

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Н.Б. Ковылов, Ю.И. Левин, С.Е. Шешукова

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА СЛЕДОВАНИЯ ФАЗ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ**

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе

Саратов, 2014

УДК 530.10

К54 Ковылов Н.Б., Левин Ю.И., Шешукова С.Е. Определение порядка следования фаз: Учебно-методическое пособие. Саратов: СГУ, 2014. 16 с.

Настоящее пособие предназначено для студентов, выполняющих учебные работы в практикуме «Электромагнитные явления» и призвано восполнить пробел в курсах, в которых отсутствует анализ особенностей трехфазных цепей переменного тока.

Рекомендуют к печати кафедра физики открытых систем и кафедра нелинейной физики факультета нелинейных процессов СГУ.

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

УДК 530.10

©Н.Б.Ковылов, Ю.И.Левин, С.Е. Шешукова  
2014

## ВВЕДЕНИЕ

**Трехфазная цепь** является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют э.д.с. одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол. Отметим, что обычно эти э.д.с., в первую очередь, в силовой энергетике, синусоидальны. Однако, в современных электромеханических системах, где для управления исполнительными двигателями используются преобразователи частоты, система напряжений в общем случае является несинусоидальной. Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, называют фазой, т.е. **фаза** – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке. Таким образом, понятие «фаза» имеет в электротехнике два различных значения:

- фаза как аргумент синусоидально изменяющейся величины;
- фаза как составная часть многофазной электрической системы.

Разработка многофазных систем была обусловлена исторически. Исследования в данной области были вызваны требованиями развивающегося производства, а успехам в развитии многофазных систем способствовали открытия в физике электрических и магнитных явлений.

Важнейшей предпосылкой разработки многофазных электрических систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (Г.Феррарис и Н.Тесла, 1888 г.). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели невысокие рабочие характеристики. Наиболее рациональной и перспективной оказалась трехфазная система, основные преимущества которой будут рассмотрены далее. Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый-электротехник М.О.Доливо-Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех- и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.

Трехфазные системы в настоящее время получили наибольшее распространение. На трехфазном токе работают все крупные электростанции и потребители, что связано с рядом преимуществ трехфазных цепей перед однофазными, важнейшими из которых являются:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- самым надежным и экономичным, удовлетворяющим требованиям промышленного электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- возможность получения с помощью неподвижных обмоток вращающегося магнитного поля, на чем основана работа синхронного и асинхронного двигателей, а также ряда других электротехнических устройств;
- уравновешенность симметричных трехфазных систем.

Описанный в данном пособии способ определения порядка следования фаз основан на эффекте сложения колебаний одинаковой частоты с разными начальными фазами.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как уже отмечалось во введении, под **трехфазной симметричной системой** э.д.с. понимают совокупность трех синусоидальных э.д.с. одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на  $120^\circ$ . Графики их мгновенных значений изображены на рис. 1; векторная диаграмма – на рис. 2.

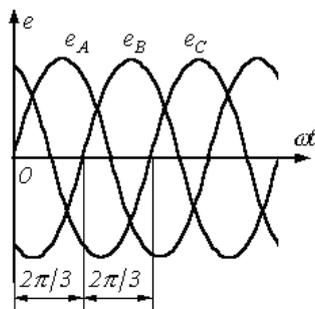


Рис.1

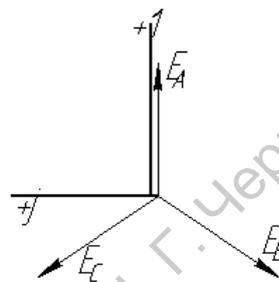


Рис.2

Принцип получения трехфазной системы э.д.с. иллюстрирует рис. 3.

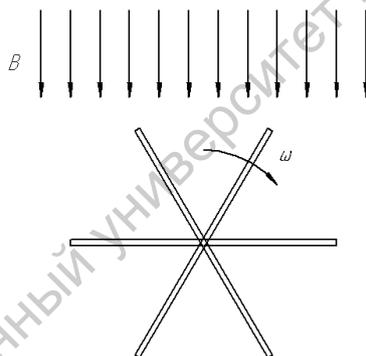


Рис.3

В равномерном магнитном поле с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вращаются три одинаковых жестко скрепленных друг с другом катушки. Плоскости катушек смещены в пространстве друг относительно друга на  $120^\circ$ . В каждой катушке наводится синусоидальная э.д.с. одинаковой амплитуды, но по фазе они сдвинуты на  $120^\circ$ .

Аналогичным путем можно получить двух- и четырехфазную систему э.д.с. и более. Наибольшее практическое применение получила трехфазная система. Последовательность прохождения э.д.с. через одинаковые значения (например, через нулевое значение) называют последовательностью фаз.

Совокупность трехфазной системы э.д.с., трехфазной нагрузки (нагрузок) и соединительных проводов называют **трехфазной цепью**.

Токи, протекающие по отдельным участкам трехфазных цепей, сдвинуты относительно друг друга по фазе. Под фазой трехфазной цепи понимают участок трехфазной цепи, по которому протекает одинаковый ток.

Существуют различные **способы соединения обмоток генератора с нагрузкой**. Самым неэкономичным способом явилось бы соединение каждой обмотки генератора с нагрузкой двумя проводами, на что потребовалось бы шесть соединительных проводов. В целях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют в звезду или треугольник. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается с шести до трех или до четырех.

На электрической схеме трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных друг к другу под углом  $120^\circ$ . При **соединении звездой** (рис. 4) одноименные зажимы трех обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора  $O$ . Обмотки генератора обозначают буквами  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ; буквы ставят следующим образом:  $A$  – у начала первой,  $B$  – у начала второй и  $C$  – у начала третьей фазы.

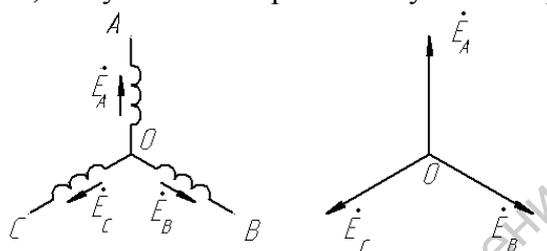


Рис 4

При **соединении обмоток генератора треугольником** (рис. 5) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. Геометрическая сумма э.д.с. в замкнутом треугольнике равна нулю. Поэтому если к зажимам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора не будет протекать ток.

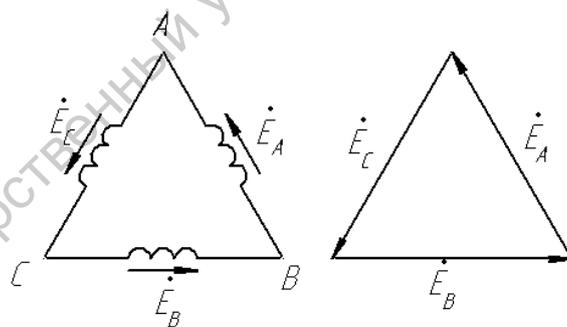


Рис. 5

Широкое распространение трехфазных систем объясняется главным образом тремя основными причинами:

- 1) передача энергии на дальние расстояния трехфазным током экономически более выгодна, чем переменным током с иным числом фаз;
- 2) элементы системы – трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор – весьма просты в производстве, экономичны и надежны в работе;
- 3) система обладает свойством неизменности величины мгновенной мощности за период синусоидального тока, если нагрузка во всех трех фазах трехфазного генератора одинакова.

Одним из важнейших свойств многофазных и, в частности, трехфазных токов является их способность создавать **круговое вращающееся магнитное поле**.

**Магнитное поле одной катушки**, по которой протекает синусоидальный ток, представляет собой пульсирующее (не вращающееся) магнитное поле. На рис. 6 изображена катушка, по которой проходит синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ .

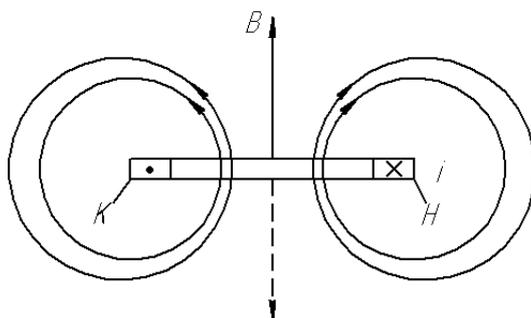


Рис.6

Магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции  $B$ . Направление  $B$  определяется направлением намотки катушки и направлением тока в ней в данный момент времени. Пусть буква Н означает начало, а К – конец катушки. Если ток входит в зажим Н и выходит из зажима К (это направление тока будем считать положительным: ему соответствует интервал времени от 0 до  $\pi$ ), то вектор магнитной индукции направлен вверх по осевой линии катушки. В следующий полупериод, когда ток отрицателен, вектор  $B$  направлен вниз (пунктир на рис. 6). Таким образом, геометрическим местом концов вектора  $B$  является ось катушки.

**Круговое вращающееся магнитное поле** представляет собой магнитное поле, вектор результирующей магнитной индукции которого по величине неизменен и вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ .

Расположим три одинаковые катушки так, чтобы их оси были смещены на  $120^\circ$  по отношению друг к другу (рис. 7). Присоединим катушки к симметричной трехфазной системе э.д.с. Пусть токи входят в начала катушек Н и изменяются следующим образом:

$$i_1 = I_m \sin \omega t;$$

$$i_2 = I_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$i_3 = I_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

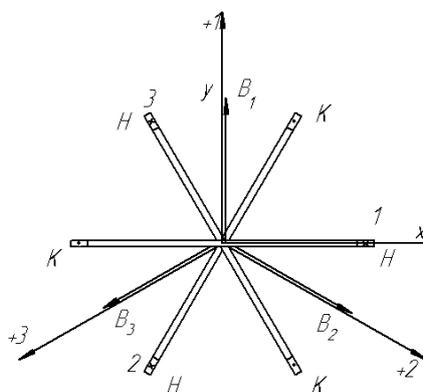


Рис.7

Графики токов изображены на рис 8.

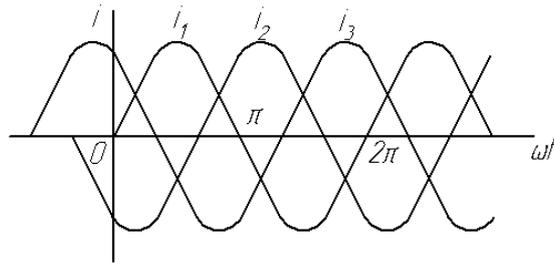


Рис. 8

Каждый из токов создает пульсирующее поле, направленное вдоль оси своей катушки. Положительное направление оси первой катушки обозначим +1, второй +2, третьей +3. Магнитную индукцию первой катушки обозначим  $B_1$ , второй –  $B_2$ , третьей –  $B_3$ . Тогда

$$B_1 = B_m \sin \omega t;$$

$$B_2 = B_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$B_3 = B_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Изобразим векторами в пространстве мгновенные значения  $B_1, B_2, B_3$  и результирующую индукцию для моментов времени  $\omega t = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  (рис. 9).

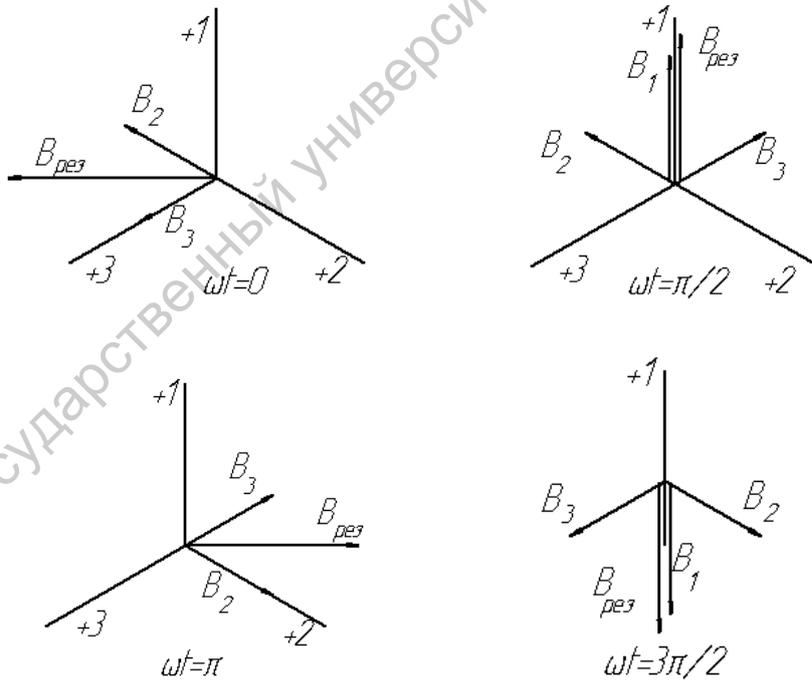


Рис.9

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

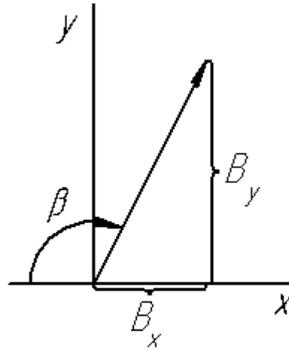


Рис. 10

Запишем алгебраическую сумму проекций векторов магнитных индукций  $\dot{B}_1, \dot{B}_2, \dot{B}_3$  на оси X и Y декартовой системы координат (рис. 10), совместив ось X с осью 1 и ось Y с осью 2:

$$\dot{B}_x = \dot{B}_2 \cos 30^\circ - \dot{B}_3 \cos 30^\circ = -\frac{3}{2} \dot{B}_m j;$$

$$\dot{B}_y = \dot{B}_1 - \dot{B}_2 \cos 60^\circ = \frac{3}{2} \dot{B}_m.$$

Мгновенное значение проекций векторов магнитной индукции на оси X и Y

$$B_x = -\frac{3}{2} B_m \cos \omega t;$$

$$B_y = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t.$$

Результирующая индукция по модулю равна  $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_m$  и составляет угол  $\beta$  с

осью - X :  $\operatorname{tg} \beta = -\frac{B_y}{B_x} = \operatorname{tg} \omega t$ , т.е. угол  $\beta = \omega t$ .

С увеличением времени вектор результирующей магнитной индукции, оставаясь по величине равным  $3B_m/2$ , вращается с угловой скоростью  $\omega$  по направлению от начала первой катушки с током  $I_m \sin \omega t$  к началу второй катушки с током  $I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ , т.е. вектор результирующей магнитной индукции вращается в сторону катушки с отстающим током.

Если ток  $I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$  пропустить по третьей, а ток  $I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$  – по второй катушке, то направление вращения поля изменится на обратное.

Если произойдет обрыв одной из фаз или ток в ней по амплитуде не будет равен току в какой-либо другой фазе или сдвинут по фазе не на  $120^\circ$ , то образуется эллиптическое вращающееся поле. При возникновении его конец вектора результирующей магнитной индукции будет скользить по эллипсу.

Для того чтобы усилить вращающееся магнитное поле, внутрь катушек помещают полый или сплошной ферромагнитный цилиндр, а стороны катушек заключают в пазы внешнего ферромагнитного цилиндра (рис. 11).

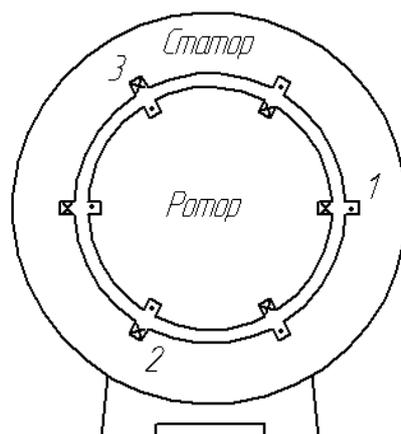


Рис. 11

Наиболее распространенным в промышленности типом двигателя переменного тока является **трехфазный асинхронный двигатель**. В нем имеется неподвижная часть – статор, в пазах которого помещены три катушки, создающие круговое вращающееся магнитное поле, и подвижная часть – ротор, в пазах которого находятся три замкнутые на себя или на внешнее сопротивление катушки. Вал ротора двигателя соединен с валом рабочей машины.

Допустим, что вначале ротор неподвижен. При этом вращающееся магнитное поле, созданное обмотками статора, пересекает провода катушек неподвижного ротора с угловой скоростью  $\omega$  и наводит в них э.д.с. Э.д.с. вызовут токи в катушках ротора. По закону Ленца, эти токи стремятся своим магнитным полем ослабить вызвавшее их магнитное поле.

Механическое взаимодействие токов ротора с вращающимся магнитным полем приведет к тому, что ротор начнет вращаться в ту же сторону, в какую вращается магнитное поле (в этом можно убедиться, применив правило левой руки).

В установившемся режиме скорость вращения ротора  $\omega_{ром}$  составляет от 0.95 до 0.98 от  $\omega$ . (от  $0.95\omega$  до  $0.98\omega$ ) Двигатель называют асинхронным потому, что ротор его вращается не синхронно с вращающимся полем;  $\omega_{ром}$  не может равняться угловой скорости вращающегося поля. Это станет понятно, если учесть, что при  $\omega_{ром} = \omega$  вращающееся поле не пересекало бы провода катушек ротора, в них отсутствовал бы ток и ротор не испытывал бы вращающего момента.

Таким образом, необходимо знать последовательность чередования фаз, так как при смене местами фаз В и С трехфазный двигатель будет вращаться в обратную сторону, что может привести либо к неправильной работе устройства, работающего с помощью трехфазного двигателя, либо к его поломке.

**Определение порядка или последовательности чередования фаз** в трехфазной симметричной системе э.д.с. (напряжений) производят с помощью указателя последовательности чередования фаз. В простейшем исполнении он состоит из двух одинаковых ламп накаливания и конденсатора (рис. 12).

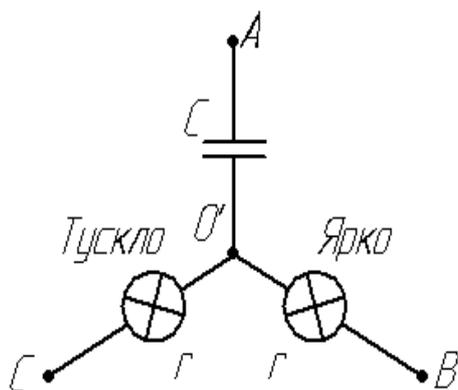


Рис.12

Емкость  $C$  берут такой величины, чтобы емкостное сопротивление  $1/\omega C$  равнялось сопротивлению каждой лампы.

Если три конца указателя подключить к трем концам симметричной трехфазной системы э.д.с., то потенциал нулевой точки схемы на рис. 12 будет определяться положением точки  $O'$  на векторной диаграмме рис. 13 (соответствует точке  $p$ ).

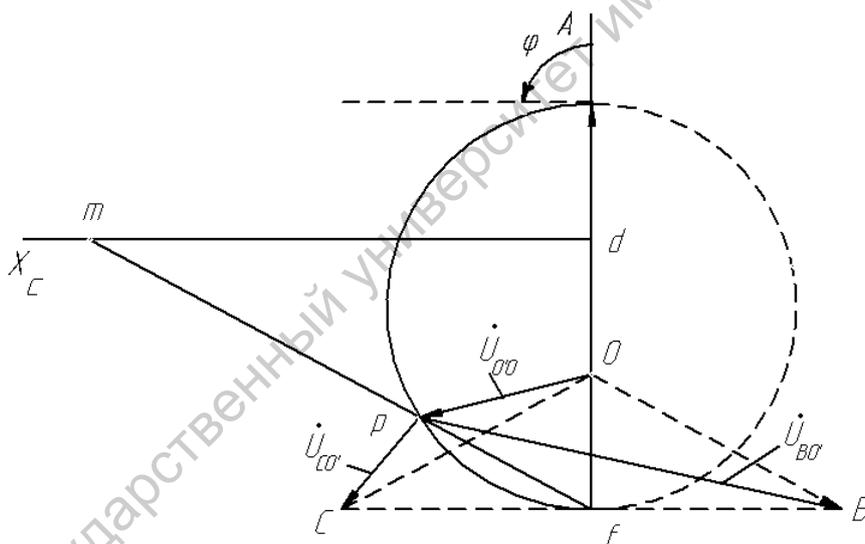


Рис.13

Из диаграммы рис. 13 видно, что напряжение на лампах накаливания будет различно. На лампе, включенной в фазу  $B$ , оно определяется вектором  $\dot{U}_{BO'}$ , на лампе, включенной в фазу  $C$ , - вектором  $\dot{U}_{CO'}$ . Так как  $U_{BO'} > U_{CO'}$  то лампа в фазе  $B$  будет гореть более ярко, чем лампа в фазе  $C$ . Следовательно, если фазу трехфазной системы э.д.с., к которой подключен конденсатор, принять за фазу  $A$ , то фаза, к которой окажется подключенной ярко горящая лампа, есть фаза  $B$ , а фаза с тускло горящей лампой – фаза  $C$ .

Для выполнения данной лабораторной работы был сконструирован такой определитель последовательности чередования фаз, схема которого изображена на рис. 14.

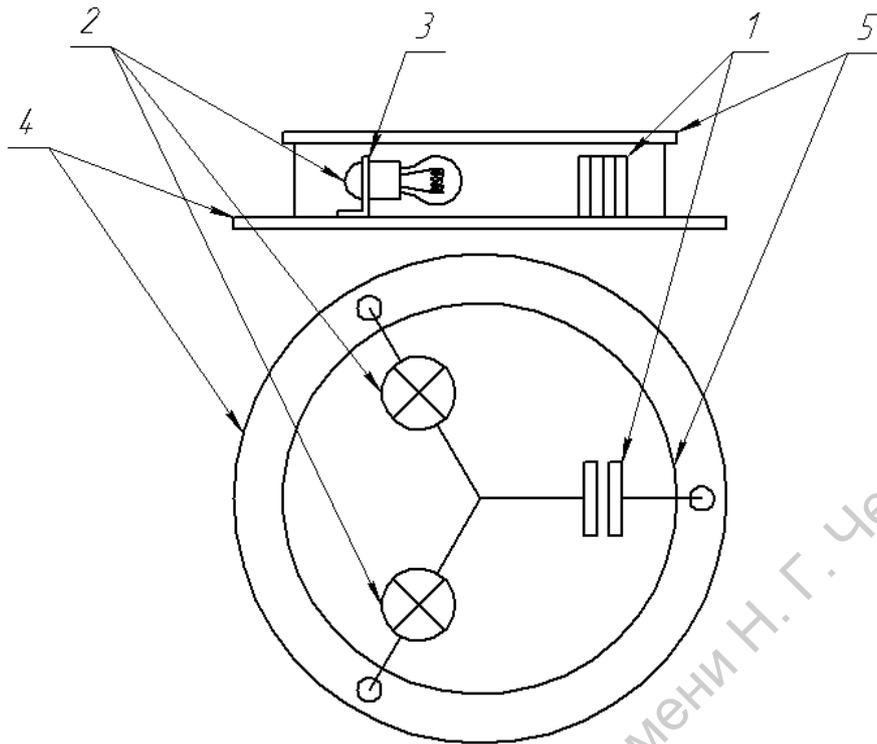


Рис. 14 - Указатель последовательности чередования фаз: 1 – конденсатор, 2 – лампы накаливания, 3 – металлический уголок, 4 – основание, 5 – крышка (имеет прозрачную стенку из оргстекла).

Для того чтобы показать принцип работы устройства, можно также использовать метод контурных токов.

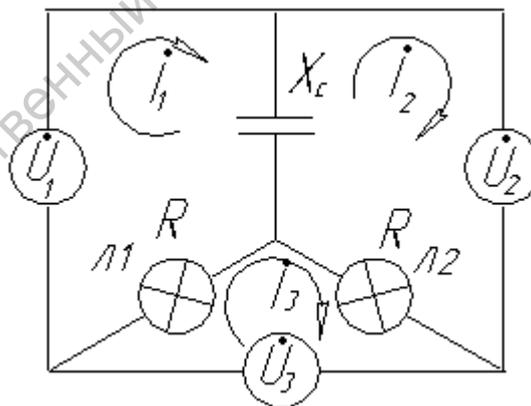


Рис. 15

Примем в схеме устройства (рис. 15)  $\dot{U}_1 = 380$ ,  $\dot{U}_2 = 380e^{-j120}$ ,  $\dot{U}_3 = 380e^{-j240}$ ,  $X_c = -jR$ ,  $\dot{U}_1/R = 0,3$ .

$$\begin{cases} X_c(\dot{I}_1 - \dot{I}_2) + R(\dot{I}_1 - \dot{I}_3) = \dot{U}_1 \\ X_c(\dot{I}_2 - \dot{I}_1) + R(\dot{I}_2 - \dot{I}_3) = \dot{U}_2 \\ R(\dot{I}_3 - \dot{I}_1) + R(\dot{I}_3 - \dot{I}_2) = \dot{U}_3 \end{cases} \quad (1)$$

Обе части уравнений поделим на R и проведем перестановки членов:

$$\begin{cases} \dot{I}_1(1-j) + j\dot{I}_2 - \dot{I}_3 = \dot{U}_1 / R \\ \dot{I}_2(1-j) + j\dot{I}_1 - \dot{I}_3 = \dot{U}_2 / R \\ 2\dot{I}_3 - (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = \dot{U}_3 / R \end{cases} \quad (2)$$

Переведем данные в тригонометрическую форму:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 / R = 0,3 \\ \dot{U}_2 / R = -0,15 - j \cdot 0,26 \\ \dot{U}_3 / R = -0,15 + j \cdot 0,26 \end{cases} \quad (3)$$

Выразим ток  $\dot{I}_1$  из третьего уравнения системы (2):

$$\dot{I}_1 = 2\dot{I}_3 - \dot{I}_2 - \dot{U}_3 / R \quad (4)$$

С использованием (3):

$$\dot{I}_1 = 2\dot{I}_3 - \dot{I}_2 + 0,15 - j \cdot 0,26$$

Первое уравнение системы (2) можно переписать в виде:

$$2\dot{I}_3(1-j) - \dot{I}_2(1-j) + (1-j)(0,15 - j \cdot 0,26) + j\dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0,3$$

Упрощая, получим:

$$\dot{I}_3(1-2j) - \dot{I}_2(1-2j) = 0,41 + j \cdot 0,41$$

Или

$$\dot{I}_3 - \dot{I}_2 = \frac{0,41 + j \cdot 0,41}{1-2j} = 0,41 \frac{1+j}{1-2j} = \frac{0,41}{5} (-1+3j) = -0,08 + 0,24j$$

Модуль  $|\dot{I}_3 - \dot{I}_2| \cong 0,25$

Используя полученный в (4) результат, получим:

$$\dot{I}_3 - \dot{I}_1 + \dot{I}_3 - \dot{I}_2 = \dot{U}_3 / R$$

Тогда

$$\dot{I}_3 - \dot{I}_1 = (-0,15 + 0,26j) - \frac{0,41}{3} (-1+3j) = -0,15 + 0,12 + 0,26j - 0,41 = -0,03 - 0,15j$$

Модуль  $|\dot{I}_3 - \dot{I}_1| \cong 0,15$

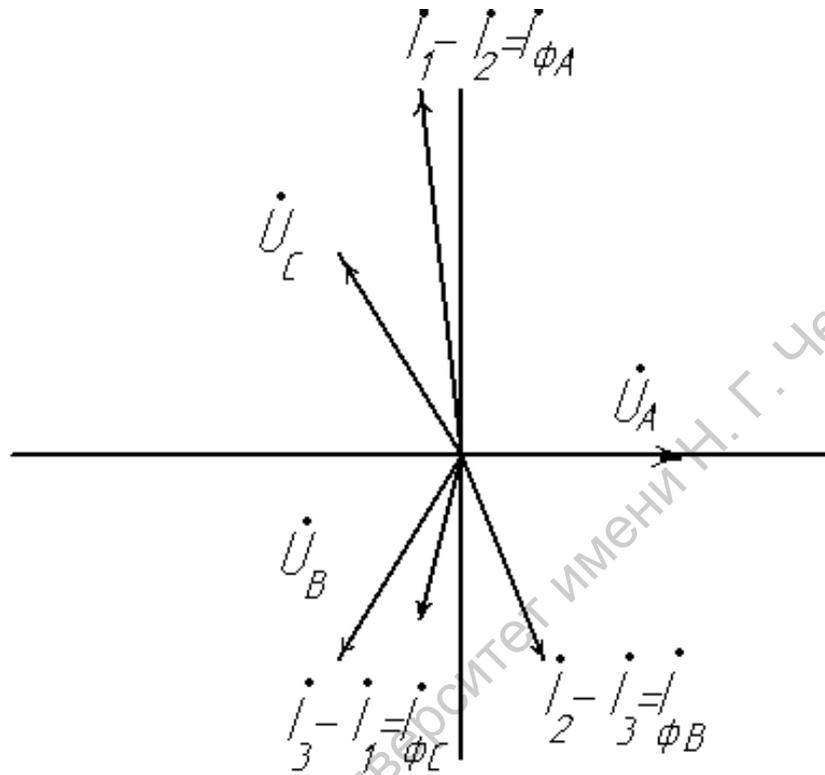
Через лампу Л2 течет ток 0,25А, через лампу Л1 0,15А.

Для центрального узла  $\sum \dot{I}_n = 0$ .

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$$

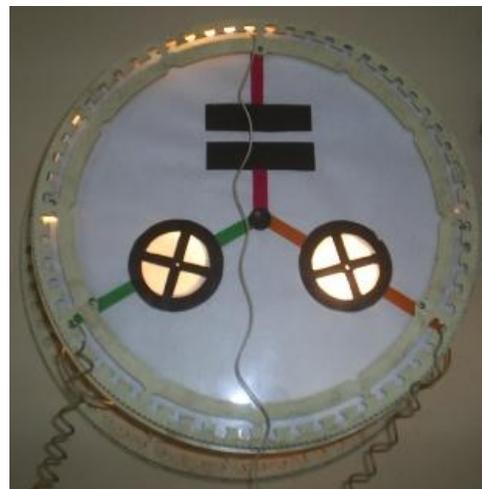
$$(\dot{I}_3 - \dot{I}_2) - (\dot{I}_3 - \dot{I}_1) = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = -0,08 + 0,24j + 0,03 + 0,15j = -0,05 + 0,39j$$

Теперь можно построить векторную диаграмму для токов:



Из данной диаграммы видно, что ток, протекающий через фазу  $B$ , больше тока, проходящего через фазу  $C$ , поэтому лампа, подключенная к фазе  $B$ , т.е. Л2, будет гореть ярче, чем лампа Л1.

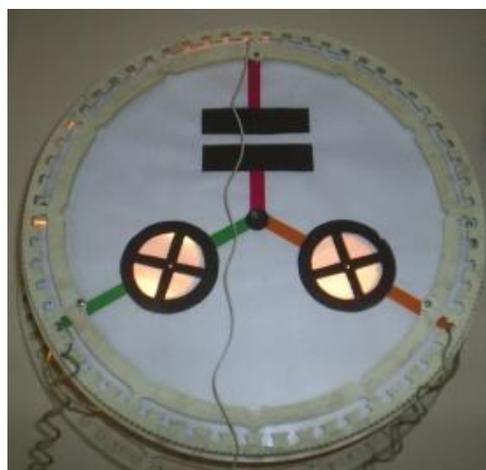
В результате проделанной работы была собрана лабораторная установка, вид которой показан на фотографиях и которая будет использоваться в практикуме «Электромагнитные явления».



Правая лампа подключена к фазе *B*, левая – к фазе *C*.



Правая лампа подключена к фазе *C*, левая – к фазе *B*.



Конденсатор не подключен

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ РАБОТЫ ПРОЙДИТЕ ИНСТРУКТАЖ ПО БЕЗОПАСНОМУ ВЫПОЛНЕНИЮ ДАННОЙ РАБОТЫ.

1 этап. Устройство для определения порядка следования фаз смонтировано в круглом корпусе настенного исполнения и для подключения к исследуемой сети имеет три гибких проводника, оканчивающиеся однополюсными вилками.

Следует учесть, что наименование фаз «А», «В» и «С» является относительным, другими словами, любую фазу можно назвать «А». Тогда фаза, отстающая от нее на 120 градусов, будет «В», а оставшаяся – «С».

Провод, идущий от конденсатора, присоединяется к гнезду на трехфазной вилке, которое в дальнейшем будет идентифицировано как фаза «А». Две других однополюсных вилки присоединяются к свободным гнездам на трехполюсной вилке произвольно. После этого вилка включается в трехполюсную розетку.

При этом яркость загоревшихся в модуле ламп будет неодинаковой. Провод, отходящий от более яркой лампы, принадлежит фазе «В», от менее яркой – фазе «С».

Теперь можно убедиться, что при смене местами проводов фаз «В» и «С» яркая лампа поменяется местами с менее яркой.

Упражнение следует повторить, приняв за фазу «А» другое гнездо на трехполюсной розетке, и убедиться в сохранении определенного ранее порядка следования фаз.

2 этап. Компьютерное моделирование эксперимента.

Войти на компьютере в программу «EWB». Набрать на поле монитора схему устройства. Задать параметры элементов схемы, исходя из теоретических предпосылок. Ввести в схему необходимые измерительные приборы. Объяснить полученные результаты и составить протокол испытаний.

Учебно-методическое издание

Ковылов Николай Борисович  
Левин Юрий Иванович  
Шешукова Светлана Евгеньевна

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА СЛЕДОВАНИЯ ФАЗ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ**

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе

Издано в авторской редакции

Саратовский государственный университет  
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83