Более точным является косвенный метод с использованием данных *опытов холостого хода и короткого замыкания*.

#### 4.2 Описание лабораторной установки

Объектом испытаний является однофазный двухобмоточный трансформатор Т1. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 4.2.

Измерения величин тока, напряжения и мощности производятся с помощью комплекта контрольно-измерительных приборов, включающего амперметры PA1 и PA2, вольтметры PV1 и PV2, ваттметр PW1.

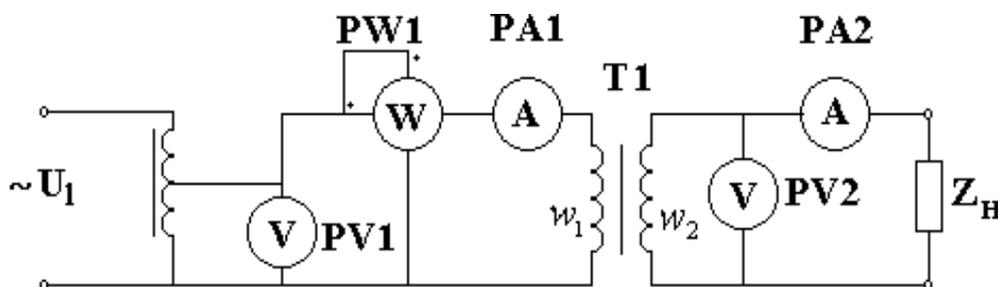


Рис. 4.2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

#### 4.3. Порядок выполнения работы

- 1) Ознакомиться с лабораторной установкой, записать номинальные данные испытуемого трансформатора.
- 2) Провести *опыт холостого хода*. Схема проведения *опыта холостого хода* представлена на рис. 4.3.

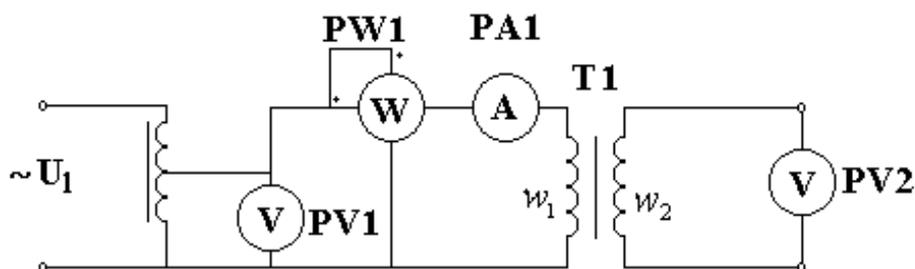


Рис. 4.3. Схема проведения опыта холостого хода

- а) Определить коэффициент трансформации  $K$ , используя соотношение (4.2), и числа витков обмоток трансформатора  $w_1$  и  $w_2$ , измерив напряжение  $U_{всн}$  на вспомогательной обмотке с известным числом витков  $w_{всн}$ . Тогда

$$w_1 = \frac{U_{10} \cdot w_{всн}}{U_{всн}} \quad \text{и} \quad w_2 = \frac{U_{20} \cdot w_1}{U_{10}}.$$

б) Снять *характеристики холостого хода*, представляющие собой зависимости  $P_{10} = f(U_{10})$ ,  $I_0 = f(U_{10})$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_{10})$  при токе нагрузки  $I_2 = 0$  и постоянной частоте  $f = const$ . *Характеристики холостого хода* снимаются при изменении первичного напряжения в диапазоне  $U_{10} = (0 \dots 1,1) \cdot U_{1ном}$

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Из мер е но				В ы ч и с л е н о							
$U_{10}$ , В	$U_{20}$ , В	$I_0$ , А	$P_{10}$ , Вт	$z_{10}$ , Ом	$r_{10}$ , Ом	$x_{10}$ , Ом	$I_{oa}$ , А	$I_{op}$ , А	$S_{10}$ , ВА	$\cos \varphi_0$	
				—	—	—	—	—			
				—	—	—	—	—			
				—	—	—	—	—			
				—	—	—	—	—			
				—	—	—	—	—			

Примечание 1. Сопротивления  $z_{10}$ ,  $r_{10}$ ,  $x_{10}$  и токи  $I_{oa}$ ,  $I_{op}$  рассчитываются при  $U_{1ном}$ .

в) Определить *параметры холостого хода*, пользуясь соотношениями:

$$z_{10} = \frac{U_{10}}{I_0}; r_{10} = \frac{P_{10}}{I_0^2}; x_{10} = \sqrt{z_{10}^2 - r_{10}^2};$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_0; \cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{S_{10}}; I_{oa} = I_0 \cdot \cos \varphi_0; I_{op} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = \sqrt{I_0^2 - I_{oa}^2}. \quad (4.16)$$

3) Провести опыт *короткого замыкания* по схеме, представленной на рис. 4.4.

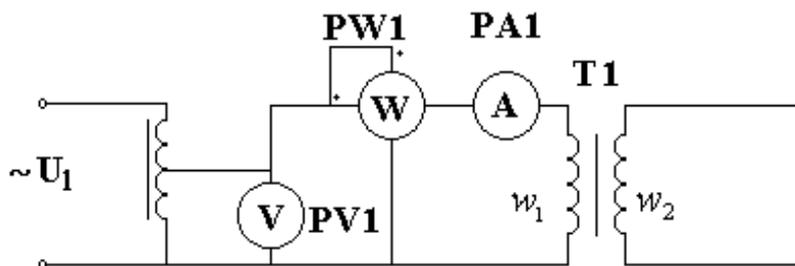


Рис. 4.4. Схема проведения опыта короткого замыкания

а) Снять *характеристики короткого замыкания* – зависимости  $P_{1к} = f(U_{1к})$ ,  $I_{1к} = f(U_{1к})$ ,  $\cos \varphi_k = f(U_{1к})$  при напряжении  $U_2 = 0$  и постоянной частоте  $f = const$ .

*Характеристики короткого замыкания* снимаются при изменении первичного напряжения  $U_{1к}$  от нуля до величины, при которой ток первичной обмотки  $I_{1к} = I_{1ном}$

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Измерено			Вычислено												
$U_{Iк},$ В	$I_{Iк},$ А	$P_{Iк},$ Вт	$I_{2к},$ А	$z_{к},$ Ом	$r_{к},$ Ом	$r_1=r_2',$ Ом	$x_{к},$ Ом	$x_1=x_2',$ Ом	$r_2,$ Ом	$x_2,$ Ом	$S_{Iк},$ ВА	$\cos \varphi_{к}$	$u_{кн},$ %	$u_{ка},$ %	$u_{кр},$ %
			—	—	—	—	—	—	—	—			—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—			—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—			—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—			—	—	—

Примечание 2. Параметры короткого замыкания рассчитываются при токе  $I_{Iном}$ .

б) Определить *параметры короткого замыкания* из соотношений (4.17):

$$z_{\hat{e}} = \frac{U_{1\hat{e}}}{I_{1\hat{e}}}; r_{\hat{e}} = \frac{P_{1\hat{e}}}{I_{1\hat{e}}^2}; r_1 = r_2' = \frac{r_{\hat{e}}}{2}; x_{\hat{e}} = \sqrt{z_{\hat{e}}^2 - r_{\hat{e}}^2}; x_1 = x_2' = \frac{x_{\hat{e}}}{2}; r_2 = \frac{r_2'}{\hat{E}^2}; x_2 = \frac{x_2'}{\hat{E}^2};$$

$$I_{2\hat{e}} = I_{1\hat{e}} \cdot \hat{E}; S_{1\hat{e}} = U_{1\hat{e}} \cdot I_{1\hat{e}}; \cos \varphi_{\hat{e}} = \frac{P_{1\hat{e}}}{S_{1\hat{e}}}; u_{\hat{e}a} \% = \frac{r_{\hat{e}} \cdot I_{1\hat{e}}}{U_{1\hat{e}}} \cdot 100; u_{\hat{e}p} \% = \frac{x_{\hat{e}} \cdot I_{1\hat{e}}}{U_{1\hat{e}}} \cdot 100.$$

4) Провести испытания трансформатора под нагрузкой по схеме рис.4.2.

а) Снять *внешнюю характеристику*  $U_2 = f(I_2)$  и *рабочие характеристики*  $I_1 = f(I_2); P_1 = f(I_2); P_2 = f(I_2); \cos \varphi_2 = f(I_2); \eta = f(I_2)$  однофазного трансформатора при  $U_{Iном} = const$  и  $\cos \varphi_2 = const$ . Характеристики снимаются при изменении тока нагрузки  $I_2$  от 0 до  $I_{2ном}$ .

Данные измерений и вычислений занести в таблицу 4.3.

б) По внешней характеристике определить значение  $\Delta U_{2ном}$  и сравнить с вычисленным по выражению (4.12).

в) Вычислить КПД по данным непосредственных измерений мощностей и косвенным методом с использованием данных холостого хода и короткого замыкания. Результаты сравнить.

При расчетах использовать соотношения:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1; \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}; \mathcal{D}_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2;$$

$$\sum \Delta P = P_{10} + \beta^2 \cdot P_{\hat{e}i}; \eta \% = 1 - \frac{\sum \Delta P}{\mathcal{D}_1} \cdot 100. \quad (4.18)$$

Таблица 4.3

Измерено						Вычислено						
$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$\cos \varphi_2$	$S_1, ВА$	$\cos \varphi_1$	$P_2, Вт$	$\beta$	$\Sigma \Delta P, Вт$	$\eta, \%$	

5) Построить *схему замещения* трансформатора, указать значения ее *параметров*, рассчитанных по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

#### 4.4 Содержание отчета

- 1) Название и цель работы.
- 2) Номинальные данные трансформатора.
- 3) Схемы проведения опытов.
- 4) Таблицы измерений и вычислений.
- 5) Характеристики: *холостого хода, короткого замыкания, внешняя, рабочие.*
- 6) *Схема замещения* с указанием значений *параметров.*

#### 4.5 Контрольные вопросы

- 1) В чем отличие авиационных трансформаторов от трансформаторов общего применения?
- 2) Как изменяется ток в первичной обмотке трансформатора с ростом вторичного тока (тока нагрузки)? Почему?
- 3) Почему основной магнитный поток трансформатора практически не зависит от его нагрузки?
- 4) Какие потери преобладают при холостом ходе трансформатора? Ответ пояснить с помощью данных опыта холостого хода.
- 5) Какие потери преобладают в режиме короткого замыкания трансформатора? Ответ пояснить с помощью данных опыта короткого замыкания.
- 6) Как изменяется вторичное падение напряжения на трансформаторе при изменении характера ( $\cos \varphi_2$ ) нагрузки?
- 7) При каких условиях вторичное напряжение трансформатора увеличивается с ростом тока нагрузки? Почему?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

**Цель работы:** ознакомление с конструктивным выполнением асинхронных машин; определение параметров асинхронного двигателя опытным путем; получение рабочих характеристик методом непосредственной нагрузки.

### 5.1. Основные положения

Асинхронные электрические машины – это машины переменного тока, в основе действия которых лежит использование явления вращения магнитного поля.

Трехфазная обмотка статора асинхронной машины создает магнитное поле, вращающееся с частотой

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (5.1)$$

где  $f_1$  – частота питающей сети,  
 $p$  – число пар полюсов машины.

Ротор асинхронной машины вращается с частотой  $n_2$  не синхронно по отношению к магнитному полю. Электромагнитное силовое взаимодействие полей статора и ротора обусловлено разностью частот вращения ( $n_1 - n_2$ ) и характеризуется *скольжением*

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (5.2)$$

Частота  $f_2$  ЭДС  $E_2$ , наводимой в обмотке ротора, не является постоянной и зависит от частоты вращения ротора  $n_2$ , то есть определяется скольжением:

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_1 - n_2)}{60} = f_1 \cdot s \quad (5.3)$$

В зависимости от величины и знака скольжения возможны три режима работы асинхронной машины:

- 1) режим двигателя при  $s_0 < s < 1$ ;
- 2) режим генератора при  $s \leq 0$ ;
- 3) режим электромагнитного тормоза при  $s > 1$ .

Асинхронные машины чаще всего используются в качестве двигателя. Важнейшей характеристикой асинхронной машины является зависимость ее электромагнитного момента от скольжения  $M = f(s)$  при  $U_{\text{НОМ}} = \text{const}$  и  $f_{\text{НОМ}} = \text{const}$ . Часть этой характеристики при скольжении  $s_0 < s < 1$  называется *механической характеристикой* асинхронного двигателя ( $s_0$  – скольжение холостого хода двигателя).

Свойства асинхронного двигателя в установившемся режиме описываются *рабочими характеристиками* – зависимостями вида  $P_1 = f(P_2)$ ,  $I_1 = f(P_2)$ ,  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ ,  $M_2 = f(P_2)$ ,  $s = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  при  $U_{\text{ном}} = \text{const}$ ,  $f_{\text{ном}} = \text{const}$ , где  $P_1$  и  $P_2$  – потребляемая и полезная мощность двигателя,  $I_1$  – ток фазы статора,  $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности,  $M_2$  – вращающий момент (момент на валу),  $\eta = P_2/P_1$  – КПД асинхронного двигателя.

## 5.2. Описание лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для исследования авиационного трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлена на рис 5.1.

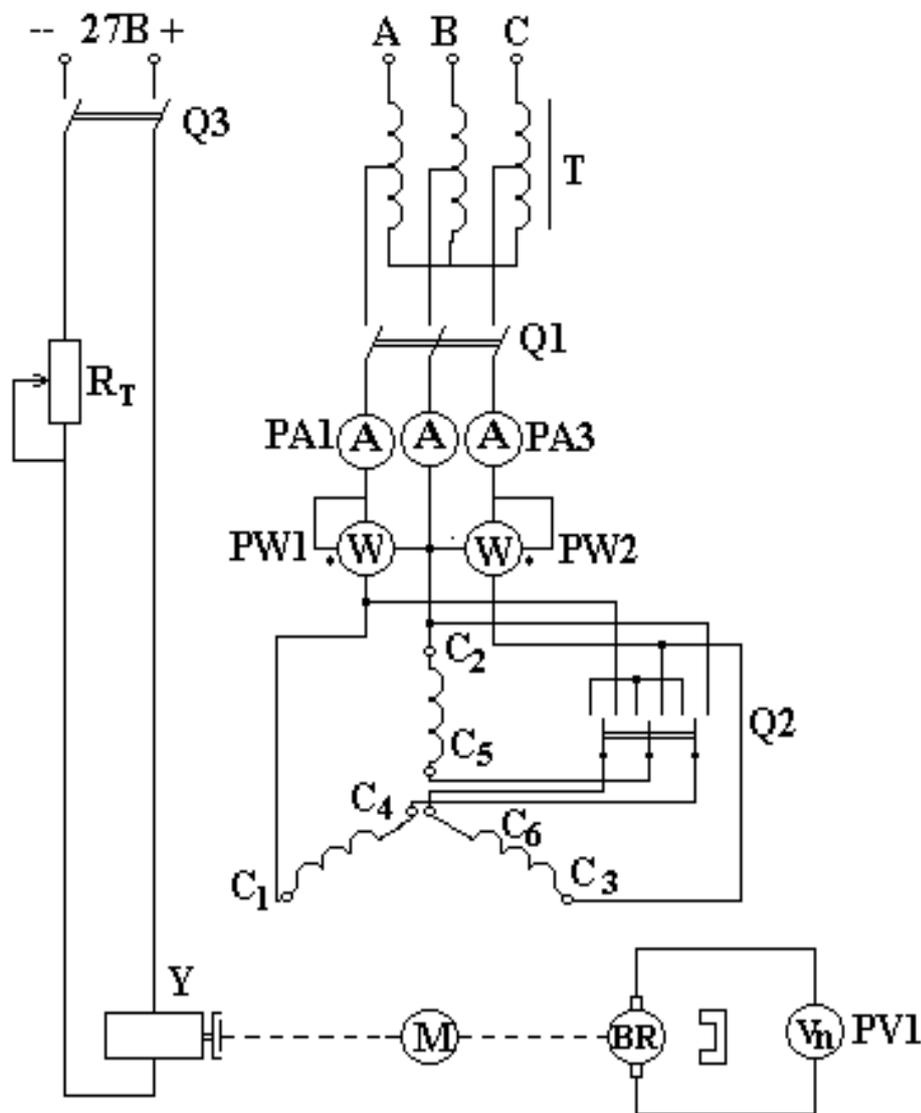


Рис. 5.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Установка состоит из испытуемого двигателя **М**, на валу которого находятся датчик частоты вращения (тахогенератор) **BR** и электромагнитный

тормоз **У**, предназначенный для создания момента нагрузки. Напряжение, подаваемое на обмотку статора асинхронного двигателя, регулируется с помощью трехфазного автотрансформатора **Т**. Момент нагрузки может плавно изменяться с помощью реостата **Рт**. Кроме того, в состав лабораторной установки входит комплект контрольно-измерительных приборов **РА1, РА2, РА3, РВ1, РВ2, РВ1, РВ2**.

С целью ограничения пусковых токов пуск асинхронного двигателя **М** производится при пониженном питающем напряжении. С помощью переключателя **Q2** обмотка статора двигателя при пуске соединяется звездой, а после достижения установившегося режима производится переключение ее в рабочее положение – в треугольник.

### 5.3. Порядок выполнения работы

- 1) Ознакомиться с лабораторной установкой, записать номинальные данные исследуемого двигателя.
- 2) Определить активное сопротивление фаз обмотки статора.

Омическое сопротивление  $r_{10}$  определяется методом амперметра и вольтметра при включении обмоток в цепь постоянного тока. Для вычисления активного сопротивления используется соотношение  $r_{1a} = 1,1 \cdot r_{10}$ , с помощью которого учитывается увеличение потерь за счет вихревых токов в проводниках обмотки.

Активное сопротивление обмоток статора должно быть приведено к рабочей температуре по формуле:

$$r_{1t} = r_{1a} ((1 + \alpha \cdot (t - t_0))), \quad (5.4)$$

где  $t$  – рабочая температура;

$t_0$  – температура окружающей среды;

$\alpha = 0,0038 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – температурный коэффициент меди.

В дальнейших вычислениях используется значение сопротивления обмотки статора  $r_1 = r_{1t}$ .

- 3) Провести *опыт холостого хода*.

Выключатель **Q3** должен быть разомкнут. С помощью автотрансформатора **Т** установите напряжение на зажимах двигателя  $U_{10} = 1,1 \cdot U_{\text{НОМ}}$ , затем понижая его ступенями  $U_{10} = (1; 0,9; 0,8; 0,7) \cdot U_{\text{НОМ}}$ , снимите *характеристики холостого хода* – зависимости  $P_0 = f(U_{10})$ ,  $I_0 = f(U_{10})$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_{10})$  при  $f_1 = \text{const}$ .

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 5.1. Вычисления производите по приведенным ниже расчетным соотношениям.

Фазные напряжение и ток *холостого хода* (средние величины):

$$U_{10} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \quad I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{\sqrt{3} \cdot 3}. \quad (5.5)$$

Мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе:

$$P_0 = P' + P'' = \Delta P_{эл10} + \Delta P_{мг} + \Delta P_{мех}, \quad (5.6)$$

где  $\Delta P_{эл10} = 3 \cdot I_0^2 \cdot r_1$  – электрические потери в обмотке статора;

$\Delta P_{мг}$  – магнитные потери;

$\Delta P_{мех}$  – механические потери.

Таблица 5.1

Измерено							
$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P', Вт$	$P'', Вт$

Продолжение табл.5.1

$U_{10}, В$	$I_0, А$	$P_0, Вт$	$\cos \varphi_0$	$\Delta P_{эл10}, Вт$	$\Delta P_{мг}, Вт$	$\Delta P_{мех}, Вт$
					–	–
					–	–
					–	–
					–	–

Для определения значений  $\Delta P_{мг}$  и  $\Delta P_{мех}$  необходимо построить график (рис.5.2) зависимости  $P_0' = f(U_{10}^2)$ , где  $P_0' = \Delta P_{мг} + \Delta P_{мех} = P_0 - \Delta P_{эл10}$ .

Разделение потерь производится при  $U_{10} = U_{1ном}$ .

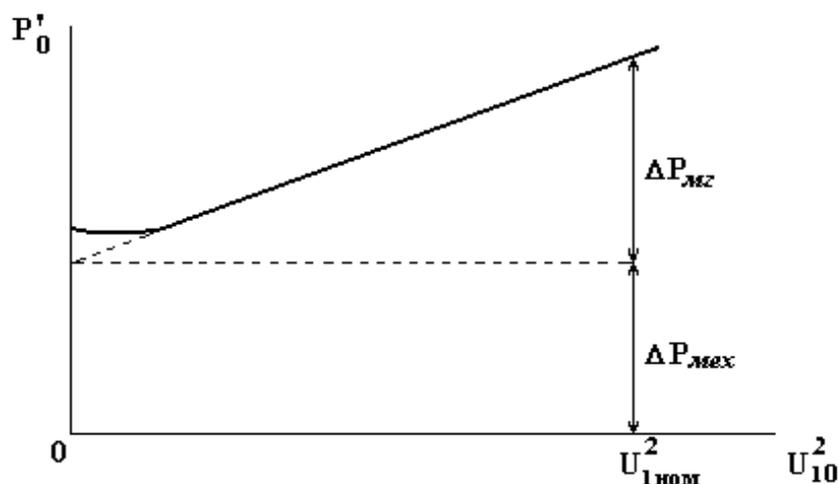


Рис.5.2. График разделения потерь холостого хода.

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_{10} \cdot I_0}. \quad (5.7)$$

4) Провести опыт *короткого замыкания*.

Для проведения этого опыта следует с помощью регулятора напряжения Т установить напряжение  $U_1 = 0$ , затормозить ротор ( $n_2 = 0$ ), далее удерживая его, повысить напряжение до величины, соответствующей току  $I_{1к} = 1,25 \cdot I_{1ном}$ . Затем, снижая напряжение, необходимо как можно быстрее произвести замеры для токов  $I_1 = (1; 0,9; 0,8; 0,7) \cdot I_{1ном}$ .

*Характеристики короткого замыкания* представляют собой зависимости  $P_{1к} = f(U_{1к})$ ,  $I_{1к} = f(U_{1к})$ ,  $\cos \varphi_k = f(U_{1к})$  при  $f_{1ном} = const$  и  $s = 1$ .  
Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

Из м е р е н о							
$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P', Вт$	$P'', Вт$

Продолжение табл.5.2

В ы ч и с л е н о					
$U_{1к}, В$	$I_{1к}, А$	$P_{1к}, Вт$	$\cos \varphi_k$	$I_{П}, А$	$M_{П}, Нм$
				—	—
				—	—
				—	—
				—	—

Расчетные соотношения.

Значения фазных напряжений и токов *короткого замыкания*:

$$U_{1к} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \quad I_{1к} = \frac{I_A + I_B + I_C}{\sqrt{3} \cdot 3}. \quad (5.8)$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1к}}{3 \cdot U_{1к} \cdot I_{1к}}. \quad (5.9)$$

Электромагнитный момент при *коротком замыкании*

$$M_k = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{\Delta P_{эм2}}{\Omega_1} \quad (5.10)$$

Угловая скорость магнитного поля

$$\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}. \quad (5.11)$$

При  $U_1 = U_{1ном}$

$$\text{- пусковой ток } I_{\Pi} = I_{кном} = I_{1к} \frac{U_{1ном}}{U_{к}}; \quad (5.12)$$

$$\text{- пусковой момент } M_{\Pi} = M_{кном} = M_{к} \cdot \left(\frac{I_{\Pi}}{I_{1к}}\right)^2. \quad (5.13)$$

5) Снять *рабочие характеристики* асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки.

Данные измерений и результаты вычислений занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Из мер е н о								
$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P', Вт$	$P'', Вт$	$V_n, В$

Продолжение табл.5.3

В ы ч и с л е н о									
$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$\cos \varphi_1$	$n_2, об/мин$	$\Omega_2, рад/с$	$s$	$M_2, Нм$	$P_2, Вт$	$\eta$

Примечание 1. Для определения частоты вращения ротора двигателя  $n_2$  по показаниям  $V_n$  вольтметра **PV1**, включенного на зажимы тахогенератора **BR**, необходимо пользоваться зависимостью  $n_2, об/мин = V_n \cdot 1000 / 6$ .

Расчетные соотношения.

Напряжение  $U_1$ , ток  $I_1$ , потребляемая мощность  $P_1$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  рассчитываются, как в предыдущих опытах.

Полезная мощность:

где  $\Delta P_{эл2} = s \cdot P_{эм}$  - электрические потери в обмотке ротора,

$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{мг}$  - электромагнитная мощность,

$\Delta P_{эл1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$  - электрические потери в обмотке статора.

Примечание 2. В расчетах использовать значения  $\Delta P_{мг}$  и  $\Delta P_{мех}$ , полученные из графика разделения потерь (рис 5.2 и табл.5.1) при  $U_{10} = U_{1ном}$ .

Электромагнитный момент

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} \quad (5.15)$$

Полезный момент - момент нагрузки

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2} \quad (5.16)$$

Угловая скорость ротора

$$\Omega_2 = \frac{2\pi \cdot n_2}{60} \quad (5.17)$$

#### 5.4. Содержание отчета

- 1) Название и цель работы.
- 2) Номинальные данные двигателя.
- 3) Схема лабораторной установки.
- 4) Таблицы измерений и вычислений.
- 5) График разделения потерь *холостого хода*.
- 6) Характеристики: *холостого хода, короткого замыкания, рабочие, механическая.*

#### 4.5. Контрольные вопросы

- 1) Как и почему с увеличением частоты вращения двигателя при пуске уменьшается пусковой ток?
- 2) Как изменяется пусковой момент асинхронного двигателя при переключении его обмоток из  $\Delta$  в рабочем режиме на  $Y$  при пуске?
- 3) Может ли асинхронная машина работать при скольжении  $s = 0$ ?
- 4) Как изменяется перегрузочная способность двигателя при снижении напряжения сети?
- 5) Как и почему изменяется частота вращения асинхронного двигателя при увеличении нагрузки на его валу?
- 6) Как регулируется частота вращения асинхронных двигателей?
- 7) Будет ли работать исследуемый асинхронный двигатель, если при его вращении оборвать одну из фаз обмотки статора?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**Цель работы:** ознакомление с устройством и принципом работы полупроводниковых выпрямительных устройств; исследование основных характеристик выпрямительных устройств.

### 6.1. Основные положения

*Выпрямительное устройство* – это устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. Основными элементами выпрямительных устройств являются понижающий трансформатор и выпрямительная схема, с помощью которой обеспечивается одностороннее протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в пульсирующее. В схеме выпрямления используются полупроводниковые диоды. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода приведена на рис. 6.1. Характеристика располагается в двух квадрантах. 1-й квадрант соответствует прямому току  $I_{пр}$  и прямому напряжению  $U_{пр}$ ; 3-й квадрант – обратному току  $I_{обр}$  и обратному напряжению  $U_{обр}$ . Значение обратного напряжения, при котором наступает пробой  $p-n$  перехода, называется пробивным напряжением  $U_{проб}$ .

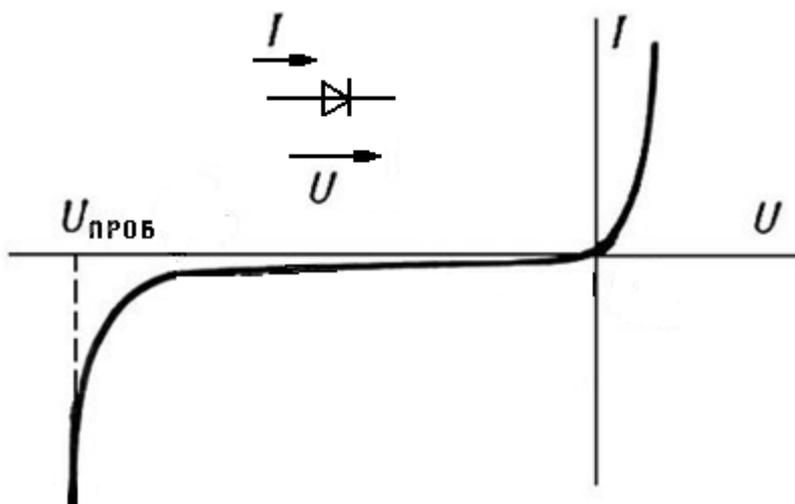


Рис. 6.1. Вольт-амперная характеристика диода

Основными эксплуатационными характеристиками выпрямителей являются:

- среднее значение выпрямленного напряжения ( $U_{ср}$ );
- среднее значение выпрямленного тока ( $I_{ср}$ );
- коэффициент полезного действия ( $\eta$ );
- внешняя характеристика, представляющая собой зависимость выходного напряжения от тока нагрузки  $U_{ср} = f(I_{ср})$ ;

коэффициент пульсаций, равный отношению амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения ( $U_{m1}$ ) к его среднему значению ( $U_{cp}$ ):

$$K_{II} = \frac{U_{m1}}{U_{cp}} \quad (6.1)$$

Схема однофазного выпрямителя может включать в себя трансформатор, выпрямитель, сглаживающий фильтр, стабилизатор. К выходу подключаются приемники электроэнергии. После изменения уровня напряжения сети с помощью трансформатора оно выпрямляется выпрямителем. Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации выпрямленного напряжения, а стабилизатор поддерживает неизменным напряжение на нагрузочном резисторе при изменении напряжения сети. В зависимости от условий работы отдельные узлы схемы могут отсутствовать.

Для выпрямления *однофазного* переменного тока применяют *однополупериодный* (однотактный) выпрямитель и *двухполупериодный* (двухтактный) выпрямитель.

#### *Однофазный однополупериодный выпрямитель*

Если пренебречь индуктивностью рассеяния вторичной обмотки трансформатора, то эквивалентная схема однополупериодного выпрямителя будет иметь вид, приведенный на рис. 6.2, а, а его временные диаграммы изображены на рис. 6.2, б.

В этой схеме диод  $VD$  включен последовательно с нагрузочным резистором  $R_H$  и вторичной обмоткой трансформатора  $T$ .

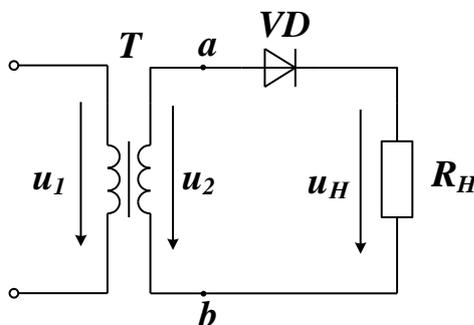


Рис 6.2, а. Схема однополупериодного выпрямителя

Если напряжение первичной обмотки трансформатора  $u_1$  изменяется по синусоидальному закону, то напряжение  $u_2$  на вторичной обмотке также будет синусоидальным. Ток в резисторе  $R_H$  появляется только в те полупериоды напряжения  $u_2$ , когда потенциал точки "а" вторичной обмотки трансформатора положителен по отношению к потенциалу точки "b", т.к. в этом режиме диод открыт. Когда потенциал точки "а" отрицателен по отношению к потенциалу точки "b", диод закрыт, и ток в цепи вторичной обмотки трансформатора равен нулю. Ток в резисторе  $R_H$  имеет пульсирующий характер, т.е. появляется в один из полупериодов напряжения  $u_2$ . Поэтому выпрямитель, собранный по такой схеме, называют *однополупериодным* (однотактным).

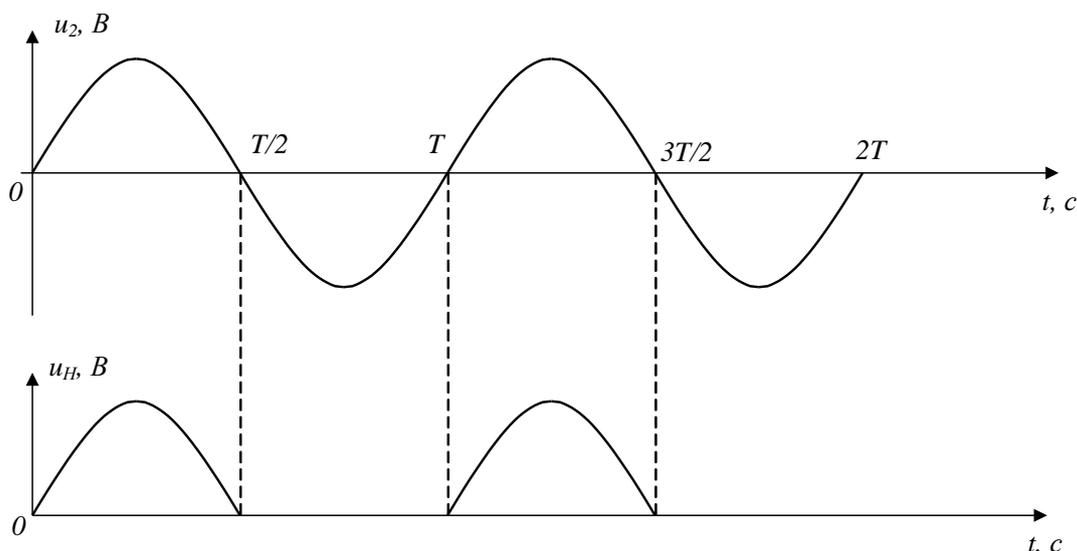


Рис 6.2, б. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра.

Недостатком таких выпрямителей является высокий уровень пульсаций  $K_{\Pi} = 1,57$ .

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{cp} = \frac{U_{mn}}{\pi}, \text{ где } U_{mn} \text{ – амплитуда выпрямленного напряжения.} \quad (6.2)$$

Для снижения пульсаций применяют электрические фильтры, включаемые между выпрямителем и нагрузкой. Схема выпрямителя с емкостным фильтром и временные диаграммы этой схемы приведены на рис. 6.3, а и рис. 6.3, б.

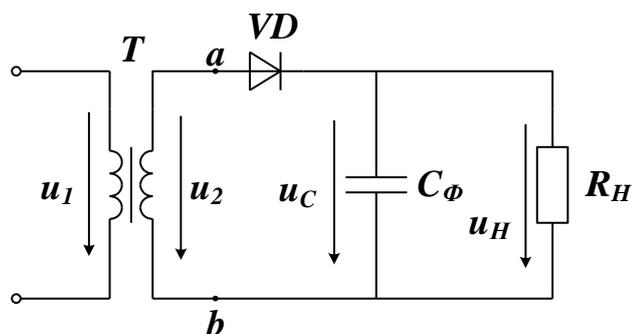


Рис. 6.3, а. Схема однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром

Время прохождения тока через диод зависит от разности мгновенных значений напряжений вторичной обмотки  $u_2$  и конденсатора  $u_C$ . В момент, когда  $u_C$  становится больше  $u_2$ , диод перестает пропускать ток. С этого момента конденсатор начинает разряжаться на нагрузочное сопротивление  $R_H$ . Скорость разряда определяется постоянной времени

$$\tau = CR_f \quad (6.3)$$

Чем больше  $C$  и  $R_H$ , тем медленнее разряд конденсатора.

В момент времени, когда увеличивающееся в результате разряда конденсатора напряжение  $u_C$  станет равным  $u_2$ , диод начнет пропускать ток, а конденсатор начнет заряжаться. Заряд конденсатора длится до момента, когда возрастающее  $u_C$  станет равным  $u_2$ . Далее процесс повторяется.

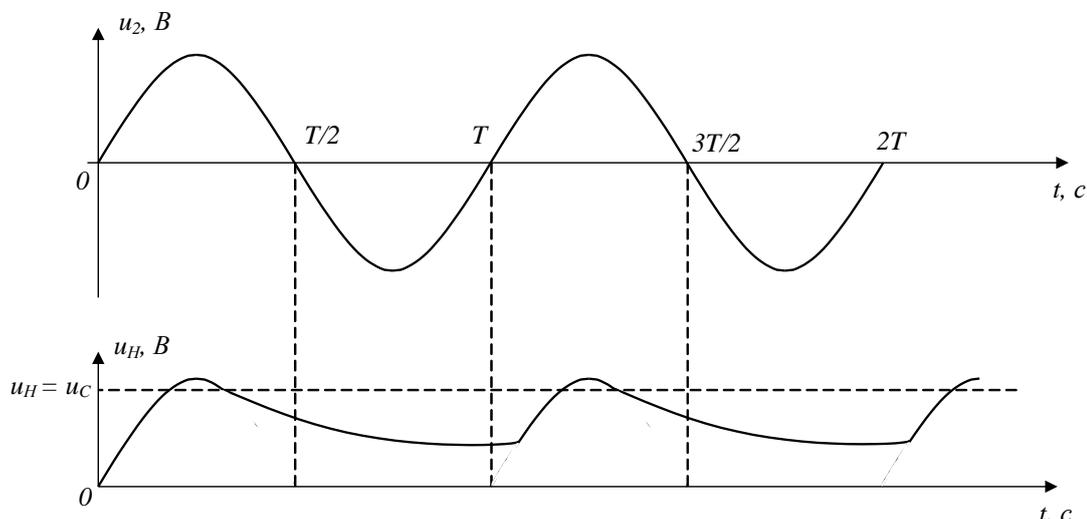
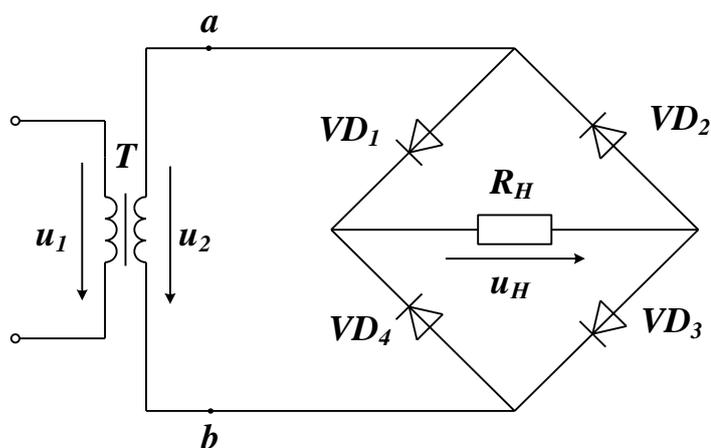


Рис 6.3, б. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром

Так как выпрямленное напряжение  $u_H$  равно по величине напряжению на конденсаторе  $u_C$ , то форма кривой выпрямленного напряжения зависит как от величины емкости  $C$ , так и от величины сопротивления нагрузки  $R_H$ . С уменьшением  $R_H$  увеличивается скорость разряда конденсатора, что ведет к уменьшению среднего значения выпрямленного напряжения  $U_{cp}$ . При этом возрастут пульсации напряжения.

#### Двухполупериодный (двухтактный) однофазный выпрямитель

Схема двухполупериодного однофазного выпрямителя приведена на рис. 6.4, а. Такая схема называется мостовой.



6.4, а. Схема двухполупериодного выпрямителя

Она состоит из понижающего трансформатора и четырех диодов. Переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а нагрузка подключается к другой его диагонали. Диоды пропускают ток попарно.

В первый полупериод напряжения  $u_2$  (когда точка "a" имеет больший потенциал нежели "b") диоды  $VD_1$  и  $VD_3$  открыты, а диоды  $VD_2$  и  $VD_4$  закрыты, и в нагрузочном сопротивлении  $R_H$  протекает ток.

Во второй полупериод потенциал точки "a" меньше потенциала точки "b", диоды  $VD_2$  и  $VD_4$  открыты, а диоды  $VD_1$  и  $VD_3$  закрыты. При этом ток, протекающий в нагрузочном резисторе, имеет то же направление, что и в первый полупериод напряжения  $u_2$ .

Временные диаграммы двухполупериодной схемы выпрямления приведены на рис. 6.4, б.

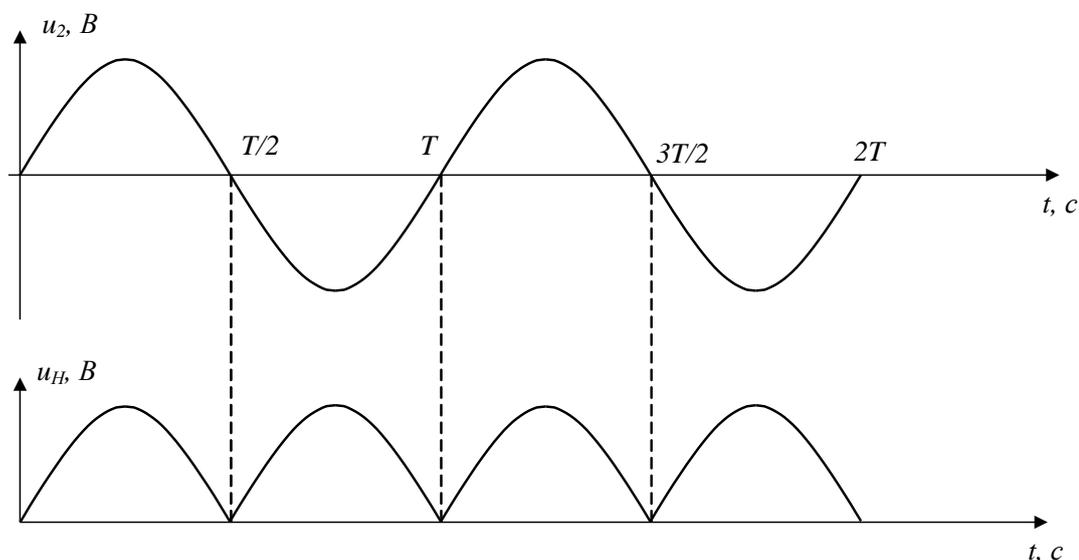


Рис 6.4, б. Временные диаграммы двухполупериодного выпрямителя

Коэффициент пульсации в данной схеме равен  $K_{II} = 0,67$ .

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{cp} \approx 0,9U_2 \quad (6.4)$$

## 6.2. Рабочее задание

- 1) Ознакомиться с устройством, принципом работы и основными характеристиками выпрямителей.
- 2) Собрать электрическую схему лабораторной установки.
- 3) Измерить выходные и входные параметры выпрямителя и зарисовать осциллограмму выходного напряжения выпрямителя с экрана осциллографа.
- 4) По измеренным выходным параметрам рассчитать  $U_{cp}$ ,  $I_{cp}$ ,  $P_{cp}$ .

### 6.3. Порядок выполнения работы

Для определения характеристик однофазных выпрямителей выполните следующие действия:

- соберите электрическую схему установки в соответствии с рис. 6.5;
- установите переключатели  $S_1$  и  $S_2$  в положение "1";
- включите питание осциллографа и отрегулируйте четко изображение развертки на его экране;
- установите заданное напряжение источника и подключите схему установки к источнику;
- добейтесь четкого изображения выходного напряжения на экране осциллографа и зарисуйте осциллограмму этого напряжения в выбранном масштабе; снимите показания приборов и запишите их в таблицу 6.1;

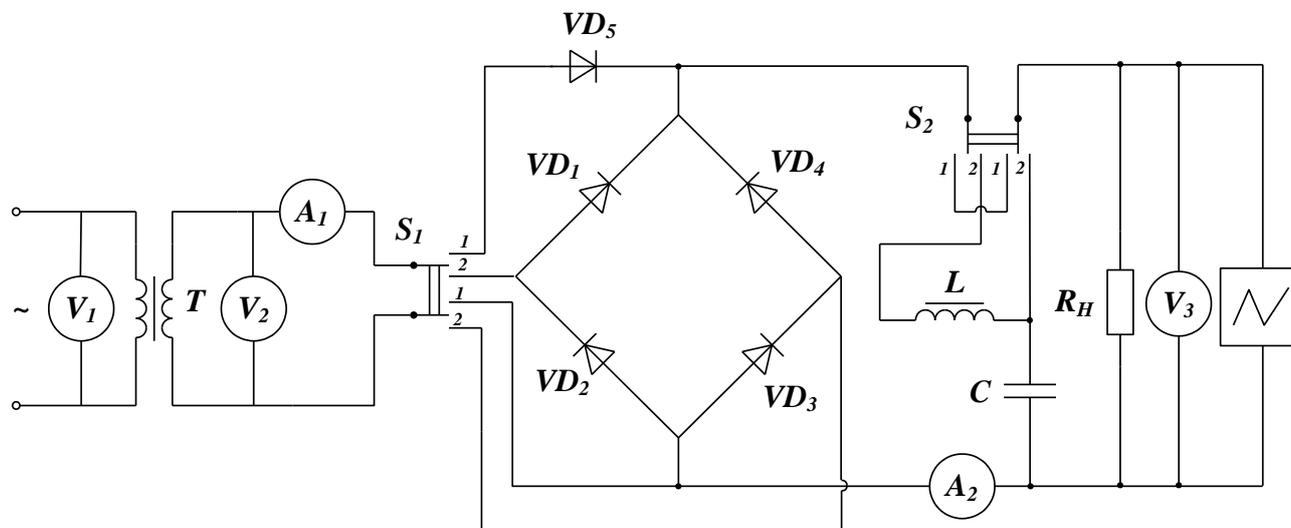


Рис. 6.5. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Таблица 6.1

Тип выпрямителя		Измерено					Вычислено		
		$U_1,$ $B$	$U_2,$ $B$	$U_3,$ $B$	$I_1,$ $A$	$I_2,$ $A$	$U_{зср},$ $B$	$I_{2ср},$ $A$	$P_{2ср},$ $Вт$
Однофазный однополупериодный	Без фильтра								
	С фильтром					-	-	-	
Однофазный двухполупериодный	Без фильтра								
	С фильтром					-	-	-	

- установите переключатель  $S_2$  в положение "2" и зарисуйте осциллограммы выходного напряжения выпрямителя при включенном фильтре, запишите показания приборов;

- установите переключатель  $S_1$  в положение "2" и  $S_2$  – в положение "1"; снимите показания приборов и запишите их в таблицу 6.1. Зарисуйте осциллограмму выходного напряжения выпрямителя;

- установите переключатель  $S_2$  в положение "2" и сравните характер изменения осциллограмм выходного напряжения выпрямителя.

Выключите питание схемы.

Примечание.  $U_2$  и  $I_1$  измерить при отсутствии выпрямительных устройств. Вычисления произвести для схем без фильтра.

По измеренным данным рассчитайте величины  $U_{cp}$ ,  $I_{cp}$ ,  $P_{cp}$ .

#### 6.4. Выполнение работы в среде MULTISIM

1) При выполнении лабораторной работы в среде MULTISIM порядок проведения работы и содержание отчёта остаются прежними, однако сборка схем и проведение экспериментов с реальным оборудованием заменяются работой с их моделями.

При этом схеме рис.6.5 соответствует схема модели на рис. 6.6.

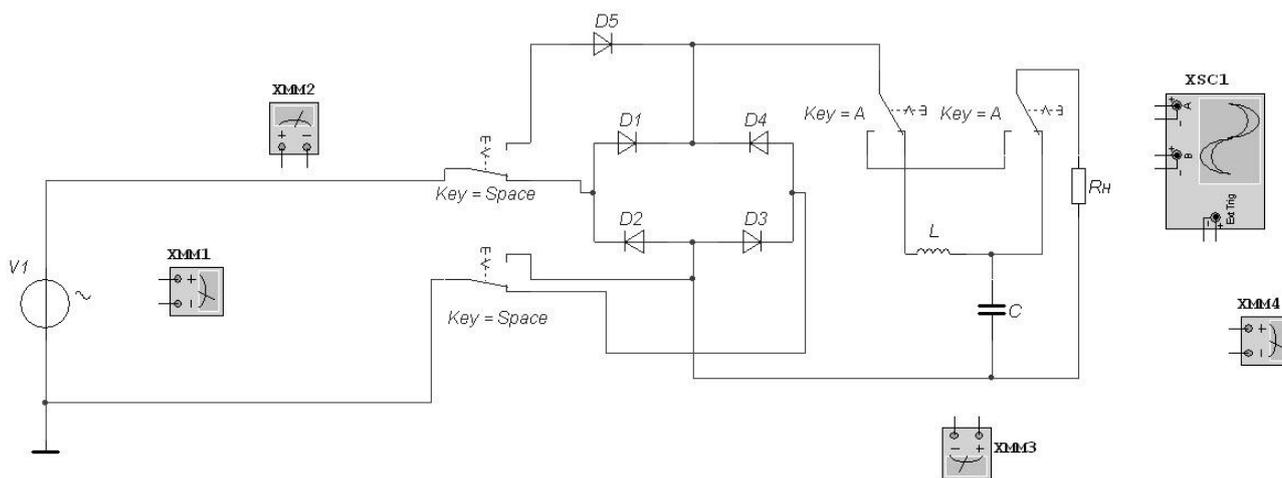


Рис. 6.6

#### 6.5. Содержание отчета

- 1) Наименование и цель работы.
- 2) Электрические схемы установки.
- 3) Результаты измерений, таблицы, формулы, расчеты.
- 4) Осциллограммы выпрямленного напряжения.
- 5) Выводы по работе.

## 6.6. Контрольные вопросы

- 1) Нарисуйте вольт-амперную характеристику полупроводникового выпрямительного диода и поясните ее.
- 2) Назовите основные параметры, характеризующие выпрямительный диод.
- 3) Чем обусловлены выпрямительные свойства полупроводникового диода?
- 4) Как определить коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения?
- 5) Назовите основные недостатки однофазного однополупериодного выпрямителя.
- 6) Поясните назначение электрического фильтра. Поясните принцип работы емкостного фильтра на примере однофазного однополупериодного выпрямителя.
- 7) Нарисуйте электрическую схему и поясните принцип работы однофазного двухполупериодного (мостового) выпрямителя.

## Рекомендуемая литература

- 1) Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. - М.: Энергоатомиздат, 2005.
- 2) Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. – М.: ДМК Пресс, 2011

## Содержание

Лабораторная работа № 1	Исследование электрической цепи постоянного тока.....	8
Лабораторная работа № 2	Исследование электрических цепей синусоидального тока.....	16
Лабораторная работа № 3	Исследование трехфазных электрических цепей при различных способах соединения нагрузки.....	24
Лабораторная работа № 4	Исследование однофазного трансформатора...	34
Лабораторная работа № 5	Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	42
Лабораторная работа № 6	Исследование полупроводниковых выпрямительных устройств.....	49
Рекомендуемая литература	.....	56