

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

**КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ**  
**ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

## **Методические указания**

по выполнению лабораторных работ  
в лаборатории "Общая электротехника"  
для студентов неэлектротехнических специальностей  
дневной и заочной форм обучения

Часть I

### ***Электрические цепи***

**Брест 2014**

Методические указания по выполнению лабораторных работ в лабораториях «Общая электротехника» для студентов неэлектротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения.

Издаётся в 2-х частях. Часть 1. Электрические цепи.

Настоящие указания предназначены в качестве учебного пособия для студентов неэлектротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения при выполнении лабораторных работ по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника», «Электротехника, электрические машины и аппараты», «Электротехника и электрооборудование» и т.п.

Пособие содержит руководства для выполнения лабораторных работ по разделу «Электрические цепи». В описание каждой лабораторной работы входят основы теории, указания по проведению эксперимента, принципиальные схемы, контрольные вопросы и рекомендуемая литература.

Составители: И.М. Панасюк, ст. преподаватель,  
А.С. Смаль, ст. преподаватель.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.0

### Тема. Электрические измерения и приборы

**Цель:** изучение устройства, принципа работы и методики использования электроизмерительных приборов различных систем.

#### **Основные сведения**

Настройка, исследование и эксплуатация электротехнических устройств, качественный и количественный анализ их работы возможны при наличии ряда данных, характеризующих отдельные узлы, блоки, а также приборы в целом. Эти данные могут быть получены лишь с помощью сложной измерительной аппаратуры и специальных методов измерений. Специфика таких измерений заключается в необходимости определения большого числа параметров (напряжение, ток, мощность, частота, сопротивление и т.д.), имеющих широкие диапазоны возможных значений (напряжение – от единиц милливольт до десятков киловольт; ток – от единиц миллиампер до сотен ампер; мощность – от долей милливатта до сотен киловатт; частота – от долей герца до сотен мегагерц; сопротивление – от единиц ом до мегом и т.д.).

*Измерение* – определение значений физических величин опытным путём при помощи специальных технических средств и выражение этих значений в принятых единицах (на производстве чаще применяется более производительная операция измерений – *контроль*).

*Электроизмерительный прибор (ЭИП)* – средство электрических измерений, которое предназначено для выработки сигнала измерительной информации (сигнала, который функционально связан с измеряемой физической величиной) в форме доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

*Измерительный преобразователь (ИП)* – основная часть измерительного прибора, в которой сигнал преобразуется в вид, удобный для подачи на индикаторные или регистрирующие устройства. В зависимости от вида измеряемых величин ИП делят на две группы: преобразователи электрических величин в электрические (шунты, делители напряжения, усилители и т.д.) и преобразователи неэлектрических величин в электрические (термо- и тензорезисторы, индуктивные преобразователи и т.д.).

*ЭИП*, показания которых являются непрерывными функциями измеряемых величин, называются *аналоговыми*.

*ЭИП*, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме, называются *цифровыми*.

*ЭИП* классифицируют по следующим признакам:

- методу измерения;
- роду измеряемой величины;
- роду тока;
- степени точности;
- принципу действия и т.д.

По методу измерения различают:

• *ЭИП непосредственной оценки*, в которых измеряемую величину определяют по показаниям прибора в процессе измерения;

• *ЭИП сравнения*, в которых измеряемая величина сравнивается с известной (как это производится в мостах или компенсаторах).

По роду измеряемой величины различают ЭИП служащие:

- для измерения *напряжения* (вольтметры, милливольтметры, киловольтметры);
- для измерения *тока* (амперметры, микроамперметры, миллиамперметры);
- для измерения *мощности* (ваттметры, киловаттметры, мегаваттметры);
- для измерения *энергии* (счетчики электроэнергии); для измерения *угла сдвига фаз* (фазометры);
- для измерения *частоты тока* (частотомеры);
- для измерения *сопротивления* (омметры) и др.

По роду тока различают:

- ЭИП, используемые в цепях *постоянного тока*;
- ЭИП, используемые в цепях *переменного тока* (как частный случай в трёхфазных цепях);
- ЭИП, используемые в цепях как *постоянного*, так и *переменного* тока.

По степени точности ЭИП, согласно ныне действующему стандарту, делят на девять классов точности (0,01; 0,02; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0), представляющих собой приведенную относительную погрешность, выраженную в процентах:

$$\gamma = \frac{\delta}{A_{max}} \cdot 100\%,$$

где  $\delta = A - A_0$  – *абсолютная погрешность* измерения;  $A$  – показание проверяемого ЭИП;  $A_0$  – истинное значение измеряемой величины (показания эталонного прибора);  $A_{max}$  – максимальное значение измеряемой величины (предел измерения).

ЭИП, классов точности от 0,01 до 0,5 включительно используются для точных лабораторных исследований и называются *прецизионными*, ЭИП, классов точности от 1,0 до 4,0 включительно менее точные называют *техническими*, а остальные ЭИП – *внеклассовые*.

По принципу действия аналоговые электромеханические ЭИП делят на *магнитоэлектрические*, *электромагнитные*, *электродинамические*, *индукционные*, *электростатические*, *тепловые*, *выпрямительные*, *термоэлектрические*.

Принцип действия ЭИП *магнитоэлектрической системы* основан на воздействии магнитного поля постоянного магнита на подвижную катушку с током, помещённую в это поле. Устройство прибора такой системы с механической приводящей силой показано на рисунке 1. Прибор состоит из неподвижной части, представляющей собой подковообразный магнит 3 с полюсными наконечниками *NS*. В пространстве между полюсными наконечниками неподвижно закреплён стальной цилиндрический сердечник 2, который необходим для создания в воздушном зазоре 1 между полюсными наконечниками и сердечником равномерного радиально направленного поля. В воздушном зазоре расположена подвижная катушка 4, выполненная из тонкого изолированного

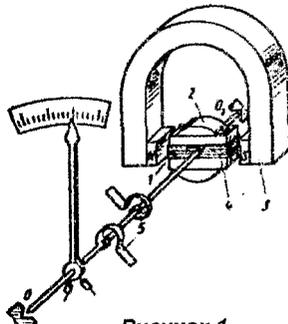


Рисунок 1

зоре расположена подвижная катушка 4, выполненная из тонкого изолированного

ного провода, намотанного на алюминиевый каркас прямоугольной формы (или без каркаса). Концы обмотки соединены со спиральными бронзовыми пружинами 5 (растяжками или подвесом), изолированно закреплёнными на стальных полуосях  $00_1$  рамки. С другой стороны пружины своими свободными концами соединены с двумя неподвижными проводами, подводящими ток к катушке, т.е. пружины являются токоведущими частями прибора. Их основное назначение – создание противодействующего момента в приборе и возвращение подвижной системы в первоначальное (нулевое) положение, когда прибор отключён от сети. Вращающий момент подвижной системы прибора создаётся в результате взаимодействия подвижной катушки, с протекающим по ней током, и магнитного поля в воздушном зазоре магнита и пропорционален электромагнитной силе, действующей на подвижную катушку.

Под действием вращающего момента катушка прибора поворачивается и стрелка отклоняется до тех пор, пока вращающий момент не станет равным противодействующему моменту.

Угол поворота стрелки прибора магнитоэлектрической системы пропорционален току, проходящему через обмотку катушки. Поэтому у этих приборов шкала равномерная, что делает их удобными в эксплуатации.

Направление отклонения стрелки приборов магнитоэлектрической системы зависит от направления измеряемого тока, поэтому при включении их в цепь переменного тока на подвижную катушку действуют быстроизменяющиеся по значению и направлению механические силы, среднее значение которых равно нулю. Следовательно, такие приборы пригодны только для измерений в цепях постоянного тока.

Успокоение подвижной системы прибора достигается тормозящим действием вихревых токов, наводимых в алюминиевой рамке катушки при перемещении её в магнитном поле постоянного магнита, так как магнитное поле рамки согласно правилу Ленца противодействует магнитному полю магнита, что мешает вращению рамки и быстро гасит её колебания.

Магнитоэлектрические приборы обладают следующими положительными свойствами: высокой чувствительностью и большой точностью измерений; незначительной собственной потребляемой мощностью; незначительной зависимостью работы приборов от внешних магнитных полей и температуры окружающей среды; равномерностью шкалы по всей её длине и большим диапазоном измерения значений тока (от  $10^{-6}$  до 50 А) и напряжения (от  $10^{-3}$  до нескольких сотен вольт при применении добавочных сопротивлений); хорошей апериодичностью, т.е. быстрым успокоением подвижной системы.

К отрицательным свойствам магнитоэлектрических приборов следует отнести слабую перегрузочную способность (токопроводящие пружины при перегрузках перегреваются, изменяя упругие свойства) и необходимость при измерениях в цепях переменного тока применять специальные преобразователи.

Принцип действия *ЭИП электромагнитной системы* основан на механизме втягивания подвижного ферромагнитного сердечника внутрь неподвижной катушки под действием её магнитного поля, создаваемого в катушке проходящим через неё измеряемым током.

Наиболее широко распространены электромагнитные приборы с плоской катушкой (рисунок 2). Прибор состоит из прямоугольной неподвижной катушки 5, через которую проходит измеряемый ток. Катушка имеет узкую щель, в ко-

тору может входить сердечник, выполненный в виде тонкого лепестка 2 из магнитомягкой стали и закрепленной эксцентрично на оси прибора. К этой же оси прикреплены указательная стрелка 1, спиральная пружина 6, создающая противодействующий момент, и поршень 4 воздушного успокоителя 3, создающего демпфирующий момент. Концы оси прибора удерживаются в подшипниках. Ток  $I$ , проходя через витки катушки, создаёт магнитный поток, который, намагничивая стальной сердечник, втягивает его в катушку, причём тем сильнее, чем больше магнитная индукция поля катушки. При втягивании стального сердечника ось прибора поворачивается и стрелка отклоняется на некоторый угол.

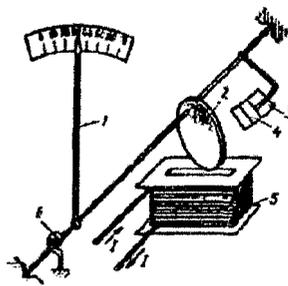


Рисунок 2

При изменении направления тока в катушке электромагнитного прибора одновременно меняются на противоположные и магнитные полюсы ферромагнитного сердечника, вследствие чего направление вращающего момента подвижной части прибора не меняется. Поэтому приборы электромагнитной системы пригодны для измерений в цепях как постоянного, так и переменного токов.

Основные достоинства приборов электромагнитной системы – простота и надёжность устройства, высокая перегрузочная способность (сечение провода для катушки может быть взято с запасом), дешевизна и возможность использования для измерений в цепях постоянного и переменного тока.

К недостаткам приборов электромагнитной системы можно отнести невысокий класс точности измерений, который обычно не выше 1,0 из-за влияния гистерезиса; относительно большое собственное потребление мощности (в катушках амперметров – до 1 Вт, а в вольтметрах с добавочными сопротивлениями – до 6 Вт); неравномерность шкалы (особенно сильно она сжата в начале); низкая чувствительность, из-за чего эти приборы непригодны для измерения малых токов и напряжений; зависимость показаний от внешних магнитных полей, так как собственное поле катушки расположено в воздушной среде и поэтому его индукция незначительна; ограниченность диапазона частот (не выше 8000 Гц).

Магнитоэлектрические и электромагнитные ЭИП применяют для измерения тока и напряжения.

При измерении тока какой-либо ветви электрической цепи ЭИП (амперметр) включают последовательно с другими элементами ветви, а при измерении напряжения ЭИП (вольтметр) включают параллельно участку цепи, между выводами которого измеряется напряжение.

Однако приборы магнитоэлектрических систем производятся на токи не более 150–200 мА, так как при больших токах происходит недопустимый нагрев спиральных пружин (или растяжек), служащих, как отмечалось ранее, токоподводящими элементами системы. Для расширения пределов измерения этих ЭИП по току (амперметров) используют *шунты* (масштабные преобразователи), представляющие собой сопротивление  $R_{ш}$ , включённое параллельно прибору (рисунок 3) для того, чтобы только определенная часть  $I_x$  измеряемо-

го тока  $I$  проходила через сам прибор, а остальная часть –  $I_{ш}$ , оттекала в ветвь с шунтом. Необходимое сопротивление шунта:

$$R_{ш} = R_A / (N - 1),$$

где  $R_A$  – сопротивление ЗИП без шунта;  $N$  – число показывающее, во сколько раз должен быть увеличен предел измерений.

Для расширения пределов измерения значения напряжения последовательно с ЗИП (вольтметром) включают сопротивление  $R_d$  (добавочный резистор), образующее делитель напряжения (рисунок 4). В результате падение напряжения  $U$  на измеряемом участке перераспределяется между прибором –  $U_V$  и добавочным резистором –  $U_d$ . Необходимое сопротивление добавочного резистора:

$$R_d = R_V \cdot (N - 1),$$

где  $R_V$  – сопротивление ЗИП без добавочного резистора;  $N$  – число, показывающее, во сколько раз должен быть увеличен предел измерений.

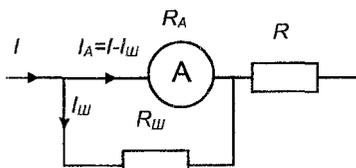


Рисунок 3

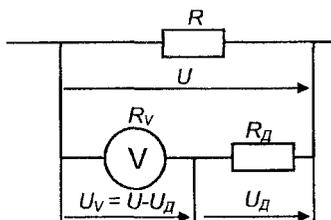


Рисунок 4

Для расширения пределов измерения ЗИП также используют измерительные (разделительные) трансформаторы. При расширении пределов измерения амперметров применяют трансформаторы тока (ТТ), представляющие собой двухобмоточные повышающие ( $w_1 < w_2$ ) трансформаторы, первичная обмотка которых с числом витков  $w_1$  включена последовательно с нагрузкой (клеммы  $L_1$  и  $L_2$ ), а к вторичной с числом витков  $w_2$  – присоединён ЗИП (клеммы  $I_1$  и  $I_2$ ). Наглядная и принципиальная схемы включения ТТ – на рисунке 5 а и б соответственно.

Расширить пределы измерения вольтметров позволяют трансформаторы напряжения (ТН), представляющие собой двухобмоточные понижающие ( $w_1 > w_2$ ) трансформаторы, работающие в режиме холостого хода (рисунок 6).

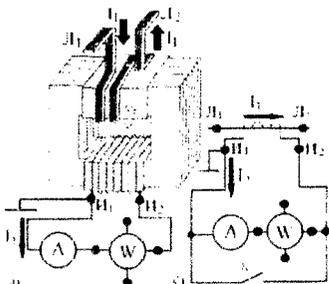


Рисунок 5

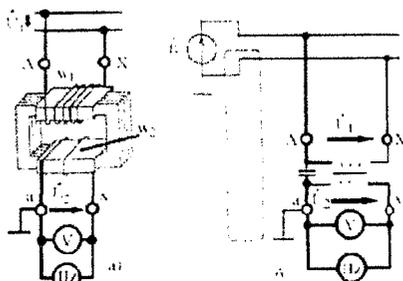


Рисунок 6

Первичная обмотка с числом витков  $w_1$  ТН включена параллельно участку, на котором измеряется напряжение (клеммы А и Х), а к вторичной с числом витков  $w_2$  – присоединён ЗИП (клеммы а и х). Для расширения пределов измерения ваттметров и фазометров необходимы оба типа измерительных трансформаторов как ТТ, так и ТН.

Принцип действия ЗИП электродинамической системы основан на взаимодействии проводников с токами. Известно, что два проводника с токами взаимно притягиваются, если токи в них имеют одинаковое направление, и взаимно отталкиваются при различном направлении токов.

Прибор этой системы (см. рис. 7) состоит из двух катушек: неподвижной 2, состоящей из двух секций, которые соединены между собой последовательно, и подвижной 3, закрепленной на оси и вращающейся на ней внутри неподвижной катушки. Ток к подвижной катушке подводят через закреплённые на оси спиральные пружинки 1, которые одновременно создают пропорциональный углу закручивания противодействующий момент. При этом пружинки электрически изолированы от оси. На оси подвижной катушки закреплены также указательная стрелка 4 и крыло воздушного успокоителя 5. Для повышения класса точности прибора и его чувствительности обмотку подвижной катушки выполняют из тонкой изолированной проволоки на ток не более 0,5 А.

При прохождении токов по катушкам электродинамического прибора ток подвижной катушки  $I_2$  взаимодействует с магнитным потоком, созданным током неподвижной катушки, и создаётся вращающий момент.

Угол поворота подвижной части электродинамического прибора пропорционален произведению токов в его катушках и изменению их взаимной индуктивности при повороте подвижной части прибора. На характер изменения взаимной индуктивности можно воздействовать путём подбора формы катушек и их начального взаимного расположения.

Приборы электродинамической системы имеют высокую точность, что обусловлено отсутствием ферромагнитных сердечников, и могут использоваться для измерений в цепях постоянного и переменного тока. При измерениях в цепях переменного тока электродинамические приборы являются самыми точными. Их выполняют в основном в виде переносных приборов, имеющих классы точности 0,1; 0,2; 0,5. Высокая точность приборов обусловлена тем, что для создания вращающего момента подвижной части приборов используют магнитные потоки, действующие в воздухе, что исключает возможность возникновения погрешностей из-за вихревых токов, гистерезиса и т.д.

Недостатками приборов электродинамической системы являются зависимость их показаний от воздействия внешних магнитных полей (так как их собственное магнитное поле незначительно) и слабая перегрузочная способность (так как подвод тока к подвижной катушке осуществляется через тонкие спиральные пружинки). Кроме того, эти приборы потребляют довольно значительную мощность, поскольку ввиду слабости собственного магнитного поля приходится заметно увеличивать число витков неподвижной и подвижной катушек для того, чтобы создать достаточный вращающий момент.

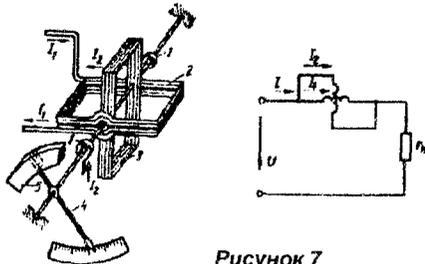


Рисунок 7

Для устранения влияния посторонних магнитных полей на показания приборов и увеличения их вращающего момента электродинамические приборы снабжают ферромагнитными сердечниками, усиливающими собственные магнитные поля катушек. Наличие ферромагнитных сердечников усиливает магнитные поля катушек и, следовательно, вращающий момент подвижной части прибора. Сердечники выполняются из изолированных друг от друга пластин магнитомягких сталей и пермаллоя, что уменьшает погрешности от вихревых токов и надёжно защищает приборы от влияния посторонних магнитных полей. Электродинамические приборы, катушки которых имеют ферромагнитные сердечники, получили название *ферродинамических*. Эти приборы в отличие от электродинамических обладают меньшей точностью из-за влияния гистерезиса и вихревых токов, их высший класс точности 1,5. Ферродинамические приборы применяют, главным образом, для измерений в цепях переменного тока в качестве щитовых и самопишущих приборов (благодаря их большому вращающему моменту) в диапазоне частот от 10 до 1500 Гц.

Приборы электро- и ферродинамических систем используют также в качестве ваттметров и фазометров благодаря наличию двух независимых цепей. В этом случае неподвижная катушка (токовая обмотка  $I'$ - $I$ ) включается в цепь последовательно с нагрузкой, а подвижная (обмотка напряжения  $U'$ - $U$ ) — параллельно (рисунок 8), при этом последовательно с ней включается добавочный резистор  $R_d$ .

Работа *ЭИП индукционной системы* основана на использовании явления возникновения вращающегося (или бегущего) магнитного поля, т.е. на способности этих полей создавать вращающий момент, действующий на подвижное металлическое тело, помещённое в такое поле.

Индукционные приборы применяют для измерения тока, напряжения, мощности и энергии в цепях переменного тока. Однако наиболее часто их используют для измерения энергии. Поэтому принцип действия индукционных приборов рассмотрим на примере работы счётчика электрической энергии переменного однофазного тока (рисунок 9).

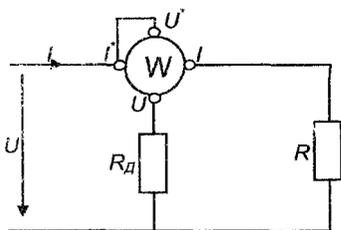


Рисунок 8

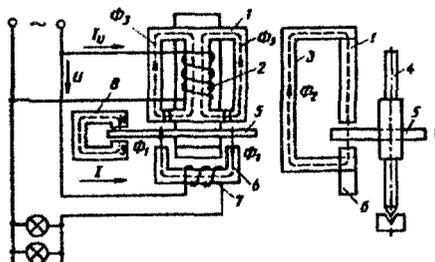


Рисунок 9

В индукционном счётчике бегущее магнитное поле, создаваемое токами его катушек, индуцирует в алюминиевом подвижном диске вихревые токи. Взаимодействие бегущего магнитного поля с вихревыми токами создаёт вращающий момент, заставляющий диск вращаться в ту же сторону, в которую вращается поле. Противодействующий момент создаётся в результате взаимодействия поля постоянного магнита 8 с наводимыми им во вращающемся алюминиевом диске вихревыми токами.

Подвижная часть прибора представляет собой алюминиевый диск 5, укрепленный на оси 4. Неподвижная часть счётчика состоит из двух электромагнитов 1 и 6 с намагничивающими катушками 2 и 7 соответственно. Электромагнит 1 является трёхстержневым, а катушка 2 состоит из большого числа витков изолированного проводника малого сечения. Эта катушка включается параллельно измеряемой цепи и называется обмоткой напряжения. Ток  $I_U$ , проходящий через катушку напряжения, и магнитный поток этой катушки  $\Phi$  пропорциональны приложенному к цепи напряжению  $U$ . Так как индуктивность катушки 2 достаточно велика, то ток  $I_U$  отстаёт по фазе от напряжения  $U$  практически на угол  $\pi/2$ .

Электромагнит 6 имеет П-образную форму. Катушка 7, являющаяся катушкой электромагнита 6, состоит из небольшого числа витков изолированного проводника достаточно большого сечения. Эту катушку включают последовательно с измеряемой цепью и называют токовой обмоткой прибора. Ток  $I$ , проходящий через катушку 7 и являющийся током нагрузки, создаёт поток  $\Phi_1$ , который пропорционален току  $I$ , причём поток  $\Phi_1$  отстаёт по фазе от тока  $I$  на некоторый угол, называемый углом потерь. Угол потерь весьма мал, так как поток  $\Phi_1$  значительное расстояние проходит через воздух. Токи  $I_U$  и  $I$  соответственно созданные ими магнитные потоки  $\Phi$  и  $\Phi_1$  совпадают по фазе. Поток  $\Phi_1$  дважды пересекает алюминиевый диск 5. Ток  $I$  и напряжение  $U$  сдвинуты по фазе на некоторый угол, значение которого зависит от характера нагрузки.

Катушка 2 расположена на среднем стержне электромагнита 1, поэтому магнитный поток этой катушки  $\Phi$  разветвляется на потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , один из которых  $\Phi_2$ , проходя по среднему стержню сердечника и участку 3 магнитной цепи, огибает диск и пересекает его. Потоки  $\Phi_3$  не пересекают диск прибора, так как замыкаются по боковым стержням сердечника 1. Следовательно, поток  $\Phi_2$  является рабочим. Потоки  $\Phi_3$  используются в счётчике для создания необходимого угла сдвига фаз между рабочими потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ .

Вращающий момент диска, создаваемый магнитными потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , пропорционален произведению максимальных значений этих потоков и синуса угла сдвига фаз между ними.

Вихревые токи, возникающие в диске при вращении его в поле постоянных магнитов, пропорциональны частоте вращения диска.

Таким образом, электроэнергия, учитываемая счётчиком, пропорциональна частоте вращения диска.

Счётчик электроэнергии имеет счётный механизм, который связан червячной передачей с осью диска. По показаниям счётного механизма определяют количество электроэнергии, которое израсходовал потребитель.

К достоинствам индукционных счетчиков следует отнести их большую надёжность в работе, значительную перегрузочную способность по току (~300%), незначительную чувствительность к внешним магнитным полям и большое значение вращающего момента.

Индукционные приборы пригодны для использования в сетях переменного тока только одной определённой частоты, что является в некоторой степени недостатком таких приборов. Другим недостатком можно считать зависимость показаний прибора от температуры окружающей среды: с повышением температуры окружающей среды увеличивается сопротивление прибора и умень-

шаются вихревые токи, что приводит к уменьшению вращающего момента (примерно на 0,4% при нагревании на 1°C).

Принцип действия *электростатического ЭИП* основан на взаимодействии электрически заряженных электродов, разделённых воздушным диэлектриком. Конструктивно этот прибор (рис. 10) представляет собой разовидность плоского конденсатора, так как в результате перемещения подвижной части механизма изменяется ёмкость системы. Электростатические силы взаимодействия заряженных электродов 2 создают вращающий момент, под действием которого подвижные электроды 1 втягиваются в пространство между неподвижными пластинами. Подвижные электроды 1 втягиваются до тех пор, пока вращающий момент не станет равен возвратному моменту, который создаётся возвратной пружиной 4.

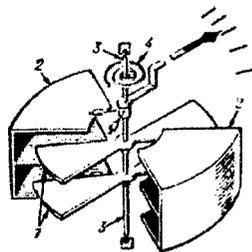


Рисунок 10

*ЭИП* электростатической системы используются для измерения постоянных и переменных напряжений.

Электростатические вольтметры обладают следующими достоинствами: незначительное потребление энергии; высокая степень точности; широкий диапазон рабочих частот; независимость измерений от изменений температуры, частоты и формы кривой напряжения, а также от внешних магнитных полей; широкий диапазон измерения.

К недостаткам этих приборов можно отнести низкую чувствительность и влияние на показания *ЭИП* внешних электрических полей.

Аналоговые приборы постепенно вытесняются цифровыми, хотя они еще находят применение там, где важна низкая стоимость и не нужна высокая точность. Цифровые приборы в большинстве измерений более предпочтительны, так как они более точны, более удобны при снятии показаний и, в общем, более универсальны. Цифровые универсальные измерительные приборы ("мультиметры") и цифровые вольтметры применяются для измерения со средней и высокой точностью сопротивления постоянному току, а также постоянного и переменного напряжения и тока. Во всех цифровых измерительных приборах (кроме простейших) используются усилители и другие электронные блоки для преобразования входного сигнала в сигнал напряжения, который затем преобразуется в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (*АЦП*). Число, выражающее измеренное значение, выводится на светодиодный, вакуумный люминесцентный или жидкокристаллический индикатор (дисплей). Прибор обычно работает под управлением встроенного микропроцессора, причём в простых приборах микропроцессор объединяется с *АЦП* на одной интегральной схеме. Цифровые приборы хорошо подходят для работы с подключением к внешнему компьютеру. В некоторых видах измерений такой компьютер переключает измерительные функции прибора и даёт команды передачи данных для их обработки. Для самых точных измерений сопротивления и полного сопротивления (импеданса) существуют измерительные мосты и другие специализированные измерители. Для регистрации хода изменения измеряемой величины во времени применяются регистрирующие приборы – ленточные самописцы и электронные осциллографы (аналоговые и цифровые).

При практическом применении ЭИП необходимо определить их пригодность к предстоящему измерению той или иной величины. Данные о приборе указываются на их шкалах в виде условных обозначений, основные из которых приведены в таблице 1.

Таблица 1			
магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		горизонтальное положение шкалы	
магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом		вертикальное положение шкалы	
электромагнитный прибор		наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту, например 60°	
электродинамический прибор		направление ориентировки прибора в земном магнитном поле	
ферродинамический прибор		класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения	2
индукционный прибор		класс точности при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы	
магнитоиндукционный прибор		измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ	
электростатический прибор		нормальное (номинальное) значение частоты	50 Гц
термоэлектрический прибор с изолированным преобразователем и магнитоэлектрическим измерительным механизмом		измерение постоянного тока	—
выпрямительный прибор с магнитоэлектрическим измерительным механизмом		измерение переменного тока	—
защита от внешних магнитных полей		измерение постоянного и переменного тока	—
защита от внешних электростатических полей			—

Рядом со шкалой на лицевой стороне ЭИП указывают необходимые маркировочные признаки: единица измеряемой величины; класс точности; номер стандарта, в соответствии с которым прибор изготовлен; род тока и число фаз; система прибора; категория защищённости прибора от влияния внешних магнитных или электрических полей; группа прибора по условиям эксплуатации; рабочее положение прибора; испытательное напряжение прочности электрической изоляции токоведущих частей прибора; положение прибора относительно земного магнитного поля (если это влияет на его показания); номинальная частота тока (если она отличается от 50 Гц); год выпуска; тип (шифр); заводской номер и некоторые другие данные.

Итак, измерение электрических величин, таких как напряжение, сопротивление, ток, мощность и др., производятся с помощью различных средств – измерительных приборов, схем и специальных устройств. Тип измерительного прибора зависит от вида и диапазона значений измеряемой величины, а также от требуемой точности измерения. Измерения делятся на *прямые* и *кос-*

венные. Прямые измерения дают результаты непосредственного отсчёта (например, измерения тока амперметром, напряжения – вольтметром, мощности – ваттметром и т.д.). Косвенные измерения дают результат путём расчёта по данным, полученным прямым измерением (например, сопротивление участка цепи можно косвенно определить по закону Ома, выполнив прямые измерения тока и напряжения на этом участке).

Методы и средства электрических измерений (ЭИ) в цепях постоянного и переменного тока существенно различаются. В цепях переменного тока они зависят от частоты и характера изменения величин, а также от того, какие характеристики переменных электрических величин (мгновенные, действующие, максимальные или средние) измеряются. Для ЭИ в цепях постоянного тока наиболее широко применяют измерительные магнитоэлектрические приборы и цифровые измерительные устройства. Для ЭИ в цепях переменного тока – электромагнитные приборы, электродинамические приборы, индукционные приборы, электростатические приборы, выпрямительные электроизмерительные приборы, осциллографы, цифровые измерительные приборы. Некоторые из перечисленных приборов применяют для ЭИ как в цепях переменного, так и постоянного тока.

ЭИ тока и напряжения обычно выполняют прямым измерением, причём схемы включения приборов не зависят от рода тока в цепи (амперметр включается последовательно с нагрузкой, вольтметр – параллельно). Однако при этом следует обращать внимание на род тока цепи, в которой должен использоваться прибор (указывается на шкале). Также при значительном разбросе измеряемых величин целесообразно применять многопредельный ЭИП или дополнительные средства измерения: для амперметров – шунты в цепи постоянного тока (рис. 3) и трансформаторы тока в цепи переменного тока (рис. 5), для вольтметров – добавочные резисторы в цепи постоянного тока (рис. 4) и трансформаторы напряжения в цепи переменного тока (рисунок 6).

Для измерения мощности в цепях постоянного и активной мощности переменного однофазного тока применяют электродинамические и ферродинамические ваттметры, схема включения которых была рассмотрена выше (рисунок 8). Для измерений мощности при больших токах и напряжениях ваттметры обычно включают через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Находят применение также косвенные методы измерения мощности постоянного и однофазного переменного тока. Мощность постоянного тока можно определить с помощью двух приборов: амперметра и вольтметра (рис. 11, а), а мощность однофазного переменного тока – с помощью трёх приборов: амперметра, вольтметра и фазометра (рис. 11, б).

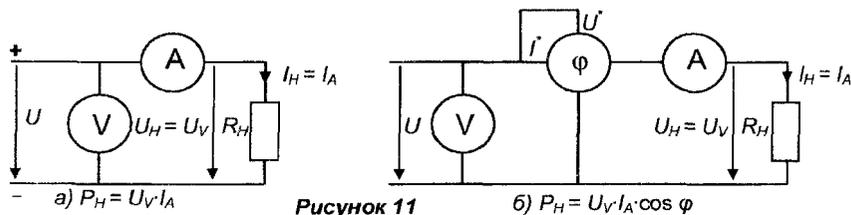


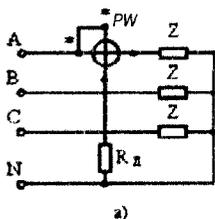
Рисунок 11

Активная мощность в цепи трёхфазного тока может быть измерена с помощью одного, двух и трёх ваттметров.

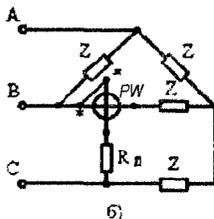
*Метод одного ваттметра* применяют при симметричной нагрузке. Активная мощность всей системы равна утроенной мощности потребления одной из фаз. При соединении нагрузки звездой с доступной нулевой точкой или, если при соединении нагрузки треугольником имеется возможность включить обмотку ваттметра последовательно с нагрузкой, можно использовать схемы включения, показанные на рисунках 12, а и 12, б соответственно.

Для измерения реактивной мощности токовые концы ваттметра включают в рассечку любой фазы, а концы обмотки напряжения – на две другие фазы (рисунок 13). Полная реактивная мощность определяется умножением показания ваттметра на корень из трёх.

*Метод двух ваттметров* используется при симметричной и несимметричной нагрузке фаз.



а)



б)

Рисунок 12

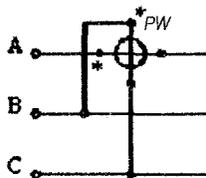
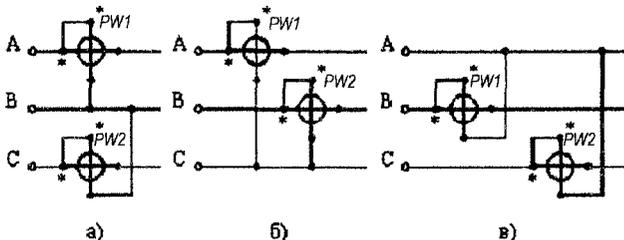


Рисунок 13

На рисунке 14 показаны равноценные варианты включения ваттметров для измерения активной мощности. Активная мощность для всех схем определяется как результат суммирования показаний ваттметров.



а)

б)

в)

Рисунок 14

При измерении реактивной мощности можно применять схему, показанную на рисунке 15,а с искусственной нулевой точкой. Для создания нулевой точки необходимо выполнить условие равенства сопротивлений обмоток ваттметров и резистора  $R$ . Реактивная мощность вычисляется по формуле:

$$Q = \sqrt{3}(P_{W1} + P_{W2}),$$

где  $P_{W1}$  и  $P_{W2}$  – показания ваттметров.

По этой же формуле можно вычислить реактивную мощность при равномерной нагрузке фаз и соединении ваттметров по какой-либо из схем на ри-

сунке 14. Достоинство этого способа в том, что по одной и той же схеме можно определить активную и реактивную мощности. При равномерной нагрузке фаз реактивная мощность может быть измерена по схеме на рисунке 15, б.

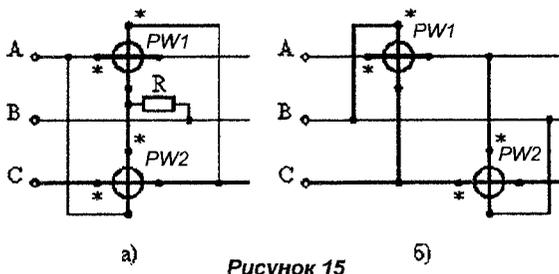


Рисунок 15

Метод трёх ваттметров применяется при любой нагрузке фаз. Активная мощность может быть измерена по одной из схем на рисунке 16. Мощность всей цепи определяется суммированием показаний всех ваттметров.

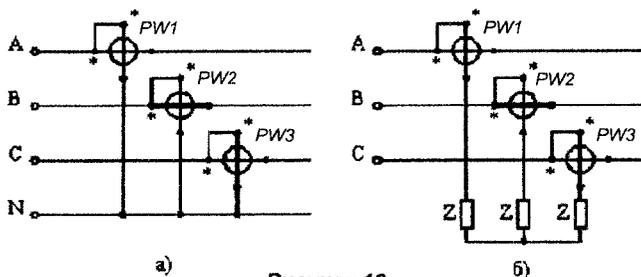


Рисунок 16

Реактивная мощность для трёх- и четырёхпроводной сети измеряется по схеме на рисунке 17 и вычисляется по формуле:

$$Q = (P_{WA} + P_{WB} + P_{WC})/\sqrt{3},$$

где  $P_{WA}$ ,  $P_{WB}$ ,  $P_{WC}$  – показания ваттметров, включённых в фазы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . На практике обычно применяют одно-, двух- и трёхэлементные трёхфазные ваттметры соответственно методу измерения.

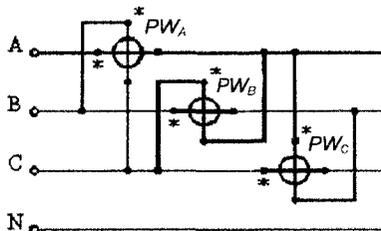


Рисунок 17

### **Последовательность выполнения работы**

1. Изучить устройства, принцип работы измерительных приборов различных систем и методики измерения параметров электрических цепей.
2. Провести ознакомительный осмотр измерительного прибора, указанного преподавателем, с целью определения его типа и основных паспортных (номинальных) данных.
3. Предложить способ расширения пределов измерения (до заданного значения) рассматриваемого прибора и составить соответствующую электрическую схему цепи.
4. Приступить к оформлению отчёта по лабораторной работе.

### **Содержание отчёта**

1. Результаты выполнения п. 2, а именно: назначение прибора и измеряемая им величина; цена деления шкалы прибора; устройство и принцип работы измерительной системы прибора; схема включения прибора в электрическую цепь; рабочее положение прибора; электрическая прочность изоляции; класс точности.
2. Результаты выполнения п. 3.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение электроизмерительного прибора.
2. Приведите классификацию электроизмерительных приборов.
3. Объясните устройство и принцип работы электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы.
4. Объясните устройство и принцип работы электроизмерительных приборов электромагнитной системы.
5. Объясните устройство и принцип работы электроизмерительных приборов электродинамической системы.
6. Объясните устройство и принцип работы электроизмерительных приборов индукционной системы.
7. Назовите и расшифруйте условные обозначения, применяемые для маркировки электроизмерительных приборов.
8. Перечислите основные способы расширения пределов измерения приборов.

### **Литература [1, 2, 3]**

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.1

### Тема. Однофазные цепи переменного тока с последовательным соединением элементов

**Цель:** экспериментальное исследование однофазных цепей переменного тока с последовательным соединением элементов и практическое определение их параметров.

#### Основные сведения

В цепях постоянного тока все проводники обладают электрическим сопротивлением, которое принято называть омическим. В цепях переменного тока имеют место следующие виды сопротивлений: *активное* –  $R$ ; *реактивное* –  $X$  и *полное* –  $Z$ . Геометрическую интерпретацию связи между ними даёт *треугольник сопротивлений* (рисунок 18), из которого следуют соотношения:

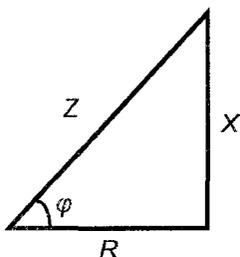


Рисунок 18

$$R = Z \cdot \cos \varphi; X = Z \cdot \sin \varphi;$$
$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

*Активным сопротивлением* обладают элементы, в которых электрическая энергия необратимо преобразуется в тепловую, световую, механическую и т.д. (резисторы, лампы накаливания, электронагревательные приборы и др.). *Реактивным сопротивлением* обладают элементы, способные запасать энергию в магнитном или электрическом полях, например катушки индуктивности и конденсаторы. По своей физической природе реактивное сопротивление отличается от активного, и оно обусловлено влиянием магнитного и электрического полей, связанных с целью.

При постоянном токе магнитный поток, создаваемый катушкой индуктивности, в установившемся режиме постояен, сопротивление катушки невелико, так как обусловлено только омическим сопротивлением провода обмотки. При переменном токе магнитный поток в катушке изменяется во времени, и согласно закону электромагнитной индукции в катушке индуцируется э.д.с. противоиндукции, препятствующая изменению тока. За счёт этой э.д.с. катушка индуктивности оказывает противодействие переменному току, характеризующееся величиной *индуктивного сопротивления*:

$$X_L = \omega \cdot L,$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая (циклическая) частота переменного тока;  $L$  – индуктивность.

При постоянном напряжении заряд конденсатора постояен:

$$q = C \cdot U,$$

где  $C$  – ёмкость конденсатора.

Активное сопротивление конденсатора бесконечно велико за счёт прослойки диэлектрика между его обкладками. Переменное напряжение создаёт изменяющийся во времени заряд, и в диэлектрике возникает ток смещения  $i = \frac{dq}{dt}$ . Противодействие конденсатора переменному току характеризуется величиной *ёмкостного сопротивления*:

$$X_C = 1/(\omega \cdot C).$$

В отличие от активного индуктивное и ёмкостное сопротивления не связаны с преобразованием электрической энергии в энергию другого вида, за что получили название реактивных.

В общем случае, когда участок цепи содержит последовательно соединённые индуктивность и ёмкость, его реактивное сопротивление равно разности индуктивного и ёмкостного сопротивлений:

$$X = X_L - X_C.$$

Реактивное сопротивление – величина алгебраическая, и его знак определяется тем, какое из сопротивлений (индуктивное или ёмкостное) преобладает. При  $X_L > X_C$  величина  $X$  положительна, при  $X_L < X_C$  – отрицательна.

При заданном напряжении действующее значение тока определяется формулой:

$$I = U/Z,$$

выражающей закон Ома для участка цепи переменного тока.

Энергетические процессы в цепях переменного тока имеют особенности по сравнению с цепями постоянного тока. Помимо необратимого преобразования электрической энергии в энергию другого вида, в них наблюдается процесс обратимого преобразования электрической энергии. При возрастании синусоидального тока (а следовательно, и магнитного потока) в индуктивности электрическая энергия преобразуется и накапливается в виде энергии магнитного поля, которая достигает максимума при максимальном значении тока. При убывании тока энергия магнитного поля преобразуется в электрическую и возвращается в цепь, т.е. происходит периодический обмен энергией между магнитным полем индуктивности и цепью. Подобное преобразование электрической энергии в энергию электрического поля наблюдается в ёмкости при приложенном синусоидальном напряжении. При возрастании напряжения конденсатор потребляет энергию (заряжается) из цепи, запасая её в электрическом поле. При убывании напряжения конденсатор, разряжаясь, отдаёт энергию обратно в цепь.

При анализе энергетических процессов в цепях переменного тока используются четыре понятия мощности:

- *Мгновенная мощность:*

$$p = u \cdot i,$$

где  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ ,  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  – мгновенные значения напряжения и тока, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону.

Мгновенная мощность даёт значение мощности, потребляемой участком цепи в произвольный момент времени.

- *Активная мощность:*

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = I^2 \cdot R,$$

где  $U = U_m/\sqrt{2}$  и  $I = I_m/\sqrt{2}$  действующие значения напряжения и тока;  $\varphi = \psi_u - \psi_i$  – сдвиг по фазе между напряжением и током;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности. Активной мощностью оценивается средняя за период скорость необратимого преобразования электрической энергии в энергию другого вида. Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

- *Реактивная мощность:*

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = I^2 \cdot X.$$

Понятие реактивной мощности, применяется для оценки процессов обмена энергией между электрическим и магнитным полями участка цепи и внешней цепью. Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (*вар*).

• *Полная мощность:*

$$S = U \cdot I = I^2 \cdot Z.$$

Полной мощностью называют расчётную величину, характеризующую пропускную способность участка цепи. Полная мощность измеряется в вольт-амперах (*ВА*).

*Коэффициент мощности*  $\cos \varphi$  показывает, в какой степени используется пропускная способность участка цепи.

Активная, реактивная и полная мощности связаны соотношениями, которые следуют из *треугольника мощностей* (рис. 19) подобного треугольнику сопротивлений:

$$P = S \cdot \cos \varphi; Q = S \cdot \sin \varphi; S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

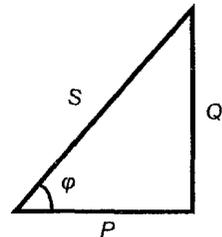


Рисунок 19

Значения активной, реактивной, полной мощностей и параметров участка цепи могут быть экспериментально определены с помощью ваттметра, амперметра и вольтметра, включенных по схеме, показанной на рис. 20 (ваттметр измеряет активную мощность, амперметр и вольтметр – действующие значения

тока и напряжения). Используя показания приборов, можно рассчитать остальные параметры по формулам:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}; \varphi = \arccos \frac{P}{U \cdot I}; Z = \frac{U}{I};$$

$$R = \frac{P}{I^2}; X = Z \cdot \sin \varphi; S = U \cdot I;$$

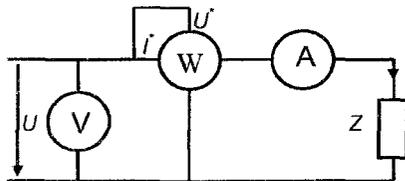


Рисунок 20

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi.$$

Анализ цепей переменного тока, как правило, сопровождается построением *векторной диаграммы*, представляющей совокупность векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся во времени токи и напряжения. При построении векторной диаграммы длины векторов берут равными (в принятых масштабах) действующим значениям величин, а углы между ними – соответствующим сдвигам фаз.

Резистор представляет собой активную нагрузку, так как влияние индуктивности и ёмкости в нём настолько мало, что им можно пренебречь. Ток в активном сопротивлении и напряжение на нём совпадают по фазе, т.е. угол сдвига фаз:  $\varphi_R = \arctg \frac{0}{R} = 0^\circ$ . На векторной диаграмме для участка цепи, содержащего резистор (рисунок 21), векторы тока и напряжения сонаправлены.

Реальная катушка индуктивности – нагрузка активно-индуктивного характера, так как вследствие потерь мощности на нагрев провода обмотки она обладает помимо индуктивного сопротивления  $X_L$  активным сопротивлением  $R_L$ . Угол сдвига фаз между током в катушке индуктивности и напряжением на ней:  $\varphi_K = \arctg \frac{X_L}{R_L} > 0^\circ$ , т.е. ток в индуктивности отстаёт от напряжения на ней. На векторной диаграмме для участка цепи, содержащего катушку индуктивности (рисунок 22), вектор напряжения повернут относительно вектора тока против часовой стрелки на угол  $\varphi_K$ .

В реальном конденсаторе при низких частотах ( $\leq 50$  Гц) практически отсутствуют потери мощности, и его можно рассматривать как ёмкостную нагрузку. Угол сдвига фаз между током в конденсаторе и напряжением на нём  $\varphi_C = \arctg \frac{-X_C}{0} = -90^\circ$ , т.е. ток в конденсаторе опережает напряжение на угол  $90^\circ$ . На векторной диаграмме для участка цепи, содержащего конденсатор (рис. 23), вектор напряжения повернут относительно вектора тока по часовой стрелке на угол  $90^\circ$ .

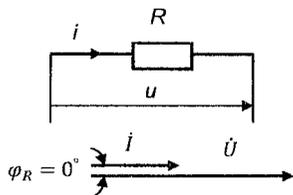


Рисунок 21

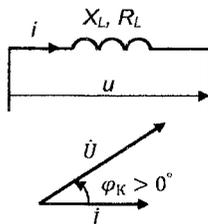


Рисунок 22

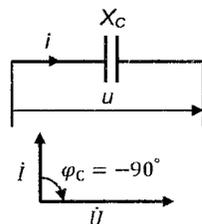


Рисунок 23

Качественная векторная диаграмма для цепи, содержащей последовательно соединённые катушку индуктивности и резистор, представлена на рис. 24.

После выбора масштаба по току ( $M_I = \dots$  А/см) и масштаба по напряжению ( $M_U = \dots$  В/см) начинают построение диаграммы с вектора тока, так как при последовательном соединении элементов на всех участках цепи ток один и тот же. Затем, в принятом масштабе строят векторы напряжений на резисторе  $\dot{U}_R$ , на катушке  $\dot{U}_K$ , используя при этом значения углов сдвига фаз для этих участков. Напряжение на входных зажимах в соответствии со вторым законом Кирхгофа должно удовлетворять условию:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_K.$$

Положение концов векторов  $\dot{U}_K$  и  $\dot{U}$  можно определить способом засечек. Угол  $\varphi$  есть сдвиг по фазе между напряжением и током на входе цепи. Аналогично строится векторная диаграмма для цепи, содержащей последовательно соединённые резистор и конденсатор.

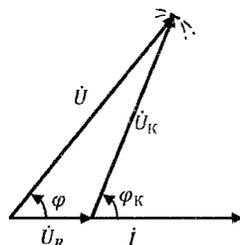
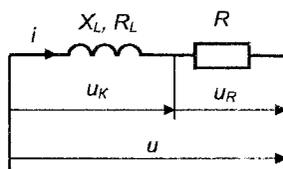


Рисунок 24

### Последовательность выполнения работы

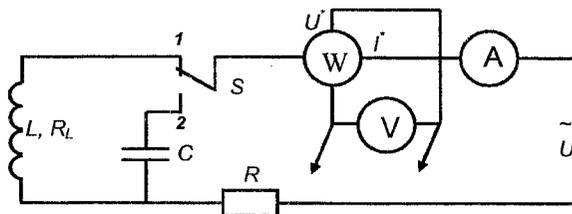


Рисунок 25

1. Собрать на лабораторном стенде схему исследуемой цепи (рисунок 25).
2. Поставив переключатель  $S$  в положение **1**, измерить значения тока, напряжения и активной мощности на отдельных участках (катушке индуктивности и резисторе) и для всей цепи в целом.
3. Поставив переключатель  $S$  в положение **2**, измерить значения тока, напряжения и активной мощности на отдельных участках (конденсаторе и резисторе) и для всей цепи в целом.
4. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ цепи	Участок эл. цепи	Измерено			Вычислено						
		$I$ [А]	$U$ [В]	$P$ [Вт]	$\cos \varphi$	$\varphi$	$Z$ [Ом]	$R$ [Ом]	$X$ [Ом]	$Q$ [ВАр]	$S$ [ВА]
<b>1</b>	с резистором										
	с катушкой индуктивности										
	вся цепь										
<b>2</b>	с резистором										
	с конденсатором										
	вся цепь										

5. Вычислить значения величин, указанных в таблице 2.
6. Построить в масштабах векторные диаграммы для каждой из исследованных электрических цепей.
7. Приступить к оформлению отчёта по лабораторной работе.

### Содержание отчёта

1. Схема исследуемой электрической цепи (рисунок 25).
2. Таблица измеренных и рассчитанных величин (таблица 2).
3. Количественные векторные диаграммы для двух исследованных электрических цепей.

### Контрольные вопросы

1. Назовите параметры, характеризующие пассивный участок цепи переменного тока.
2. Объясните наличие у катушки индуктивности активного сопротивления. Объясните физический смысл индуктивного сопротивления.
3. Объясните особенности энергетических процессов в цепях переменного тока.
4. Назовите четыре понятия мощности, применяемые при анализе энергетических процессов в цепях переменного тока.
5. Как экспериментально можно определить параметры участка цепи?
6. Объясните порядок построения векторных диаграмм для цепей с последовательным соединением элементов.

**Литература** [1, 4]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.2

### Тема. Резонанс в неразветвлённой цепи переменного тока

**Цель:** экспериментальное исследование неразветвлённой цепи переменного тока с последовательным соединением индуктивного и ёмкостного элементов и практическое достижение в ней резонанса напряжений.

#### Основные сведения

Электрическим резонансом называют состояние участка электрической цепи переменного тока, содержащей индуктивные и ёмкостные элементы, при котором напряжение на его зажимах и ток в нём совпадают по фазе. То есть основным признаком резонанса в электрических цепях является равенство нулю разности фаз (угла сдвига фаз) напряжения и тока:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0,$$

где  $\psi_u$  и  $\psi_i$  – начальные фазы напряжения и тока на входе цепи соответственно.

Резонанс в цепи с последовательным соединением элементов, параметры которых  $R$ ,  $L$  и  $C$  называют резонансом напряжений. Активное сопротивление  $R$ , показанное на схеме (рисунок 26) отдельно, может быть как сопротивлением резистора, так и сопротивлением проводов катушки индуктивности. Основной признак резонанса  $\varphi = \arctg \frac{X}{R} = 0$ , в этой цепи будет наблюдаться при равенстве реактивного сопротивления нулю  $X = X_L - X_C = 0$ , т.е. условием резонанса напряжений является равенство  $X_L = X_C$ , или  $\omega L = 1/(\omega C)$ .

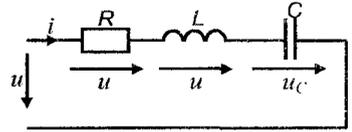


Рисунок 26

Состояния резонанса напряжений можно достичь изменением частоты  $f$  питающего напряжения (тока), индуктивности  $L$  или ёмкости  $C$ , что следует из условия резонанса напряжений.

Резонансными кривыми называют зависимости тока  $I$  и напряжений  $U_L$  и  $U_C$  от частоты  $f$ . Из формы этих кривых (рис. 27) видно, что одинаковые максимальные значения напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности принимают при разных частотах, не совпадающих с резонансной.

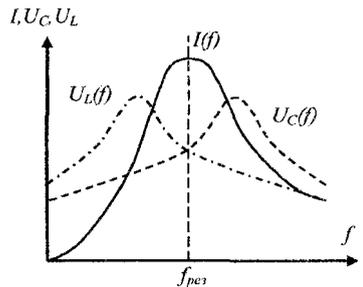


Рисунок 27

Режиму резонанса напряжений характерны следующие признаки:

- Полное сопротивление цепи

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R,$$

т.е. цепь имеет активный характер.

- Цепь потребляет активную мощность

$P = I_{\text{рез}}^2 \cdot R$ , которая (при равенстве реактивных мощностей  $Q_L = Q_C$ ) также максимальна.

- Коэффициент мощности  $\cos \varphi_{\text{рез}} = 1$ , поскольку в состоянии резонанса угол сдвига фаз между напряжением и током равен нулю:  $\varphi_{\text{рез}} = 0$ .

- Ток в цепи согласно закону Ома  $I_{\text{рез}} = \frac{U}{Z_{\text{рез}}} = \frac{U}{R}$ , принимает максимальное значение.

• Реактивная составляющая напряжения на катушке индуктивности  $U_L = I_{\text{рез}} \cdot X_L$  равна напряжению на конденсаторе  $U_C = I_{\text{рез}} \cdot X_C$ . Активная составляющая напряжения  $U_R = I_{\text{рез}} \cdot R = U$  равна напряжению на зажимах участка, причём, если  $R \ll X_L = X_C$ , напряжения на реактивных элементах цепи значительно (в разы) превышают значение приложенного напряжения ( $U_L \gg U$  и  $U_C \gg U$ ), что иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 28.

Из изложенного выше следует, что резонанс напряжений в электроэнергетических устройствах – явление нежелательное из-за скачков тока и напряжений на отдельных участках цепи опасных как для самих устройств (перегрев проводников и пробой изоляции), так и для обслуживающего их персонала. Однако несмотря на это резонанс напряжений широко используется во многих областях техники (измерительной и радиотехнике, связи, автоматике и др.).

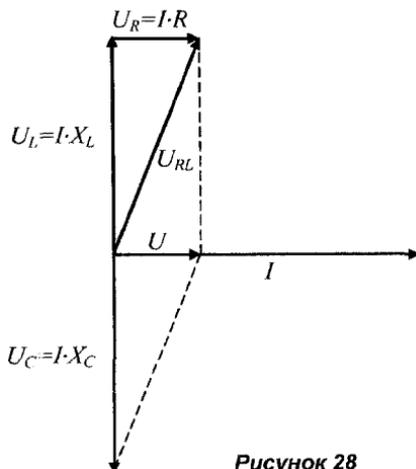


Рисунок 28

### Последовательность выполнения работы

1. Собрать на лабораторном стенде схему исследуемой цепи (рис. 29).

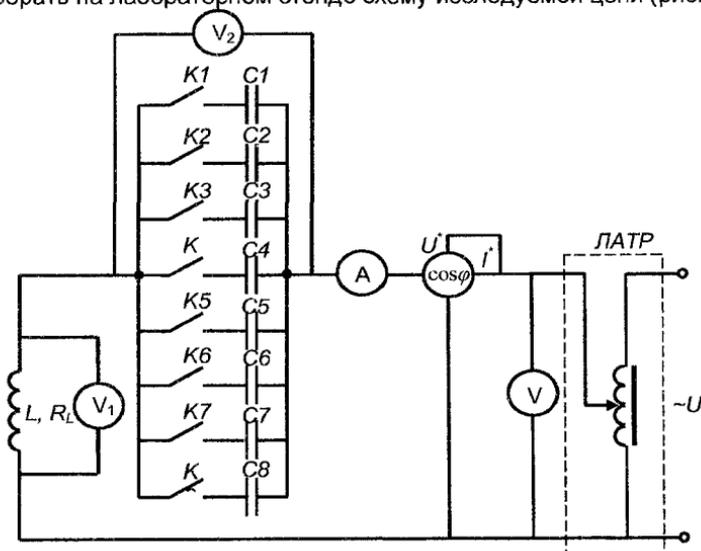


Рисунок 29

2. Включить в цепь, замкнув на стенде контакт  $K_4$ , минимальную ёмкость ( $C = 2 \text{ мкФ}$ ) батареи конденсаторов.

3. Подать на вход цепи с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТРА) напряжение  $U = 40 \text{ В}$ .

4. Поддерживая неизменным входное напряжение, увеличивать ёмкость батареи конденсаторов на  $2 \text{ мкФ}$  до максимального значения ( $34 \text{ мкФ}$ ). При этом измеренные в каждом случае значения тока, напряжения и коэффициента мощности занести в таблицу 3.

Таблица 3

Номер ступени батареи конденсаторов	Ёмкость батареи конденсаторов, мкФ	$I$ , А	$U$ , В	$U_{RL}$ , В	$U_C$ , В	$\cos \varphi$

5. По данным таблицы 3 построить графики зависимостей

$$I = f(C), U_C = f(C), U_{RL} = f(C).$$

6. По данным эксперимента построить в выбранных масштабах векторные диаграммы для трёх состояний цепи – до резонанса, близкого к резонансу и после резонанса.

*Примечание.* Построение векторной диаграммы для неразветвлённой цепи удобнее начинать с вектора тока  $\dot{I}$ , который одинаков во всех участках. Затем из начала вектора  $\dot{I}$  под углом  $90^\circ$  по ходу часовой стрелки откладывают вектор  $\dot{U}_C$  (т.к. напряжение на конденсаторе отстаёт от тока на четверть периода:  $\varphi_C = \pi/2$ ). Напряжение  $\dot{U}_{RL}$  на катушке индуктивности опережает ток на угол  $\varphi_{RL} = \arctg \frac{X_L}{R}$ . Но так как величина этого угла в нашем случае не известна, то исходя из того, что согласно второму закону Кирхгофа  $\dot{U} = \dot{U}_C + \dot{U}_{RL}$  (т.е. векторы  $\dot{U}_C$ ,  $\dot{U}_{RL}$  и  $\dot{U}$  образуют треугольник напряжений), положение векторов  $\dot{U}_{RL}$  и  $\dot{U}$  определяют методом засечек (рис. 30).

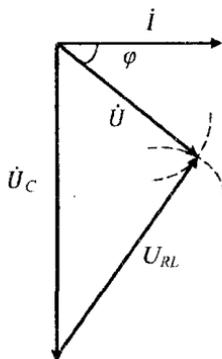


Рисунок 30

Очевидно, что до резонанса  $X_C > X_L$ , следовательно,  $\dot{U}_C > \dot{U}_{RL}$  и  $\varphi < 0$ , т.е. напряжение  $\dot{U}$  на входе цепи отстаёт от тока  $\dot{I}$ . В резонансе  $X_C = X_L$ ,  $\dot{U}_C = \dot{U}_{RL}$  и  $\varphi = 0$ , т.е. напряжение  $\dot{U}$  и ток  $\dot{I}$  на входе цепи синфазны. После резонанса  $X_C < X_L$ ,  $\dot{U}_C < \dot{U}_{RL}$ ,  $\varphi > 0$  и напряжение  $\dot{U}$  опережает ток  $\dot{I}$ .

### Содержание отчёта

1. Схема исследуемой электрической цепи (рисунок 29).
2. Таблица измеренных величин (таблица 3).
3. Графики зависимостей  $I = f(C)$ ,  $U_C = f(C)$ ,  $U_{RL} = f(C)$ .
4. Векторные диаграммы для трёх состояний цепи – до резонанса, близкого к резонансу и после резонанса.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение электрического резонанса.
2. В каких цепях можно наблюдать резонанс напряжений и каково условие его возникновения?
3. Как практически можно добиться резонанса напряжений?
4. Назовите основные признаки резонанса напряжений.
5. Поясните, почему при резонансе напряжений ток в цепи принимает максимальное значение?
6. Почему состояние резонанса напряжений является опасным и какие его особенности используются в технике?

Литература [1, 4]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.3

### Тема. Резонанс в разветвлённой цепи переменного тока

**Цель:** экспериментальное исследование разветвлённой цепи переменного тока с параллельным соединением индуктивного и ёмкостного элементов и практическое достижение в ней резонанса токов.

#### Основные сведения

Резонанс в разветвлённой цепи переменного тока с параллельным соединением индуктивного и ёмкостного элементов называют **резонансом токов**.

Рассмотрим разветвлённую цепь переменного тока с двумя параллельными ветвями (рис. 31), содержащими элементы с параметрами  $R_1, L, R_2, C$  и полными сопротивлениями

$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ ,  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$  соответственно, где  $X_1 = 2\pi fL$  – реактивное сопротивление катушки индуктивности,  $X_2 = 1/(2\pi fC)$  – реактивное сопротивление конденсатора, а  $f$  – частота питающего напряжения. В рассматриваемой цепи напряжения на первой и второй ветвях одинаковы и равны напряжению  $\dot{U}$  на входных зажимах. Согласно первому закону Кирхгофа ток  $\dot{i}$  в неразветвлённой части цепи равен  $\dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2$ , где  $\dot{i}_1 = U \cdot Y_1$  – ток в первой ветви,  $\dot{i}_2 = U \cdot Y_2$  – ток во второй ветви,  $Y_1 = \sqrt{G_1^2 + B_1^2}$  – полная проводимость первой ветви,  $G_1 = R_1/Z_1^2$  – активная проводимость первой ветви,  $B_1 = X_1/Z_1^2$  – реактивная проводимость первой ветви,  $Y_2 = \sqrt{G_2^2 + B_2^2}$  – полная проводимость второй ветви,  $G_2 = R_2/Z_2^2$  – активная проводимость второй ветви,  $B_2 = X_2/Z_2^2$  – реактивная проводимость второй ветви. Токи в цепи имеют по две составляющих – активную и реактивную. Ток, текущий в первой ветви,  $\dot{i}_1 = \dot{i}_{1a} + \dot{i}_{1p}$ , где  $\dot{i}_{1a} = U \cdot G_1 = U \cdot R_1/Z_1^2$  – активная составляющая тока, совпадающая по фазе с напряжением,  $\dot{i}_{1p} = U \cdot B_1 = U \cdot X_1/Z_1^2$  – реактивная (индуктивная) составляющая, отстающая от напряжения на четверть периода (т.е. на угол  $\pi/2$ ).

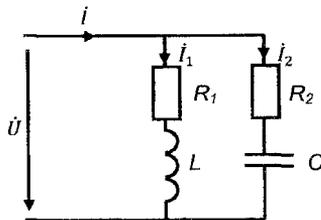


Рисунок 31

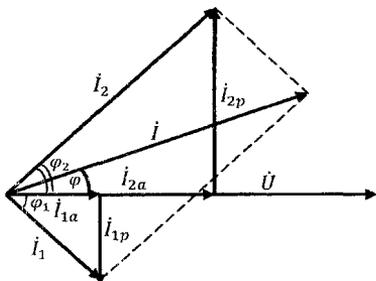


Рисунок 32

Ток, протекающий во второй ветви,  $\dot{i}_2 = \dot{i}_{2a} + \dot{i}_{2p}$ , где  $\dot{i}_{2a} = U \cdot G_2 = U \cdot R_2/Z_2^2$  – активная составляющая тока, совпадающая по фазе с напряжением,  $\dot{i}_{2p} = U \cdot B_2 = U \cdot X_2/Z_2^2$  – реактивная (ёмкостная) составляющая, опережающая напряжение на четверть периода. Качественная векторная диаграмма рассматриваемой цепи показана на рисунке 32. Из диаграммы видно, что ток  $\dot{i}$  в неразветвлённой части цепи опережает напряжение на угол  $\varphi < 0$ , что свидетельствует о преобладании ёмкостной на

грузки, т.е.  $B_2 > B_1$ . Очевидно, что при  $B_2 < B_1$ , ток  $\dot{i}$  будет отставать от напряжения на угол  $\varphi > 0$ . При равенстве индуктивной и ёмкостной проводимостей ветвей ( $B_{1L} = B_{2C}$ ) ток и напряжение на входе цепи будут совпадать по фазе ( $\varphi = 0$ ), что соответствует резонансному состоянию цепи. Т.о., равенство ин-

дуктивной и ёмкостной проводимостей ветвей  $B_{1L} = B_{2C}$  является условием возникновения резонанса токов.

Из условия резонанса токов следует, что добиться его можно изменением параметров элементов ( $R, L, R_2, C$ ) или изменением частоты  $f$  питающего напряжения.

Режиму резонанса токов характерны следующие признаки:

- Так как  $\varphi_{рез} = 0$ ,  $\cos \varphi_{рез} = 1$ , общее сопротивление цепи активное, то полная проводимость  $Y_{рез} = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_{1L} - B_{2C})^2} = G_1 + G_2 = G_3$  рассматриваемой цепи имеет минимальное значение, а сопротивление  $Z_{рез} = 1/Y_{рез} = 1/G_3 = R_3$  – максимальное.

- Ток  $\dot{I}_{рез} = U/Z_{рез} = U/R_3$  в неразветвлённой части цепи становится минимальным.

- Поскольку  $B_{1Lрез} = B_{2Cрез}$ , реактивные составляющие токов ветвей равны и противоположны, т.е.  $\dot{I}_{1p} = -\dot{I}_{2p}$ , то реактивная составляющая тока на входе цепи  $\dot{I}_p = 0$ .

- Так как  $Q_L = U^2 \cdot B_L$  и  $Q_C = U^2 \cdot B_C$ , то очевидно равны реактивные мощности  $Q_L = Q_C$ . Это означает, что в нашем случае, как и при резонансе напряжений, между катушкой индуктивности и конденсатором происходит обмен энергией, в котором источник питания не участвует. Энергия источника расходуется на восполнение потерь в активных сопротивлениях цепи.

Таким образом, можно отметить, что резонанс токов, в отличие от резонанса напряжений, – явление безопасное для электроэнергетических установок. Большие токи в ветвях при резонансе токов возникают лишь в случае больших реактивных проводимостей ( $B_L = B_C \gg G_3$ ) ветвей, т.е. при больших ёмкостях конденсаторов и малых индуктивностях катушек. С точки зрения передачи электроэнергии режим близкий к резонансу токов является благоприятным, так как при нём снижаются тепловые потери, повышаются коэффициент мощности и к.п.д. электроустановок.

### Последовательность выполнения работы

1. Собрать на лабораторном стенде схему исследуемой цепи (рисунок 33).

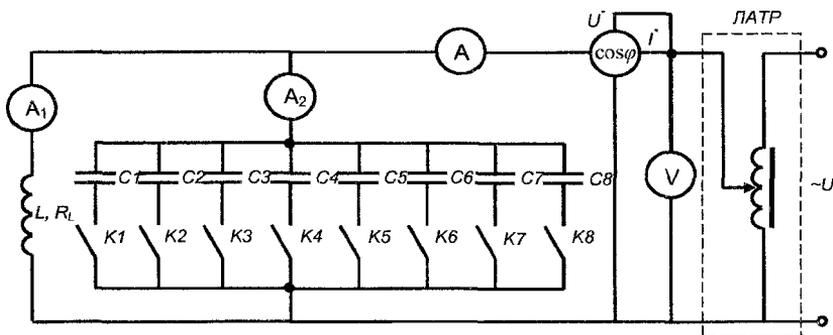


Рисунок 33

2. Включить в цепь минимальную ёмкость ( $C = 1 \text{ мкФ}$ ) батареи конденсаторов, замкнув на стенде контакт  $K4$ .

3. Подать на вход цепи с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТРА) напряжение  $U = 150 \text{ В}$ .

4. Поддерживая неизменным входное напряжение, увеличивать ёмкость батареи конденсаторов на  $1 \text{ мкФ}$  до максимального значения ( $34 \text{ мкФ}$ ). При этом измеренные в каждом случае значения напряжения, тока и коэффициента мощности занести в таблицу 4.

Таблица 4

Номер ступени батареи конденсаторов	Ёмкость батареи конденсаторов, мкФ	$U$ , В	$I$ , А	$I_{RL}$ , А	$I_C$ , А	$\cos \varphi$

5. По данным таблицы 3 построить графики зависимостей

$$I = f(C), \cos \varphi = f(C).$$

6. Построить по данным эксперимента в масштабах векторные диаграммы для 3 состояний цепи – до резонанса, близкого к резонансу и после резонанса.

Примечание. Построение векторной диаграммы для разветвлённой цепи удобнее начинать с вектора напряжения  $\dot{U}$ , которое одинаково на всех участках. Затем из начала вектора  $\dot{U}$  под углом  $90^\circ$  против хода часовой стрелки откладывают вектор  $\dot{I}_C$  (ток в ёмкости опережает напряжение на четверть периода:  $\varphi_C = -\pi/2$ ). Ток  $\dot{I}_{RL}$  в катушке индуктивности отстаёт от напряжения на угол  $\varphi_{RL} = \arctg \frac{X_L}{R}$ .

Но так как величина этого угла в нашем случае не известна, то исходя из того, что согласно первому закону Кирхгофа  $\dot{i} = \dot{i}_C + \dot{i}_{RL}$  (т.е. векторы  $\dot{i}_C$ ,  $\dot{i}_{RL}$  и  $\dot{i}$  образуют треугольник токов), положение векторов  $\dot{i}_{RL}$  и  $\dot{i}$  определяют методом засечек (рис. 34).

Очевидно, что до резонанса  $V_C > V_L$ , следовательно,  $\dot{i}_C < \dot{i}_{RL}$  и  $\varphi > 0$ , т.е. напряжение  $\dot{U}$  на входе цепи опережает ток  $\dot{i}$ . В резонансе  $V_C = V_L$ ,  $\dot{i}_C = \dot{i}_L$  и  $\varphi = 0$ , т.е. напряжение  $\dot{U}$  и ток  $\dot{i}$  на входе цепи синфазны. После резонанса  $V_C < V_L$ ,  $\dot{i}_C > \dot{i}_{RL}$ , а  $\varphi < 0$  и напряжение  $\dot{U}$  отстаёт от тока  $\dot{i}$ .

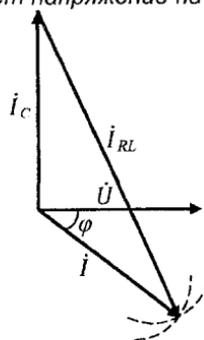


Рисунок 34

### Содержание отчёта

1. Схема исследуемой электрической цепи (рисунок 33).
2. Таблица измеренных величин (таблица 4).
3. Графики зависимостей  $I = f(C)$ ,  $\cos \varphi = f(C)$ .
4. Векторные диаграммы для трёх состояний цепи – до резонанса, близкого к резонансу и после резонанса.

### Контрольные вопросы

1. В каких цепях можно наблюдать резонанс токов и каково условие его возникновения?
2. Как практически можно добиться резонанса токов?
3. Назовите основные признаки резонанса токов.
4. Поясните, почему при резонансе токов ток в неразветвлённой части цепи принимает минимальное значение?
5. Какой характер нагрузки соответствует случаям:  $\dot{i}_C > \dot{i}_L$ ,  $\dot{i}_C < \dot{i}_L$ ,  $\dot{i}_C = \dot{i}_L$ .
6. Каким образом практически можно увеличить коэффициент мощности электроустановки?

Литература [1, 4]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.4

### Тема. Трёхфазные цепи с соединением электропотребителей по схеме "звезда"

**Цель:** экспериментальное исследование трёхфазной цепи переменного тока с электроприёмниками, соединёнными по схеме "звезда".

#### Основные сведения

В технике, кроме однофазных электрических цепей, широкое применение находят многофазные цепи. Под *симметричной многофазной электрической цепью* понимают совокупность электрических цепей, в которых действуют несколько э.д.с. с одинаковыми частотами и амплитудами, сдвинутыми по фазе относительно друг друга на определённые равные углы.

Практическое применение нашли симметричные двенадцати- и шестифазные системы – в выпрямителях (угол сдвига фаз между э.д.с. у них составляет соответственно  $30^\circ$  и  $60^\circ$ ), двухфазные – в автоматике (угол сдвига фаз между э.д.с.  $90^\circ$ ). Однако преимущественное распространение получила трёхфазная система (угол сдвига фаз между э.д.с.  $120^\circ$ ), которая повсеместно применяется в промышленности, сельском хозяйстве, при производстве и передаче электрической энергии.

Трёхфазная цепь состоит из трёх основных элементов: трёхфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трёхфазной системой э.д.с.; линии передачи со всем необходимым оборудованием; приёмников (потребителей), которые могут быть как трёхфазными (например, трёхфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания). В период зарождения трёхфазных систем имелись попытки использовать несвязанную систему, в которой фазы обмотки генератора не были электрически соединены между собой, и каждая фаза соединялась со своим приёмником двумя проводами. Такие системы не получили применения вследствие их неэкономичности: для соединения генератора с приёмником требовалось шесть проводов. Более совершенными и экономичными являются связанные цепи, в которых фазы обмотки электрически соединены между собой. Наиболее распространёнными являются соединения "звезда" и "треугольник".

Трёхфазные связанные цепи в зависимости от способа соединения фаз трёхфазных источников питания и трёхфазных потребителей электроэнергии могут быть трёхпроводными или четырёхпроводными.

Трёхпроводная трёхфазная цепь получается при соединении источника с приёмником тремя проводами, при этом способы соединения фаз источников и фаз потребителей в них могут быть различными.

Рассмотрим трёхпроводную цепь при соединении "звездой" как фазных обмоток источника, так и фаз приёмников (рисунки 35).

В такой цепи концы фаз источника соединяют в одну общую точку  $N$ , называемую *нейтральной точкой*. Аналогично концы фаз приёмников также соединяют в одну точку  $n$ .

Провода  $A-a$ ,  $B-b$  и  $C-c$ , соединяющие начала фаз источника и приёмника, называются *линейными*.

Обычно фазные э.д.с. трёхфазного источника имеют одинаковые амплитуды ( $E_{m1} = E_{m2} = E_{m3} = E_m$ ) и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один

и тот же угол  $120^\circ$ . Если э.д.с. одной фазы (например, фазы  $A$ ) принять за исходную и считать её начальной фазой равной нулю, то выражения комплексных значений фазных э.д.с. можно записать в виде:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{mA} &= E_m e^{j0^\circ} = E_m; \\ \dot{E}_{mB} &= E_m e^{j(0^\circ - 120^\circ)} = E_m e^{j(-120^\circ)}; \\ \dot{E}_{mC} &= E_m e^{j(0^\circ + 120^\circ)} = E_m e^{j120^\circ}.\end{aligned}$$

Такая система э.д.с. называется симметричной.

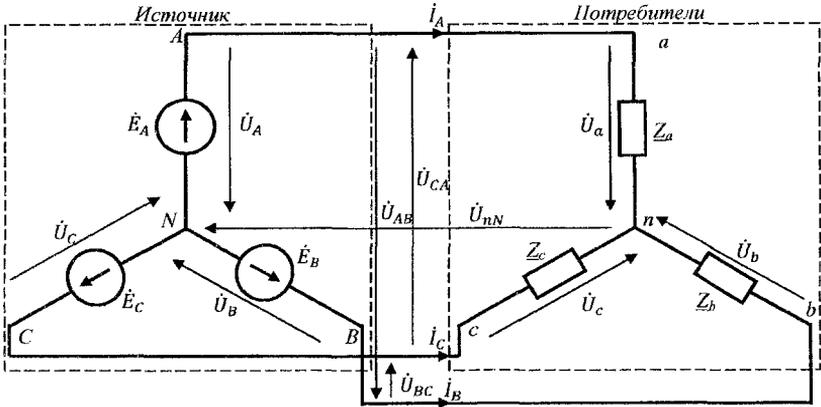


Рисунок 35

Полные фазные сопротивления приёмников:

$$Z_a = Z_a e^{j\varphi_a}; \quad Z_b = Z_b e^{j\varphi_b}; \quad Z_c = Z_c e^{j\varphi_c}.$$

Приёмники, имеющие равные по модулю ( $Z_a = Z_b = Z_c = Z_b$ ) и по характеру ( $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_\varphi$ ) сопротивления, создают так называемую *симметричную нагрузку*.

В трёхфазных цепях различают фазные и линейные напряжения. *Фазное напряжение*  $U_\varphi$  – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью ( $U_A, U_B, U_C$  – у источника;  $U_a, U_b, U_c$  – у приёмника). Если пренебречь потерями энергии в фазных обмотках источника, то можно считать, что фазные напряжения источника (согласно второму закону Кирхгофа) равны соответствующим фазным э.д.с., т.е.  $\dot{U}_A = \dot{E}_A$ ;  $\dot{U}_B = \dot{E}_B$ ;  $\dot{U}_C = \dot{E}_C$ .

*Линейное напряжение* ( $U_l$ ) – напряжение между линейными проводами ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ) или между одноимёнными выводами разных фаз источника (нагрузки).

В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений (рис. 35) уравнения по второму закону Кирхгофа, связывающие линейные и фазные напряжения источника имеют вид:  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ ;  $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$ ;  $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$ . Аналогично для нагрузки –  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_a - \dot{U}_b$ ;  $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_b - \dot{U}_c$ ;  $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_c - \dot{U}_a$ .

Согласно этим выражениям построена топографическая диаграмма (рисунок 36), из которой видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична, т.е.  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  равны по

величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$  и опережают соответственно векторы фазных напряжений ( $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ ) на угол  $30^\circ$ . Действующие значения линейных напряжений можно определить графически по векторной диаграмме или по формуле:

$$U_{л} = 2U_{\phi} \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_{\phi},$$

которая следует из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного напряжений (например  $-\dot{U}_A, \dot{U}_B$  и  $\dot{U}_{AB}$ ).

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

- **Фазные** ( $I_{\phi}$ ) – это токи в фазах генератора и приёмников.
- **Линейные** ( $I_{л}$ ) – токи в линейных проводах.

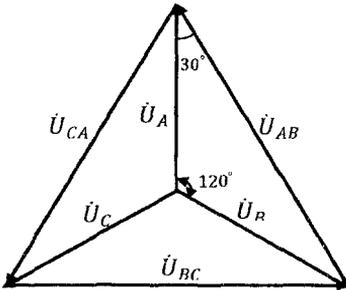


Рисунок 36

Из схемы на рисунке 35 видно, что при соединении “звездой” фазные и линейные токи равны  $I_{\phi} = I_{л}$ .

Фазные (они же линейные) токи рассчитываются по закону Ома:

$$i_a = \frac{u_a}{z_a} = I_A; \quad i_b = \frac{u_b}{z_b} = I_B; \quad i_c = \frac{u_c}{z_c} = I_C,$$

и при этом согласно первому закону Кирхгофа  $I_A + I_B + I_C = 0$ .

При симметричной нагрузке, если пренебречь сопротивлением проводов, действующие значения фазных напряжений приёмника и источника, можно считать одинаковыми и равными по модулю ( $U_A = U_a, U_B = U_b, U_C = U_c$ ). Очевидно, при этом будут равны и модули токов, поэтому для определения токов достаточно выполнить расчёт в одной фазе.

При несимметричной нагрузке между нейтральными точками  $n$  приёмника и  $N$  источника электроэнергии возникает напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$ , приводящее к перекосу фазных напряжений на приёмниках, как это видно на топографической диаграмме (рис. 37).

Анализируя диаграмму (рис. 37), не сложно увидеть, что изменение (уменьшение) тока  $i_a$ , вызванное изменением (увеличением) сопротивления фазы  $a$  нагрузки, вызвало такое изменение токов  $i_b$  и  $i_c$  двух других фаз, при котором алгебраическая сумма токов остаётся равной нулю. Причём, если сопротивления фаз  $b$  и  $c$  остаются неизменными, то изменение токов в них вызовет изменение (уменьшение) приложенных к ним напряжений  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ . На диаграмме (рисунок 37) точка  $n$  сместилась относительно точки  $N$ , а “звезда” фазных напряжений ( $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ ) нагрузки оказалась перекошенной и

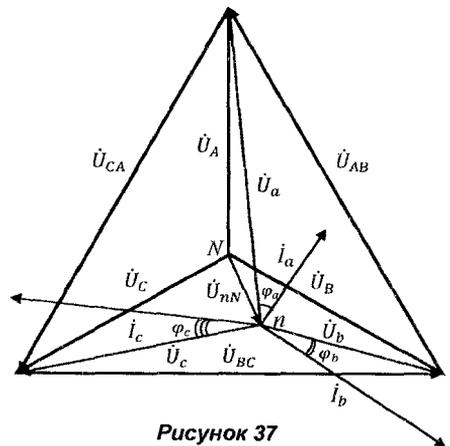


Рисунок 37

смещенной относительно “звезды” фазных напряжений ( $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ ) источника. То есть перераспределение фазных напряжений нагрузки при неизменных напряжениях источника привело к появлению напряжения  $U_{nN}$  между нулевыми точками приёмников и источника.

Поскольку схема (рисунок 35) представляет собой цепь с двумя узлами, то напряжение смещения нейтрали можно определить по формуле межузлового напряжения:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \dot{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \dot{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \dot{Y}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c},$$

где  $\dot{Y}_a = 1/Z_a$ ;  $\dot{Y}_b = 1/Z_b$ ;  $\dot{Y}_c = 1/Z_c$  – комплексы полных проводимостей фаз нагрузки.

Очевидно, что теперь напряжения на фазах приёмника будут отличаться друг от друга. Из второго закона Кирхгофа следует, что

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}.$$

В режиме несимметричной нагрузки приходится рассчитывать токи в каждой из фаз, при этом согласно первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Таким образом, нарушение симметрии нагрузки в трёхпроводной цепи приводит к нарушению симметрии напряжений на приёмниках. Одни приёмники оказываются под пониженным напряжением и не развивают номинальной мощности, другие – под повышенным напряжением, что может вызвать их повреждение. Поэтому трёхпроводные цепи используют относительно редко и только при симметричной трёхфазной нагрузке (например, трёхфазные электродвигатели, электропечи, трансформаторы и др.).

Четырёхпроводная трёхфазная цепь получается при соединении “звездой” как фазных обмоток источника, так и фаз приёмников, при этом нейтральные точки источника  $N$  и приёмника  $n$  соединяют проводом  $N - n$ , называемым *нейтральным* (рисунок 38), уравнивающим потенциалы точек  $N$  и  $n$ .

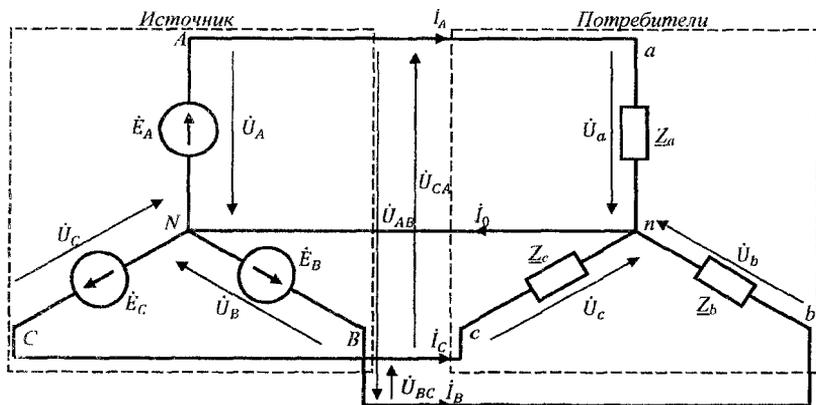


Рисунок 38

В этом случае напряжение смещения нейтрали  $U_{nN} = 0$  и перекаса фазных напряжений на нагрузке не наблюдается, т.е.  $U_A = U_a, U_B = U_b, U_C = U_c$ .

При этом токи рассчитываются, как и ранее, по закону Ома. Топографическая диаграмма токов и напряжений для такой цепи с несимметричной нагрузкой ( $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ ) представлена на рисунке 39.

Векторы токов на диаграмме строят относительно векторов соответствующих фазных напряжений. Углы сдвига фаз между токами и напряжениями на приёмниках определяются по формуле:  $\varphi_\phi = \text{arctg} \frac{X_\phi}{R_\phi}$ . Из диаграммы видно, что вектор тока  $\dot{I}_a$  сонаправлен с вектором напряжения  $\dot{U}_a$ , т.е. нагрузка фазы  $a$  имеет активный характер ( $\varphi_a = 0$ ). Вектор тока  $\dot{I}_b$  опережает вектор напряжения  $\dot{U}_b$ , т.е. нагрузка фазы  $b$  активно-ёмкостного характера ( $\varphi_b < 0$ ), а в фазе  $c$ , т.к. вектор тока  $\dot{I}_c$  отстаёт от вектора напряжения  $\dot{U}_c$ , — приёмник с активно-индуктивным сопротивлением ( $\varphi_c > 0$ ):.

Ток, протекающий в нейтральном проводе  $I_0$ , определяется по первому закону Кирхгофа для нейтральной точки источника или приёмника:  $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

При симметричной нагрузке ( $Z_a = Z_b = Z_c$ ) фазные (они же линейные) токи будут равны по модулю и сдвинуты относительно фазных напряжений на один и тот же угол, т.е. векторы токов на диаграмме образуют симметричную трёхлучевую звезду. Очевидно, что в этом случае ток в нейтральном проводе отсутствует:  $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ , поэтому необходимость в этом проводе отпадает. Однако во многих случаях (например, для осветительной нагрузки) нейтральный провод необходим, поскольку нет оснований рассчитывать на полную симметрию такого потребителя. В нейтральном проводе четырёхпроводной осветительной магистрали запрещена установка выключателей или защитных аппаратов (например, предохранителей). Поскольку при отключении нейтрального провода при не одинаковой загрузке (что часто бывает при отключении или выходе из строя одного из потребителей) возникнет перекося фазных напряжений на работающих приёмниках, который может привести к аварийной ситуации.

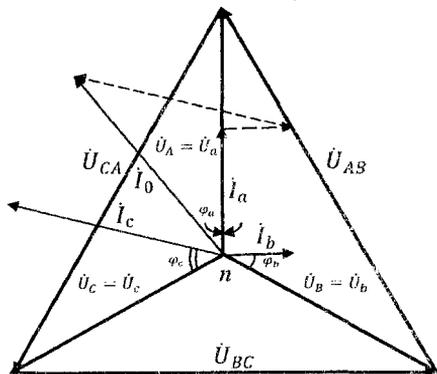


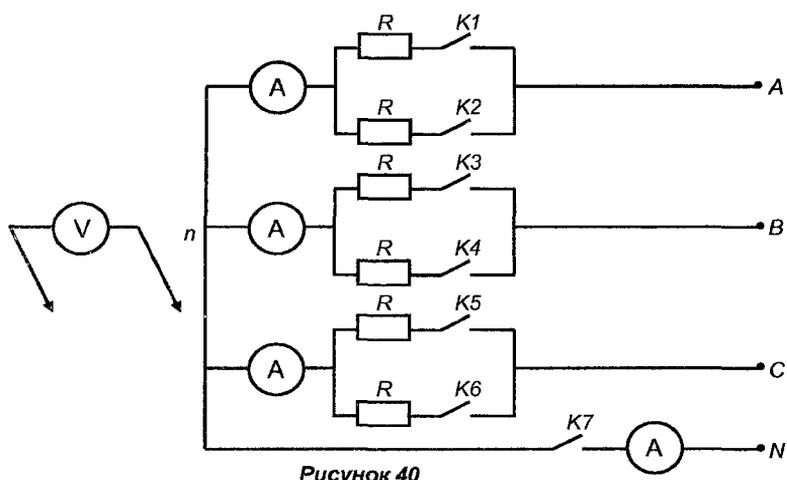
Рисунок 39

### Последовательность выполнения работы

1. Схему лабораторной установки (рисунок 40) подготовить для исследования четырёхпроводной цепи, для чего замкнуть контакт  $K7$  (контакты  $K1 - K6$  должны быть замкнуты).
2. Включить установку и экспериментально исследовать четырёхпроводную цепь (измеряя токи, фазные и линейные напряжения) в трёх режимах работы нагрузки:

- На холостом ходу одной фазы нагрузки, для чего отключить нагрузку в одной из фаз, разомкнув соответствующие контакты (по указанию преподавателя) в цепи заданной фазы.

- При *несимметричной нагрузке*, для чего разомкнуть на стенде (по указанию преподавателя) соответствующие контакты.
- В режиме *симметричной нагрузки*, для чего соответствующие контакты на стенде привести в состояние указанное преподавателем.



**Рисунок 40**

3. Данные исследования (измеренные значения токов, фазных и линейных напряжений) свести в таблицу 5.

**Таблица 5**

Режим работы потребителей	Номера разомкнутых контактов	Измеряемые величины									
		$I_a$ A	$I_b$ A	$I_c$ A	$I_n$ A	$U_a$ B	$U_b$ B	$U_c$ B	$U_{AB}$ B	$U_{BC}$ B	$U_{CA}$ B
Холостой ход одной фазы											
Несимметричная нагрузка											
Симметричная нагрузка											

4. Схему лабораторной установки (рисунок 40) подготовить для исследования трёхпроводной цепи, для чего разомкнуть контакт K7 (контакты K1 -- K6 замкнуты).

5. Исследовать трёхпроводную цепь (измеряя токи, фазные, линейные напряжения и напряжение смещения нейтрали) в тех же режимах работы нагрузки, что и в п.2.

6. Данные исследования (измеренные значения токов, напряжений) свести в таблицу 6.

7. По данным таблиц 5, 6 построить в выбранных масштабах топографические диаграммы токов и напряжений для каждого режима работы потребителей четырёхпроводной и трёхпроводной цепей.

Таблица 6

Режим работы потребителей	Номера разомкнутых контактов	Измеряемые величины									
		$I_a$ A	$I_b$ A	$I_c$ A	$U_a$ B	$U_b$ B	$U_c$ B	$U_{AB}$ B	$U_{BC}$ B	$U_{CA}$ B	$U_{nN}$ B
Холостой ход одной фазы											
Несимметричная нагрузка											
Симметричная нагрузка											

**Примечание.** При построении топографических диаграмм следует:

- выбирать масштабы таким образом, чтобы каждая из них занимала не менее 1/4 страницы формата А4;
- обратить внимание на то, что все исследуемые приёмники, включенные "звездой", имеют активный характер, т.е. угол сдвига фаз между фазными токами и напряжениями равен нулю ( $\varphi_\Phi = 0$ );
- не учитывать нарушение симметрии фазных и линейных напряжений сети, а также перекося токов при симметричной нагрузке, происходящий из-за конструктивного разброса величин сопротивлений нагрузочных резисторов ( $\pm 5\%$ ) и погрешностей измерительных приборов;
- вектор тока  $I_0$  в нейтральном проводе определяется согласно первому закону Кирхгофа сложением векторов фазных токов;
- положение точки  $n$  на топографических диаграммах для трёхпроводной цепи определяется методом засечек, а затем откладывают вектор  $U_{nN}$ . Векторы фазных напряжений приёмников строят из точки  $n$  в соответствии со вторым законом Кирхгофа и относительно них откладывают векторы токов.

### Содержание отчёта

1. Схема исследуемой электрической цепи (рисунок 40).
2. Таблицы измеренных величин (таблицы 5, 6).
3. Векторные диаграммы для всех режимов работы потребителей четырёхпроводной и трёхпроводной цепей.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение симметричной трёхфазной электрической цепи.
2. Каково правило соединения фаз нагрузки (источника) по схеме "звезда"?
3. Дайте определение фазных и линейных напряжений.
4. Покажите, что при соединении приёмников "звездой"  $I_\Phi = I_L$  и  $U_L = \sqrt{3}U_\Phi$ . В каких случаях эти соотношения справедливы?
5. Когда применяются схемы "звезды" с нейтральным проводом и без него?
6. Почему осветительную нагрузку не эксплуатируют без нейтрального провода?
7. По какой причине в нейтральный провод не ставят защитные и коммутационные аппараты?
8. Как влияет изменение нагрузки одной фазы на величину фазных напряжений приёмников?
9. Как определить по известным фазным (линейным) токам величину и фазу тока в нейтральном проводе?
10. Как рассчитать напряжение смещения нейтрали?

### Литература [1, 4]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.5

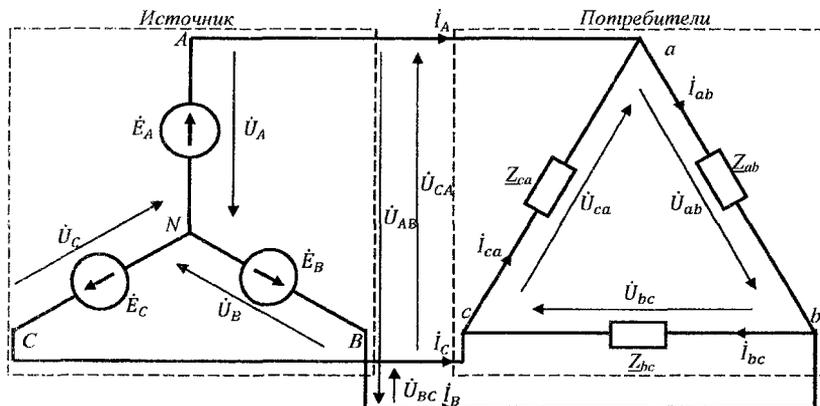
### Тема. Трёхфазные цепи с соединением электроприёмников по схеме "треугольник"

**Цель:** экспериментальное исследование трёхфазной цепи переменного тока с электроприёмниками, соединёнными по схеме "треугольник".

#### Основные сведения

В связанных трёхфазных системах наряду с соединением фаз приёмников "звездой" применяется соединение по схеме "треугольник". При этом, как бы ни были соединены фазы источника, цепь является трёхпроводной, т.е. без нейтрального провода.

Соединение, при котором начало одной фазы потребителя электроэнергии (или источника питания) соединяется с концом другой фазы, начало которой соединено с концом третьей фазы, а начало третьей – с концом первой фазы (при этом начала всех фаз подключаются к соответствующим линейным проводам), называется "треугольником". Для удобства в такой схеме соединения (рисунок 41) фазным сопротивлениям, токам и напряжениям нагрузки присваивают двойной индекс, соответствующий индексам линейных проводов к которым присоединена фаза.



**Рисунок 41**

Каждая фаза приёмника, как это видно из схемы (рисунок 41), подключена к линейному напряжению источника ( $\dot{U}_{ab}=\dot{U}_{AB}; \dot{U}_{bc}=\dot{U}_{BC}; \dot{U}_{ca}=\dot{U}_{CA}$ ), т.е. для рассматриваемого соединения фазные напряжения равны соответствующим линейным ( $U_{ab} \dots U_{li}$ ) и очевидно не зависят от режима работы нагрузки. Фазные токи рассчитываются по закону Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}.$$

На топографической диаграмме (рисунок 42) векторы фазных (они же линейные) напряжений образуют симметричную систему, т.е.  $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$  равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$ . Векторы

фазных токов на диаграмме строят относительно векторов соответствующих фазных напряжений. Углы сдвига фаз между токами и напряжениями на приёмниках определяются по формуле:  $\varphi_\phi = \arctg \frac{X_\phi}{R_\phi}$ . Из диаграммы видно, что

вектор тока  $i_{ab}$  опережает вектор напряжения  $U_{ab}$ , т.е. нагрузка фазы  $ab$  активно-ёмкостного характера ( $\varphi_{ab} < 0$ ). Вектор тока  $i_{bc}$  отстаёт от вектора напряжения  $U_{bc}$ , т.е. нагрузка фазы  $bc$  активно-индуктивного характера ( $\varphi_{bc} > 0$ ). В фазе  $ca$  приёмник с активным сопротивлением, т.к. вектор тока  $i_{ca}$  сонаправлен с вектором напряжения  $U_{ca}$  ( $\varphi_{ca} = 0$ ).

Линейные и фазные токи связаны между собой первым законом Кирхгофа, соответственно для узлов  $a, b, c$ :

$$i_A = i_{ab} - i_{ca}; i_B = i_{bc} - i_{ab}; i_C = i_{ca} - i_{bc}.$$

Очевидно, что при симметричной нагрузке ( $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_\phi$  и  $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi_\phi$ ) треугольники, образуемые векторами фазных и линейных напряжений будут равнобедренными с углом при основании  $30^\circ$ . Действующие значения линейных токов можно определить графически по векторной диаграмме или по формуле:

$I_L = 2I_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_\phi$ , которая следует из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного тока (например  $-i_{ab}, i_{ca}$  и  $i_A$ ).

Важной особенностью соединения фаз приёмника "треугольником" является то, что при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остаётся неизменным, так как линейные напряжения генератора являются постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединённых с этой фазой. Даже отключение (обрыв) одной или двух фаз нагрузки не влияет на нормальную работу остальных приёмников. Поэтому схема соединения "треугольником" широко используется для включения несимметричной нагрузки.

Недостатком этой схемы соединения является то, что при обрыве линейного провода нарушается нормальная работа двух прилегающих к нему фаз. Например, при обрыве линии  $A$  (рисунок 41) фазные сопротивления  $Z_{ab}$  и  $Z_{ca}$  оказываются соединёнными между собой последовательно и параллельно  $Z_{bc}$ . При этом очевидно, напряжение на фазе  $bc$  останется без изменения ( $U_{bc} = U_{BC}$ ), что не повлияет на нормальную работу приёмника этой фазы. Это же напряжение ( $U_{bc} = U_{BC}$ ), оказываясь приложенным и к участку с последовательно соединёнными фазами  $ab$  и  $ca$ , будет делиться пропорционально сопротивлениям  $Z_{ab}$  и  $Z_{ca}$  (в случае симметричной нагрузки – поровну). Таким образом, в этом случае напряжения и токи фаз  $ab$  и  $ca$  естественно изменятся, что приведёт к нарушению нормальной работы нагрузки этих фаз.

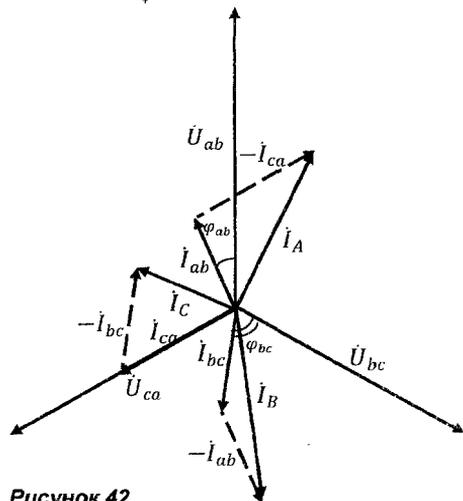
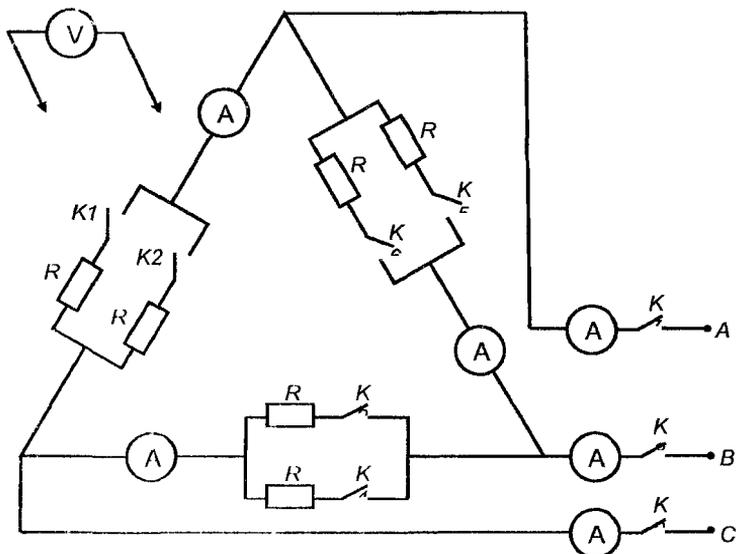


Рисунок 42

## Последовательность выполнения работы



**Рисунок 43**

1. Включить лабораторную установку и экспериментально исследовать трёхфазную цепь (рисунок 43) с электроприёмниками, соединёнными по схеме “треугольник” (измеряя напряжения, линейные и фазные токи), в четырёх режимах работы нагрузки:

- на холостом ходу одной фазы нагрузки, для чего отключить нагрузку в одной из фаз, разомкнув соответствующие контакты (по указанию преподавателя) в цепи заданной фазы;
- при несимметричной нагрузке, для чего разомкнуть на стенде (по указанию преподавателя) соответствующие контакты;
- в режиме симметричной нагрузки, для чего соответствующие контакты на стенде привести в состояние указанное преподавателем;
- при обрыве линейного провода и симметричной нагрузке, для чего отключить один из линейных проводов, разомкнув (по указанию преподавателя) соответствующие контакты.

2. Данные исследования (измеренные значения напряжений, фазных и линейных токов) свести в таблицу 7.

Таблица 7

Режим работы потребителей	Номера разомкнутых контактов	Измеряемые величины								
		$I_A$ A	$I_B$ A	$I_C$ A	$I_{ab}$ A	$I_{bc}$ B	$I_{ca}$ R	$U_{AB}$ B	$U_{BC}$ B	$U_{CA}$ B
Холостой ход одной фазы										
Несимметричная нагрузка										
Симметричная нагрузка										
Обрыв линейного провода при симметричной нагрузке										

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители:

*Игорь Михайлович Панасюк*  
*Александр Сергеевич Смаль*

## **Методические указания**

по выполнению лабораторных работ  
в лаборатории "Общая электротехника"  
для студентов неэлектротехнических специальностей  
дневной и заочной форм обучения

Часть 1

### ***Электрические цепи***

Ответственный за выпуск **Панасюк И.М.**

Редактор **Боровикова Е.А.**

Компьютерная вёрстка **Кармаш Е.Л.**

Корректор **Никитчик Е.В.**

---

Подписано к печати 02.12.2014 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. п. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,5. Заказ № 995. Тираж 50 экз.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, Брест, ул. Московская, 267.