

4 р. 50 к

К. НЕЛИЗАРОВ

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

В КУРСЕ ФИЗИКИ
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ



УЧПЕДГИЗ
1957

К. Н. ЕЛИЗАРОВ

**ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК
В КУРСЕ ФИЗИКИ
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ**

ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧИТЕЛЕЙ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Ленинград - 1957

ОТ АВТОРА

Основы учения о переменном токе принадлежат к числу трудных разделов курса физики средней школы. Методика изложения этого учения еще не достаточно разработана. Настоящая книга представляет собою методическую разработку этой темы, определяющую объем и глубину содержания темы, систему построения учебного материала и методику его изложения.

Введение

Программа Министерства просвещения определяет круг тех вопросов, которые включены в данную тему. Задача методики преподавания физики состоит в определении объема и глубины учебного материала на основании указаний программы. В настоящее время эту задачу нельзя еще считать решенной, поэтому целесообразно дальнейшее обобщение опыта работы учителей в этой области, тем более, что сколько-нибудь полной методической разработки рассматриваемой темы до сих пор не имеется. Учебники методики преподавания физики П. А. Знаменского и И. И. Соколова¹ содержат чрезвычайно краткие сведения по этому вопросу. Небольшая книжка М. А. Ушакова² посвящена рассмотрению части данной темы — трехфазного тока. Другая книга того же автора³ имеет в виду почти исключительно постоянный ток. Значительно более полно изложено учение о переменном токе в книге Е. Н. Горячкина.⁴ Содержание материала этой полезной книги расходится с ныне действующей программой по физике для средней школы.

Не может еще считаться решенным также и другой не менее важный методический вопрос, а именно: какова должна быть система построения материала по рассматриваемой теме. И тут возможны различные решения этого вопроса. При этом система построения материала должна не только определяться уровнем развития учащихся и

¹ П. А. Знаменский. Методика преподавания физики в средней школе. Учпедгиз, 1954; И. И. Соколов. Методика преподавания физики в средней школе. Учпедгиз, 1951.

² М. А. Ушаков. Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955 (69 стр.).

³ М. А. Ушаков. К изучению законов электростатического тока. Учпедгиз, 1953 (44 стр.).

⁴ Е. Н. Горячкин. Переменный ток. Учпедгиз, 1938 (стр. 176).

состоянием их знаний по физике, но и находиться в строгом соответствии с объемом, содержанием и построением всего предыдущего курса физики, который учащиеся изучали до этого.

Учение о переменном токе имеет не только большое образовательное, но и практическое (политехническое) значение. Физика — один из основных каналов, по которым осуществляются задачи политехнического обучения. Школа, опираясь на освоенные знания учащихся, должна ознакомить их с основами главных отраслей производства, выявив общие научные принципы, лежащие в основе многих современных производств. Одним из наиболее общих признаков, присущих всем производствам, является широкое использование ими электрического тока вообще и главным образом — переменного тока. Другой признак, присущий всем производствам, — широкая механизация. Электродвигатели (постоянного и переменного тока) наряду с двигателями внутреннего сгорания являются основными двигателями любого современного производства. Поэтому в разработке методики изложения таких вопросов темы, как природа переменного тока, генерирование, трансформация и канализация его, устройство и принцип действия электродвигателей, должны быть учтены задачи политехнического обучения.

И наконец, методически разработка темы должна иметь в виду и планирование учебного материала во времени.

Все перечисленные выше методические вопросы, связанные с изучением темы «Переменный электрический ток», нашли свое отражение в настоящей книге. Разумеется, что предлагаемое решение этих вопросов есть только один из возможных вариантов.

Методические указания о том, как следует излагать наиболее существенные вопросы, даны после соответствующих параграфов, а не в тексте, так как в этом случае несколько пострадала бы четкость изложения.

Ниже приводится примерный учебный план темы в соответствии с тем временем (16 часов), какое отводится на нее программой.

Изложение некоторых вопросов в книге дано несколько более глубоко, более подробно, чем это может быть сделано на уроке. В таких случаях материал этих параграфов включен в учебный план темы не полностью, а

частично. Необходимые сокращения приведены в методических указаниях после соответствующих параграфов.

Более подробно рассмотрен материал, в изложении которого встречаются наибольшие трудности: понятие о переменном токе, трехфазный ток, трансформация тока. Остальной (не менее ценный и образовательном и воспитательном отношении) материал дан в более сжатом виде, так как изложение его вызывает значительно меньшие затруднения.

ПРИМЕРНЫЙ УЧЕБНЫЙ ПЛАН ТЕМЫ

(16 часов)

I. Однофазный переменный ток

Понятие о переменном токе. Генератор переменного тока (§ 1—3, 5)	3 часа
Действующее значение переменного тока и напряжения (§ 8)	1 час
Понятие о емкостном и индуктивном сопротивлении (§ 9—11)	2 часа

II. Трехфазный переменный ток

Трехфазный ток. Соединения звездой и треугольником (§ 12—17)	3 часа
Асинхронный электродвигатель (§ 19—21)	1 час

III. Выпрямление переменного тока

Двухэлектронная лампа. Выпрямители переменного тока (§ 22—25)	2 часа
---	--------

IV. Генераторы и электродвигатели переменного тока

Генераторы постоянного тока. Электродвигатели постоянного тока (§ 26, 28)	1 час
---	-------

V. Трансформация тока

Потери энергии в линии передачи, борьба с ними. Трансформатор (§ 29, 30)	2 часа
--	--------

VI. Электрификация СССР

Электрификация СССР. Применение электродвигателей (§ 31—32)	1 час
---	-------

ГЛАВА I

ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 1. Получение переменной э. д. с.

До сих пор мы изучали постоянный ток, т. е. ток, не изменяющийся ни по величине, ни по направлению. В явлении электромагнитной индукции мы впервые встретились с переменным током. Ставя опыты по электромагнитной индукции с катушками Фарадея, мы возбуждали э. д. с. индукции во вторичной катушке, вдвигая и выдвигая из нее постоянный магнит или первичную катушку с током. Того же результата — возбуждения э. д. с. индукции во вторичной катушке — мы достигали и другими способами: замыканием и размыканием цепи тока в первичной катушке, увеличением или уменьшением тока в первичной катушке, вдвиганием и выдвиганием из нее стального сердечника. Во всех перечисленных случаях магнитный поток, охватываемый вторичной катушкой, изменяется как по величине (то увеличивается, то уменьшается), так и по направлению.

Возникающая во вторичной катушке вследствие этих изменений магнитного потока э. д. с. индукции тоже переменная. Она тоже изменяется как по величине, так и по направлению. Справедливость этих рассуждений подтверждается тем, что стрелка гальванометра, подключенного ко вторичной катушке, отклоняется то на больший, то на меньший угол, то в одну сторону, то в другую. Известно, что на электростанциях получают переменный ток, обусловленный наличием переменной э. д. с. Рассмотрим условия, в которых возникает в электрической цепи переменная э. д. с.

Пусть между полюсами N и S магнита (рис. 1) создано магнитное поле. Допустим, что это поле однородное.

Между полюсами магнита равномерно вращается виток проволоки. Концы витка присоединены к медным изолированным кольцам, к которым прижимаются щетки. Виток не замкнут. На рис. 2 показан тот же виток в разрезе, в нескольких положениях (кружками показаны сечения долевых проводников витка, обозначенных на рис. 1 буквами ad и bc , а сплошными линиями — торцовый проводник dc). Площадь $abcd$ витка пронизывается магнитным

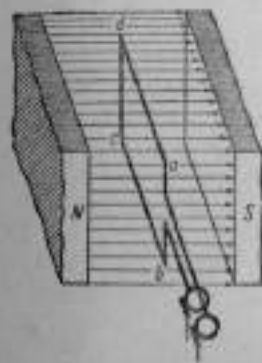


Рис. 1. Виток, равномерно вращающийся в однородном магнитном поле.

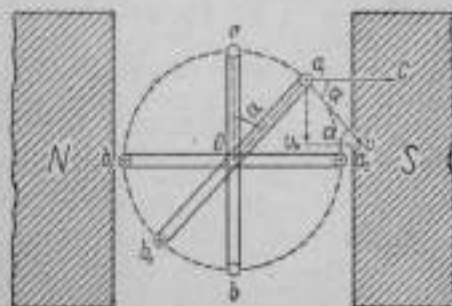


Рис. 2. Виток (в разрезе), равномерно вращающийся в однородном магнитном поле.

поток индукции некоторой величины. При вращении витка магнитный поток, пронизывающий контур витка, непрерывно изменяется, в связи с чем в витке возникает э. д. с. индукции.

Рассмотрим, что можно сказать о направлении э. д. с. индукции, возникающей в витке, и о ее величине. Будем считать за направление э. д. с. направление индукционного тока, который возник бы в данном проводнике под действием этой э. д. с., если бы проводник был замкнут. Проследим за движением проводника ad на рис. 1, сечение которого на рис. 2 обозначено буквой a , считая, что виток вращается по часовой стрелке. При движении проводника a по правой половине окружности, обозначенной на рис. 2 пунктиром, проводник a будет пересекать магнитный поток сверху вниз. Магнитный поток направлен слева направо (от N к S). Пользуясь правилом правой

руки, найдем, что э. д. с. в проводнике *a* будет направлена на нас.

При движении проводника *a* по левой половине окружности он будет пересекать магнитный поток снизу вверх. Очевидно, направление э. д. с. теперь будет противоположным: она будет направлена от нас. Изменение направления э. д. с. в проводнике *a* на противоположное происходит, когда проводник проходит через точки *a* и *b* окружности. То же самое надо сказать и о проводнике *b*, с той лишь разницей, что направление э. д. с. в проводнике *b* всегда противоположно направлению э. д. с. в проводнике *a*. Плоскость (проведенная через точки *a* и *b*), при прохождении через которую проводника направление э. д. с. в нем изменяется на противоположное, называется *нейтральной плоскостью*. Итак, за каждый оборот витка направление э. д. с. в нем дважды меняется на противоположное.

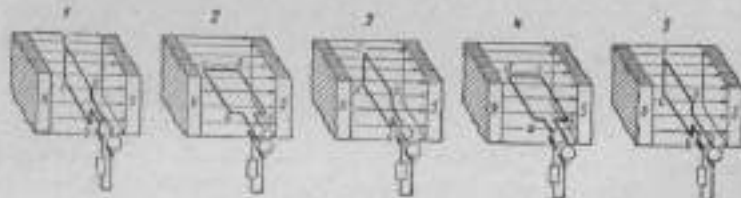


Рис. 3. Изменение магнитного потока, охватываемого контуром витка при его вращении в магнитном поле. *

Посмотрим, что же можно сказать о величине э. д. с., возникающей в витке. Рассмотрим сначала этот вопрос с точки зрения качественной, имея в виду два следующих обстоятельства.

Как было указано выше, направление э. д. с. в проводниках *ad* и *bc* (см. рис. 1) противоположно друг другу. Проводники *ad* и *bc* соединены друг с другом последовательно торцовым проводником *dc*, вследствие чего в них и складывается э. д. с. Поэтому, во-первых, применительно к витку будем иметь в виду общую э. д. с., возникающую в нем при вращении его в магнитном поле. И, во-вторых, учтем, что в соответствии с законом электромагнитной индукции величина э. д. с. индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника (в данном случае —

витка). При прохождении витка через нейтральную плоскость (рис. 2, *ad* и рис. 3, 1) магнитный поток, пронизывающий площадь, охватываемую контуром витка, максимален, но скорость изменения его равна нулю, так как при прохождении витка через нейтральную плоскость проводники *ad* и *bc* движутся вдоль линий индукции. Поэтому э. д. с. в витке в этот момент равна нулю. При дальнейшем вращении витка (например, по часовой стрелке) магнитный поток, охватываемый контуром проводника, будет уменьшаться, а скорость изменения магнитного потока будет возрастать. В витке возникнет э. д. с., возрастающая от нуля. Направление ее может быть определено так, как об этом было сказано выше.

Когда виток, повернувшись на угол в 90° , займет положение 2 (см. рис. 3), магнитный поток, пронизывающий контур витка, станет равным нулю, но скорость изменения магнитного потока будет максимальной, так как проводники *ad* и *bc* пересекают линии индукции под прямым углом. В этот момент э. д. с. в витке достигнет некоторого максимального значения, сохраняя прежнее направление.

При дальнейшем вращении витка магнитный поток, охватываемый контуром проводника, будет увеличиваться, а скорость изменения его уменьшаться.

Э. д. с., сохраняя прежнее направление, по величине будет уменьшаться.

Когда угол поворота витка (считая от начального его положения 1 в нейтральной плоскости) возрастет до 180° , виток будет вновь проходить через нейтральную плоскость (рис. 3, 3).

Магнитный поток, охватываемый контуром проводника, в этот момент времени станет максимальным, но скорость его изменения окажется равной нулю, э. д. с. в витке упадет до нуля.

При дальнейшем вращении витка магнитный поток, охватываемый контуром витка, будет уменьшаться, а скорость изменения его — возрастать. В соответствии с этим э. д. с. в витке начнет снова увеличиваться от нуля, но теперь она будет иметь направление, противоположное прежнему, так как проводники *ad* и *bc* по сравнению с положением 1 витка в нейтральной плоскости поменяются местами. Это новое направление э. д. с. в витке сохра-

нтся в течение поворота витка на следующие 180° . При прохождении витка через положение f (угол поворота 270° , см. рис. 3) магнитный поток, охватываемый контуром витка, равен нулю, а скорость изменения его, а также и величина э. д. с. максимальны, но направление противоположно тому, какое было, когда виток проходил положение d . Далее, при повороте витка на угол от 270° до 360° , магнитный поток, охватываемый контуром витка, увеличивается, скорость изменения потока уменьшается и э. д. с. падает до нуля. При прохождении витка через нейтральную плоскость после поворота на 360° (рис. 3, положение d) э. д. с. в витке снова изменит свое направление на противоположное (т. е. направление будет такое же, как то, какое было в течение поворота витка на первые 180°). Рассмотренный нами процесс изменения э. д. с. будет полностью повториться в течение каждого поворота витка на 360° . Если вращение витка равномерное, то этот процесс изменения будет периодическим.

Таким образом, приняв положение витка в нейтральной плоскости за начальное, мы можем описать изменение э. д. с. в витке при вращении его в магнитном поле следующим образом. Э. д. с. в витке, имея некоторое направление, возрастает от нуля до максимума (угол поворота 90°), затем, сохраняя то же направление, падает до нуля (угол поворота 180°), затем, изменив направление на противоположное, снова возрастает до максимума (угол поворота 270°), далее, сохраняя новое направление, падает до нуля (угол поворота 360°). В дальнейшем э. д. с. снова переменив свое направление, претерпевает тот же последовательный цикл изменений.

Проследим за этим циклом изменений э. д. с., учти количественную сторону явления.

Известно, что величина э. д. с. индукции E , возникающей в линейном проводнике длиной l , движущемся со скоростью v в однородном магнитном поле с магнитной индукцией B и пересекающем линии индукции под углом α , выражается следующей формулой

$$E = kBlv \cdot \sin \alpha,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц для измерения величин, входящих в формулу. Э. д. с. в проводнике будет максимальной, когда

$\angle \alpha = 90^\circ$, т. е. когда направление движения проводника составит прямой угол с направлением вектора индукции поля B .

$$E_m = kBlv.$$

Значение э. д. с. при движении проводника под любым другим углом к направлению вектора индукции может быть выражено через максимальную э. д. с.

$$E = E_m \cdot \sin \alpha.$$

(Попутно заметим, что правая часть выражения $E = kBlv \cdot \sin \alpha$, а также и выражения $E = E_m \cdot \sin \alpha$ дает скорость изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника, так же как и правая часть другой формулы закона явления электромагнитной индукции:

$E = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, где $\Delta \Phi$ — изменение магнитного потока, а Δt — промежуток времени, в течение которого произошло это изменение магнитного потока.)

Вернемся к витку, вращающемуся в магнитном поле (см. рис. 1 и 2).

При равномерном вращении витка в однородном поле в проводнике ad (рис. 1; a на рис. 2) возбуждается э. д. с. $E_1 = kBlv \cdot \sin \alpha$.

Угол α по-прежнему есть угол между направлением движения проводника и направлением вектора индукции поля B . Но в этом случае он равен углу поворота витка, отсчитываемому от начального положения витка в нейтральной плоскости. Например, виток находится в положении a_1b_1 (см. рис. 2); a_1v — направление движения проводника в этот момент (касательная к дуге, по которой движется проводник, в точке a_1), a_1c — направление индукции поля (от N к S). Угол ca_1v равен углу aoa_1 , т. е. углу поворота витка.

Итак, применительно к витку, вращающемуся в магнитном поле, под углом α будем понимать угол поворота витка, отсчитываемый от начального положения его в нейтральной плоскости.

Во втором доле проводнике bc (рис. 1; b на рис. 2) также возбуждается электродвижущая сила $E_2 = kBlv \cdot \sin \alpha$. Очевидно, что $E_1 = E_2$. (Торцовые проводники dc и ab не участвуют в пересечении магнит-

ных линий, и потому э. д. с. индукции в них не возникает.)

Как указано выше, направление э. д. с. в проводниках ad и bc (рис. 1) противоположно друг другу. Проводники ad и bc соединены торцовым проводником dc последовательно друг с другом, вследствие чего э. д. с. в проводниках ad и bc складывается. Тогда э. д. с. в витке (в двух проводниках)

$$E = 2E_1 = 2kBlv \cdot \sin \alpha,$$

и в витке максимальное значение э. д. с. будет иметь место при повороте витка на 90° от нейтральной плоскости.

$$E_m = 2kBlv.$$

Выражая значение э. д. с. в витке при любом его положении через максимальную э. д. с., имеем:

$$E = E_m \cdot \sin \alpha.$$

Из полученного нами уравнения видно, как изменяется э. д. с. в витке по мере того, как увеличивается угол поворота его при вращении в магнитном поле.

При увеличении угла поворота витка от 0 до $360^\circ \sin \alpha$ меняется в пределах от 0 до ± 1 . За это же время э. д. с. в витке меняется в пределах от 0 до $\pm E_m$, а именно:

$\angle \alpha = 0^\circ$	$\sin \alpha = 0$	$E = 0$
$\angle \alpha = 90^\circ$	$\sin \alpha = 1$	$E = +E_m$
$\angle \alpha = 180^\circ$	$\sin \alpha = 0$	$E = 0$
$\angle \alpha = 270^\circ$	$\sin \alpha = -1$	$E = -E_m$
$\angle \alpha = 360^\circ$	$\sin \alpha = 0$	$E = 0$

Отсюда видно, что э. д. с. в витке, имея некоторое направление, возрастает от нуля до максимума, затем, сохраняя то же направление, уменьшается до нуля. Далее, изменив направление на противоположное, э. д. с. снова возрастает до максимума, и затем падает до нуля. Переход э. д. с. через нуль, сопровождающийся изменением направления ее, происходит при прохождении витка через нейтральную плоскость.

Таким образом, э. д. с. в витке, равномерно вращающемся в однородном магнитном поле, прямо пропорциональна синусу угла поворота витка, отсчитываемого от начального положения витка в нейтральной плоскости.

Иными словами, э. д. с. в витке, равномерно вращающемся в однородном магнитном поле, изменяется во времени по синусоидальному закону.

Методические указания

Идея о переменном токе может возникнуть в связи с первыми опытами по индукции тока. Поэтому имеющееся в начале параграфа напоминание об опытах с катушками Фарадея может оказаться полезным. Более подробное ознакомление учащихся с переменным током естественно и логично начать с рассмотрения вопроса о получении переменной э. д. с. в витке, равномерно движущемся в однородном магнитном поле. О том, что виток движется равномерно, в поле однородно, должно быть достаточно отчетливо сказано учащимися.

Как известно, в генераторах переменного тока обмотка якоря равномерно вращается в неоднородном поле. Полюсам магнитов придается такая форма, при которой магнитная индукция на поверхности стального цилиндра (якоря) изменяется вдоль окружности по синусоиде, при этом линии индукции направлены нормально к поверхности цилиндра. Этим обусловлено синусоидальное изменение э. д. с. в обмотке якоря при равномерном его вращении.

Такое изложение вопроса возможно при наличии достаточно обширных знаний у учащихся, которыми они в средней школе не владеют. Поэтому приходится считать, что поле однородно и виток в нем вращается равномерно. Этот прием и использован в § 1.

Как известно, электродвижущая сила есть величина скалярная, а не векторная. В соответствии с этим приписывать электродвижущей силе направление, строго говоря, нельзя. Тем не менее, обычно э. д. с. приписывается знак. В ряде случаев это удобно, однако условность этого приема следует иметь в виду.

В тексте § 1 осуществлена такая последовательность в изложении процесса получения переменной э. д. с. в

витке: сначала рассматривается изменение э. д. с. (за один оборот витка) по направлению, затем разбирается вопрос об изменении величины э. д. с. качественно (без математической обработки), и только после этого устанавливается и выражается аналитически зависимость переменной э. д. с. от угла поворота витка. Такая система построения учебного материала не только обеспечивает последовательность и четкость в изложении рассматриваемого вопроса, но и содействует осознанному усвоению учащимися физической сущности процесса.

Все рассуждения, связанные с получением переменной э. д. с., ведутся на основе рис. 1, 2 и 3, из которых главным является рис. 2. Этот рисунок должен быть сделан во время урока на классной доске. Для облегчения понимания учащимися сути дела целесообразно использовать распространенный в школах прибор: схематичная модель генератора переменного тока (проволочная рамка с кольцами, поворачивающаяся между двумя фигурными жесткими листами, символизирующими полюсы постоянного магнита). Этот прибор поможет учащимся разобраться по чертежу (рис. 2) в том, как и когда происходит изменение направления э. д. с., и в том, как изменяется магнитный поток, пронизывающий контур витка, при его вращении. В этом случае, может быть, удастся отказаться от выполнения на классной доске относительно трудоемкого чертежа на рис. 3, а также и чертежа на рис. 1, что существенно с точки зрения экономии времени на уроке. Но такая «экономия» времени возможна в том случае, если она не пойдет во вред делу. Понятие о переменной э. д. с. — исходное в учении о переменном токе и должно быть вполне осознанно воспринято учащимися.

При повороте витка от 0 до 90° магнитный поток, охватываемый контуром витка, *уменьшается*, а скорость изменения этого потока *увеличивается*. Создание правильных в этом отношении представлений у учащихся вызывает подчас большие трудности. Их нужно предусмотреть.

Пользуясь чертежом (рис. 2), упомянутым выше прибором (проволочная рамка между «полюсами» магнита), наконец, сделав, если нужно, на доске чертеж (рис. 3), можно достаточно наглядно показать учащимся, как происходит процесс последовательного изменения магнитного

потока, охватываемого контуром витка. В этих целях может быть использован также следующий прием.¹

В тот момент, когда виток займет положение 1 (рис. 3), т. е. его плоскость будет перпендикулярна направлению магнитного поля, проходящий через него магнитный поток Φ_m будет наибольшим. При повороте витка из этого положения на угол α магнитный поток уменьшится и делается равным $\Phi_m \cdot \cos \alpha$, в положениях 2 и 4 он обратится в нуль.

Чтобы определить величину э. д. с. индукции, необходимо установить, с какой скоростью происходит изменение магнитного потока, проходящего через виток. При равномерном вращении витка угол его поворота за одинаковое время будет один и тот же. Повернем виток из положения 1 на угол, равный 2°. Угол α возрастет от 0 до 2°, $\cos \alpha$ при этом уменьшится от 1,000 до 0,999, т. е. на 0,001, а магнитный поток изменится на 0,001 Φ_m . Посмотрим теперь, как изменится магнитный поток при повороте витка на такой же угол в 2° (т. е. за то же время) от угла $\alpha = 45^\circ$ до 47°. $\cos \alpha$ при этом уменьшается от значения 0,707 до 0,682, т. е. на 0,025, а магнитный поток, пронизывающий виток, изменится на 0,025 Φ_m . При повороте на такой же угол в 2° от 88 до 90° $\cos \alpha$ уменьшается с 0,035 до 0, а магнитный поток, проходящий через виток, на 0,035 Φ_m . Таким образом, мы приходим к выводу, что э. д. с. индукции, измеряемая быстротой изменения магнитного потока, пронизывающего виток, в различные моменты не одинакова. Она минимальна в положении 1 и по мере приближения витка к положению 2 возрастает. В положении 2 она максимальна, затем при приближении витка к положению 3 э. д. с. индукции падает до нуля и вновь становится максимальной по абсолютному значению в положении 4. При прохождении витка через положения 1 и 3 э. д. с. индукции обращается в нуль, направление ее в эти моменты меняется на противоположное.

Для большей четкости изложения этого процесса полезно сопровождать рассказ соответствующей записью на доске, отмечая в ней угол поворота витка ($\angle \alpha$), магнитный поток, пронизывающий площадь витка (Φ), ско-

¹ Предложен проф. П. А. Рыжиковым.

рость изменения этого потока $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ и величину и направление э. д. с. индукции (E).

α	Φ	$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	E
0°	максимален	0	0
$0 - 90^\circ$	уменьшается	увеличивается	увеличивается
90°	0	максимален	$+E_m$
$90 - 180^\circ$	увеличивается	уменьшается	уменьшается
180°	максимален	0	0
$180 - 270^\circ$	уменьшается	увеличивается	увеличивается
270°	0	максимален	$-E_m$
$270 - 360^\circ$	увеличивается	уменьшается	уменьшается
360°	максимален	0	0

Эти представления о связи между величиной магнитного потока, охватываемого контуром витка, и скоростью изменения потока потребуются нам и в дальнейшем при изучении принципа действия генератора трехфазного тока.

В настоящее время в программу по физике для средней школы включено понятие о магнитной индукции поля B . Это существенно, так как магнитная индукция поля B характеризует влияние магнитного поля на величину э. д. с. индукции. В связи с этим в формулу закона электромагнитной индукции ($E = kBlv \cdot \sin \alpha$) должна входить магнитная индукция поля B , а не напряженность поля H . В связи с этим нужно учесть, что во всех случаях, когда речь идет о магнитном потоке, имеется в виду поток индукции.

§ 2. Колебания э. д. с. График э. д. с.

Для рассмотренных нами изменений э. д. с. в витке характерна периодичность этих изменений во времени. В самом деле: каждое значение э. д. с. периодически, т. е. через равные промежутки времени (при условии, что виток вращается равномерно, а магнитное поле однородно), повторяется. Периодичность во времени есть признак колебательных движений. Изучая механику, мы рассматривали механические колебания, представляющие собой вид движения тел. В данном случае мы имеем дело с колебаниями величины — электродвижущей силы индукции.

Говоря о колебаниях э. д. с., мы имеем в виду, что эта величина не остается постоянной, а непрерывно изменяется с течением времени по синусоидальному закону. Подобно тому, как маятник колеблется, периодически проходя через среднее положение, так численное значение э. д. с. в витке изменится и проходит через нулевое значение, меняя при этом одно свое направление (принимаемое за положительное) на другое (принимаемое за отрицательное).

Заметим, что колебания э. д. с. обусловлены периодическим движением электронов в металлическом витке, вращающемся в магнитном поле.

В связи с тем, что э. д. с. в витке непрерывно изменяется, можно говорить только о значении ее, соответствующем какому-то определенному моменту времени, определенному положению витка в магнитном поле.

Значение э. д. с. в какой-нибудь момент времени называется мгновенным значением э. д. с.

Наибольшее значение э. д. с. называется максимальным или амплитудным значением э. д. с.

Время, в течение которого э. д. с., совершив полное колебание, принимает прежнее по величине и знаку значение, называется периодом переменной э. д. с.

Величина, обратная периоду, равная числу полных колебаний э. д. с. за 1 сек., называется частотой переменной э. д. с. За единицу частоты принимается герц (сокращенное обозначение $гц$ или Hz). Герц есть частота, при которой совершается одно колебание в секунду. В радиотехнике имеют дело с переменной э. д. с. большой частоты.

В этих случаях пользуются единицами, большими герца:

1 килогерц ($кгц$) = $10^3 гц$,

1 мегагерц ($мггц$) = $10^6 кгц$ = $10^3 гц$,

1 гигагерц ($ггц$) = $10^9 мггц$ = $10^6 кгц$ = $10^3 гц$.

Из сказанного выше о вращении витка в магнитном поле вытекает, что одно полное колебание э. д. с. происходит за один оборот витка. Отсюда ясно, что период переменной э. д. с. равен периоду вращения витка, а частота переменной э. д. с. равна частоте вращения витка (числу оборотов за 1 секунду).

Установленная нами в предыдущем параграфе формула $E = E_m \cdot \sin \alpha$, дающая зависимость э. д. с. в витке от угла поворота его, может быть видоизменена,

Угол поворота витка α может быть заменен произведением угловой скорости вращения витка на время (имеется в виду время, в течение которого виток перешел из нейтральной плоскости в данное положение, для которого вычисляется мгновенное значение э. д. с.).

$$\alpha = \omega t.$$

Угловая скорость вращения витка (в радианах в секунду) может быть выражена следующим образом:

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

$$\omega = 2\pi f,$$

где T — период вращения витка, а f — частота его вращения. Тогда формула $E = E_a \cdot \sin \alpha$ может быть написана так:

$$E = E_a \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (I)$$

или

$$E = E_a \cdot \sin 2\pi f t. \quad (II)$$

В связи с тем, что период и частота вращения витка соответственно равны периоду и частоте колебаний э. д. с., в приведенных формулах под T и f следует иметь в виду период и частоту колебаний э. д. с.

Известно, что механические колебания характеризуются особой физической величиной, называемой фазой колебания. Фаза есть величина, определяющая мгновенное положение колеблющегося тела относительно среднего положения и направление его движения. Фаза равна углу поворота подвижного радиуса, отсчитываемому от некоторого начального положения его.

По аналогии с этим выражение $\frac{2\pi}{T} t$ и $2\pi f t$ называют фазой переменной э. д. с. Фаза переменной э. д. с. равна углу поворота витка, отсчитываемому от нейтральной плоскости. Этот угол обычно выражают в радианах.

Из формул (I) и (II) видно, что э. д. с. в витке прямо пропорциональна синусу фазы колебания.

В правую часть формул $E = E_a \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t$ и $E = E_a \cdot \sin 2\pi f t$ входит время (еще раз подчеркнем, что t — это время, которое прошло с того момента, когда виток находился в нейтральной плоскости, до данного момента,

для которого вычисляется мгновенное значение э. д. с.). Таким образом, эти формулы дают аналитическое выражение зависимости э. д. с. от времени (период T и частота f являются в каждом данном случае величинами постоянными).

Зависимость э. д. с. от времени может быть выражена и графически. Графически зависимость э. д. с. в витке

от времени выражается синусоидой (рис. 4). На этом графике на оси абсцисс отложено время (в долях периода), на оси ординат — значения э. д. с. Над осью абсцисс написаны доли периода, а под осью — фазы, численно равные углу поворота витка (в радианах) и соответствующие этим моментам времени. На графике видно, что в течение первой половины периода э. д. с. имеет одно направление, а в течение второй — противоположное. Плюс E_a и минус E_a — амплитудные значения э. д. с. (амплитуда э. д. с.).

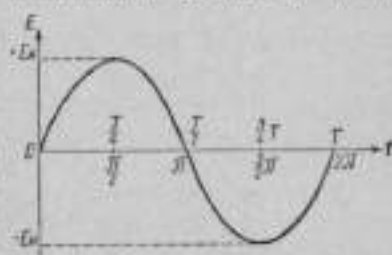


Рис. 4. График переменной э. д. с. (зависимости э. д. с. от времени).

Период, амплитуда и частота являются основными параметрами, характеризующими данную переменную э. д. с. Помимо перечисленных величин, для характеристики переменных э. д. с. применяют еще одну величину, называемую угловой (или круговой) частотой. Угловая (или круговая) частота переменной э. д. с. численно равна угловой скорости вращения витка.

Круговая частота обозначается буквой ω .

$$\omega = 2\pi f,$$

где f — частота переменной э. д. с. в герцах.

Методические указания

Материал настоящего параграфа теснейшим образом связан с изучением о механических колебаниях. Знания учащихся в этой области имеют огромное и решающее значение в деле осознанного усвоения ими не только понятия о переменной э. д. с. и о переменном токе, но и такой важной темы, как «Электромагнитные колебания и волны».

Поэтому надо настоятельно рекомендовать учителю физики перед изучением темы „Переменный ток“ задать учащимся повторить тему „Механические колебания“ и проверить их знания в этом отношении. Только в этом случае учащиеся осознанно воспримут понятие о переменной э. д. с., величины, характеризующие колебания э. д. с., формулы $E = E_m \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t$ и $E = E_m \cdot \sin 2\pi ft$, аналогичные формулам $x = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t$ и $x = A \cdot \sin 2\pi ft$, дающим зависимость

смещения от времени в гармоническом колебательном движении. (Именно поэтому в учение о механических колебаниях и волнах должно включаться рассмотрение вопроса о связи между колебательным и вращательным движением.)

Опыт работы учителей физики X классов свидетельствует о том, что, при наличии у учащихся нужных знаний в области учения о механических колебаниях, весь материал § 2 усваивается ими достаточно осознанно, быстро, и при этом совершенно отпадает необходимость бессмысленного заучивания. И наоборот, при отсутствии указанных знаний у учащихся при изучении переменного тока возникают буквально непреодолимые трудности: не удается создать у учащихся представления не только о такой величине, как фаза, но даже и о таких величинах, как период, частота, мгновенное и амплитудное значение э. д. с. В этих условиях учащиеся, как правило, встают на путь заучивания. Отсюда — формализм в знаниях учащихся, особенно недопустимый в учении о переменном токе, столь важном в политехническом обучении. Эта опасность должна быть предотвращена учителем, который должен вести борьбу за осознанные знания учащихся.

§ 3. Переменный ток

До сих пор, говоря о витке, равномерно вращающемся в однородном магнитном поле, мы имели в виду, что виток разомкнут. С помощью контактных колец и щеток виток можно замкнуть на какое-либо сопротивление. В этой замкнутой цепи пойдет ток. Каким же будет этот ток?

Так как э. д. с., возбуждаемая в витке, непрерывно изменяется, то в соответствии с этим и ток в цепи будет непрерывно изменяться. Очевидно, что ток, так же как и э. д. с., будет возрастать от нуля до некоторого максимума, затем падать до нуля, а дальше, изменив направ-

ление на противоположное, снова возрастать до максимума, затем падать до нуля и т. д. Дважды за один оборот витка ток в цепи будет проходить через нулевое значение, меняя при этом свое направление на противоположное. Соответственно тому, как периодически изменяется (и по величине, и по направлению) э. д. с. в витке, будет периодически изменяться (и по величине, и по направлению) и ток в цепи.

Зная, как изменяется э. д. с. в витке, можно сказать, как будет изменяться ток в замкнутой цепи.

Как выше установлено, э. д. с. в витке прямо пропорциональна синусу угла поворота витка,

$$E = E_m \cdot \sin \alpha. \quad (I)$$

Разделяя обе части равенства (I) на полное сопротивление всей цепи R , согласно закону Ома, получим выражение, дающее зависимость величины тока от угла поворота витка, а именно

$$\frac{E}{R} = \frac{E_m}{R} \cdot \sin \alpha. \quad (II)$$

В формуле (II) $\frac{E}{R}$ есть мгновенное значение тока, а $\frac{E_m}{R}$ — максимальное (амплитудное) значение тока. Тогда формула (II) может быть переписана следующим образом:

$$i = I_m \cdot \sin \alpha. \quad (III)$$

Как видим, ток прямо пропорционален синусу угла поворота витка (по-прежнему угол поворота витка отсчитываем от начального положения витка в нейтральной плоскости).

При увеличении угла поворота витка от 0 до 360° синус угла меняется в пределах от 0 до ± 1 . За это же время ток в цепи меняется в пределах от 0 до $\pm I_m$. Здесь, так же как и в случае переменной э. д. с., мы имеем дело с колебаниями физической величины — величины тока. Колебания величины тока обусловлены периодическим движением электронов в цепи.

Значение величины тока в какой-либо момент времени называется мгновенным значением переменного тока.

Наибольшее значение тока называется максимальным или амплитудным значением переменного тока.

Наибольшее значение ток имеет тогда, когда угол поворота витка равен 90 и 270°. Знаки плюс и минус

соответствуют: один положительному, а другой отрицательному направлению тока.

Возьмем прибор, известный под названием „виток в магнитном поле“. Он представляет собою прямоугольную рамку, состоящую из нескольких витков провода с концами, припаянными к контактным кольцам, к которым прижимаются щетки. Рамка расположена между дуговыми полюсными наконечниками постоянного подковообразного магнита.

Расположим виток в нейтральной плоскости и соединим щетки прибора с зеркальным гальванометром. Световой „зайчик“ неподвижен и находится посредине шкалы. Будем медленно (рукой) равномерно вращать виток, поворачивая его из нейтральной плоскости на угол в 360° . При повороте витка в пределах 90° „зайчик“ будет перемещаться по шкале, например влево, и достигнет некоторого крайнего положения при угле поворота витка в 90° . При увеличении угла поворота витка от 90° до 180° „зайчик“ вернется к нулевому делению посредине шкалы. При дальнейшем увеличении угла от 180° до 270° „зайчик“ станет перемещаться направо от нуля шкалы (очевидно, направление тока в витке изменилось на противоположное) до некоторого крайнего правого положения. При увеличении угла от 270° до 360° „зайчик“ возвращается к нулевому делению шкалы. При каждом повороте витка на 360° этот процесс повторяется вновь.

Время, в течение которого ток, совершив полное колебание, примет прежнее по величине и знаку значение, называется периодом переменного тока.

Величина, обратная периоду, равная числу полных колебаний тока за 1 секунду, называется частотой переменного тока.

Период переменного тока равен периоду вращения витка, а частота переменного тока равна частоте вращения витка (числу его оборотов в 1 секунду). Заменяя в формуле (III) угол поворота витка произведением угловой скорости вращения витка на время, так же как это было сделано по отношению к формуле переменной э. д. с. (см. § 2), получаем

$$i = I_m \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t; \quad (IV)$$

$$i = I_m \cdot \sin 2\pi ft, \quad (V)$$

Здесь T — период переменного тока, f — частота переменного тока.

Выражения $\frac{2\pi}{T} t$ и $2\pi ft$ дают фазу колебания тока, численно равную углу поворота витка (в радианах), отсчитываемого от нейтральной плоскости.

Формулы (IV) и (V) дают зависимость величины переменного тока от времени, которое прошло с того момента, когда виток находился в нейтральной плоскости, до данного момента времени.

Графически зависимость тока от времени выражается синусоидой (рис. 5). На оси абсцисс отложено время (в долях периода), на оси ординат — значения величины тока.

График зависимости тока от времени называют графиком переменного тока. Над осью абсцисс написаны доли периода, а под осью — фазы, численно равные углу поворота витка (в радианах), соответствующие этим моментам времени. На графике видно, что в течение первой половины периода ток имеет одно направление, а в течение второй — противоположное. Плюс I_m и минус I_m — амплитудные значения переменного тока.

Так же, как и ток, будет изменяться по синусоидальному закону и напряжение на любом участке внешней цепи, на которую замкнут виток. В частности, синусоидально будет изменяться и напряжение на щетках, т. е. напряжение во внешней цепи.

Переменные токи (э. д. с., напряжение) отличаются друг от друга периодом, частотой и амплитудой. Так же как и переменная э. д. с., переменные токи характеризуются еще одной величиной — угловой (или круговой) частотой.

Угловая (или круговая) частота переменного тока численно равна угловой скорости вращения витка,

$$\omega = 2\pi f,$$

где f — частота переменного тока в герцах.

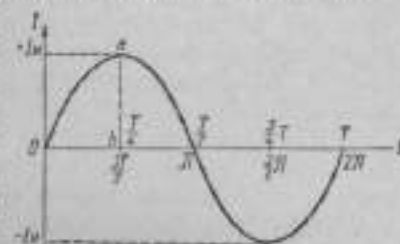


Рис. 5. График переменного тока (зависимости величины тока от времени).

Характерной особенностью рассмотренного нами переменного тока является то, что величина тока изменяется во времени так же, как изменяется синус угла с увеличением угла, причем каждое значение тока периодически (через равные промежутки времени) повторяется.

Ток, величина которого изменяется во времени по синусоидальному закону (пропорционально синусу угла поворота витка), называется синусоидальным переменным током.

График этого тока представляет собой кривую, которая графически изображает закон, по которому изменяется с течением времени величина тока. Про такую кривую говорят, что она передает *форму переменного тока*. Так как такой кривой для рассматриваемого нами тока является синусоида, поэтому такой ток называют не просто переменным током, а *синусоидальным переменным током*.

В технике в большинстве случаев применяют синусоидальный переменный ток, для краткости называя его просто переменным током. Синусоидальный переменный ток вырабатывают все тепло- и гидроэлектростанции, этим током пользуются на промышленных предприятиях и в жилых домах.

В СССР (и в большинстве других стран) вырабатывается ток с частотой 50 гц. Следовательно, период такого переменного тока $\frac{1}{50}$ секунды. Отсюда следует, что ток, которым мы пользуемся, непрерывно изменяясь, 100 раз в секунду проходит через нулевое значение и каждый раз при этом меняет свое направление на противоположное. Эти стократные в секунду падения тока до нуля внешне незаметны: нить лампы накаливания испускает свет непрерывно,¹ непрерывно накаленной оказывается и спираль электроплитки. Обусловлено это тем, что проводник не успевает охлаждаться при быстро следующих друг за другом падениях тока до нуля.

Синусоидальная форма переменного тока (э. д. с., напряжения) не есть единственно возможная. Формы переменного тока в отдельных случаях могут быть значительно сложнее.

¹ Небольшие изменения яркости все же обнаружить можно (например, стробоскопически).

Одним из наиболее простых примеров несинусоидального тока может служить пульсирующий ток (см. рис. 82), получаемый в результате так называемого выпрямления синусоидального переменного тока (см. § 24). Этот ток — изменяющийся по величине, но постоянный по направлению. В радиотехнике применяют периодический несинусоидальный ток, который получается в результате сложения нескольких синусоидальных токов. На рис. 6 показан график сложного несинусоидального тока, полученного при сложении двух синусоидальных токов. Этот ток периодически изменяется и по величине, и по направлению.

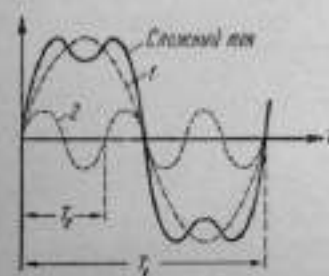


Рис. 6. График сложного несинусоидального тока, полученного в результате сложения двух синусоидальных токов.

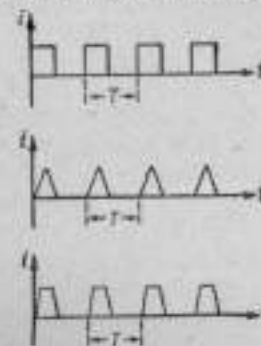


Рис. 7. Графики импульсных токов разной формы.

В радиолокации применяются импульсные токи, также относящиеся к числу несинусоидальных (рис. 7). Форма импульсов тока (э. д. с., напряжения) может быть различной. Характерной особенностью импульсных токов является то, что они имеют место в цепи только в течение некоторой части периода. Импульсные токи — тоже токи одного направления.

На рис. 11 дан график пилообразного напряжения, подаваемого на пластины развертки электронно-лучевой трубки (см. § 4). Это напряжение создается с помощью особого генератора.

Выше было сказано, что ток, подаваемый предприятием и в жилые дома для бытовых целей, есть синусоидальный переменный ток. В том, что этот ток переменный,

можно убедиться на ряде опытов. Остановимся, например, на следующих.

1. Составим цепь из лампы накаливания и двух амперметров: одного электромагнитной системы (для постоянного и переменного тока) и другого — магнито-электрической системы (с постоянным магнитом, для постоянного тока). Подключим собранную цепь к осветительной сети. Лампа горит, стрелка амперметра электромагнитной системы отклонилась, а стрелка второго амперметра дрожит, не отклонившись заметно от нуля. Подвижная стальная пластинка в амперметре электромагнитного типа, находясь в переменном магнитном поле катушки, по которой идет переменный ток, периодически перемагничивается. Поэтому в каждый данный момент времени из ее конца, ближайшем к катушке, образуется полюс, противоположный полюсу катушки. В результате этого стальная пластинка притягивается к катушке, а ось, на которую насажена пластинка и стрелка, связанная с осью, поворачивается на некоторый угол. Подвижная система в амперметре магнито-электрического типа представляет собой катушку с небольшим числом витков, по которой проходит переменный ток, идущий по данной электрической цепи. Катушка находится в постоянном магнитном поле магнита. В соответствии с периодическими изменениями направления тока (100 раз в секунду), катушка должна была бы с такой же частотой поворачиваться то в одну, то в другую сторону. Вследствие инерции подвижная система не успевает следовать за колебаниями тока, практически оставаясь неподвижной.

2. Включим в электрическую цепь лампу накаливания с угольной нитью или с прямой металлической нитью. Поднесем к баллону лампы подковообразный магнит так, чтобы нить лампы оказалась между полюсами изогнутого, перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля. Нить расплывается в широкую полосу. (Колеблущуюся нить лампы можно с помощью линзы спроектировать на экран.) Это свидетельствует о том, что нить в постоянном магнитном поле быстро колеблется, смещаясь то в одну то в другую сторону. Значит, ток, идущий по нити, меняет свое направление много раз в секунду.

3. Включим в цепь постоянного тока неоновую сигнальную «питачковую» лампу. Неоновая лампа имеет два круглых электрода, в баллоне — разреженный неон. Све-

тится один электрод, соединенный с отрицательным полюсом. Переключим полюсы источника постоянного тока — светится другой электрод. Подключим неоновую лампу к осветительной сети. Теперь попеременно будет светиться каждый из двух электродов. Каждый электрод будет давать пятьдесят вспышек в секунду. Прерывистость свечения лампы может быть обнаружена, если, глядя на лампу, резко поворачивать голову вправо и влево. Известно, что при освещении прерывистым светом движение какого-либо тела кажется тоже прерывистым. Поэтому если быстро помахнуть рукой, освещенной неоновой лампой, то движение руки покажется прерывистым.

4. Подключим снова неоновую лампу к источнику постоянного тока. Взявшись за шнур на расстоянии порядка 1 м от патрона, в который ввинчена неоновая лампа, заставим ее описывать окружность в вертикальной плоскости. Светится непрерывно один электрод лампы, поэтому виден непрерывный светящийся круговой след. Подключим лампу к осветительной сети и станем снова вращать ее. Теперь попеременно вспыхивает каждый из двух электродов. След распадается на ряд отдельных светящихся кружков. Эти опыты с неоновой лампой свидетельствуют о том, что в случаях включения лампы в осветительную сеть лампа питалась переменным током.

Методические указания

Представление о переменном токе естественно вытекает из учения о переменной \mathcal{E} , д. с. Аналогичны не только колебательные процессы, но и параметры переменной \mathcal{E} , д. с. и переменного тока. Поэтому совершенно несомненно, что учащиеся, усвоившие понятие о переменной \mathcal{E} , д. с., осознанно воспримут и физическую сущность переменного тока. Для создания у учащихся представления о переменном токе целесообразно идти тем же путем, какой был взят использован при изучении переменной \mathcal{E} , д. с. Общее в процессах и в определениях величин, характеризующих \mathcal{E} , д. с. и ток, не следует рассматривать как основание для отказа от нужной постепенности и последовательности при вскрытии специфических особенностей переменного тока. Этот путь надо использовать для выполнения одного из основных педагогических положений: по возможности многократное возвращение к прежде усвоен-

ному. В данном случае это особенно существенно, так как речь идет не просто о повторении уже выученного, а о применении усвоенного к новому, хотя и аналогичному процессу.

Такая система построения учебного материала и осуществлена в § 3. Кроме того, применительно к материалу этого параграфа полезно учесть следующее соображение.

В § 2 было установлено, что в витке, равномерно движущемся в однородном магнитном поле возникает синусоидально изменяющаяся э. д. с. Отсюда вытекает, что если виток замкнут на какую-либо внешнюю цепь, то в витке и в этой цепи пойдет ток, тоже синусоидально изменяющийся. Такой подход к понятию о переменном токе и использован в § 3. При этом вопросы о фазовом соотношении э. д. с. (или напряжения) и тока, а также о том, имеет ли место сдвиг фаз или нет, здесь не затрагиваются. Эти вопросы должны явиться предметом особого изучения, а в создании первых представлений о характерных особенностях переменного тока они могут не участвовать (независимо от того, что к этому моменту учащиеся еще ничего не знают о емкостном и индуктивном сопротивлениях).

Существенно поставить опыты (хотя бы те, какие содержатся в данном параграфе), подтверждающие, что ток, подаваемый в школу — переменный. Для описанного в тексте опыта с неоновой лампой нужен источник постоянного тока (двигатель-генератор), имеющий э. д. с. в 100 в, так как потенциал зажигания указанной лампы около 70—80 в. Опыт эффектен и, главное, очень убедителен.

Может быть использована и следующая демонстрация. В цепь переменного тока включается обмотка электромагнита. Обнаруживается малая подъемная сила электромагнита, громкое гудение, сильное нагревание сердечника. Если учитель имеет время, крайне желательно питать обмотку электромагнита сначала постоянным током. Подъемная сила электромагнита относительно большая, гудения не слышно, сердечник не греется.

При наличии времени очень желательно показать или в крайнем случае только рассказать, что есть общего и различного в свойствах постоянного и переменного тока, а именно: 1) накаливание проводника происходит как под действием постоянного, так и переменного тока, 2) при

прохождении постоянного тока через раствор медного купороса происходит выделение меди, при переменном токе — не происходит,¹ 3) при электролизе воды постоянным током на аноде выделяется кислород (1 часть по объему), а на катоде — водород (2 части). При электролизе переменным током на обоих электродах выделяются одинаковые по объему смеси кислорода и водорода (гремучий газ).

Возможно предложить учащимся предсказать, что должно произойти при постановке каждого из этих опытов.

У учащихся может возникнуть вопрос о том, какое значение имеет синусоидальная форма тока. Синусоидальный переменный ток обладает рядом преимуществ перед переменными токами другой формы. Основное из них состоит в том, что с помощью синусоидального переменного тока можно получить постоянное по величине вращающееся магнитное поле. Это обстоятельство крайне существенно. Постоянное по величине вращающееся магнитное поле обеспечивает постоянство вращающего момента электродвигателей переменного тока. Однако учащиеся ознакомились с этим свойством синусоидального переменного тока позже, в связи с изучением асинхронного электродвигателя трехфазного тока.

§ 4. Методы исследования переменного тока

Механические колебания физических тел, воздействуя на наши органы чувств, становятся доступными для восприятия. Так, мы видим колебания маятника, груза, подвешенного к пружине. Колебания камертона с длинными ветвями (вспомним камертон с острием, с помощью которого можно „записывать“ колебания на закопченном стекле) обнаруживаются глазом. Колебания камертона с короткими ветвями воспринимаются нашим ухом как звук.

Электрические колебания непосредственно нами не воспринимаются. Для обнаружения их необходимо превратить электрические колебания в механические.

Задача эта может решаться различными путями.

¹ Точнее гальвора, „следы“ невидя, обыкновенно, получают то на одном электроде, то на другом.

Так, если пропускать ток, сила которого периодически изменяется, через обмотку электромагнита телефона (или электромагнитного громкоговорителя), то мембрана телефона (или диффузор громкоговорителя) будет колебаться. Происходит это потому, что колебания тока вызывают периодические изменения (колебания) силы притяжения, действующей на мембрану. Телефон непригоден для регистрации колебаний тока большой частоты, так как мембрана вследствие инерции не сможет следовать за колебаниями тока.

ШЛЕЙФ-ОСЦИЛЛОГРАФ

Меньшей инерцией обладает подвижная система в шлейф-осциллографе. Принцип действия его такой же, как и зеркального гальванометра: ток пропускается по легкой рамочке, которая может поворачиваться в магнитном поле постоянного магнита. Рамочка и прикрепленное к ней зеркальце делаются настолько легкими, что даже и при большой частоте переменного тока рамочка успевает поворачиваться, следуя за колебаниями тока, совершая колебания с такой же частотой. На зеркальце направляется узкий параллельный световой пучок из осветителя (трубочка, в одном

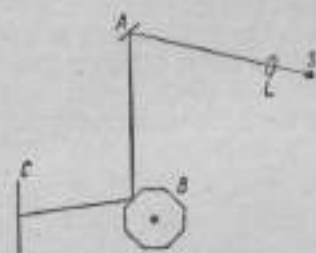


Рис. 8. Схема установки для исследования формы переменного тока с помощью осциллографа.

конце которой лампочка от карманного фонаря, а в другом — выпуклая линза; лампочка помещается в фокальной плоскости линзы). Световой пучок, отраженный от зеркальца, заставляя падать на многогранное зеркало в форме призмы, которая может вращаться вокруг своей оси. После отражения от многогранного зеркала световой пучок попадает на экран. Схема такой установки дана на рис. 8. На этом рисунке *S* — источник света, *L* — линза, *A* — зеркальце, связанное с рамочкой, *B* — зеркальная призма, *C* — экран. Если тока в рамочке осциллографа нет и зеркальная призма неподвижна, то на экране видно светлое пятнышко — след светового пучка, вышедшего из осветителя и отраженного от зеркальца *A* и от зеркальной призмы *B*. Пусть

по рамочке осциллографа идет переменный ток, а зеркальная призма *B* неподвижна. Тогда рамочка, а вместе с ней и зеркальце *A* будут совершать быстрые колебания. Отраженный световой пучок с такой же частотой будет двигаться по экрану вверх и вниз, создавая на экране светлую вертикальную полоску. Если в рамочке осциллографа тока нет (зеркальце *A* неподвижно), а зеркальная призма *B* равномерно вращается, то световой пучок будет равномерно скользить по экрану по горизонтальной прямой линии от одного конца этой линии к другому. При каждой смене одной грани многогранного зеркала (на которую падает световой пучок, отраженный от зеркальца *A*) другой гранью световой «зайчик» на экране очень быстро «перескакивает» с конца линии на ее начало и снова совершает равномерное движение от начала линии к ее концу. В итоге на экране получается светлая горизонтальная полоска.

Если по рамочке осциллографа идет переменный ток, а зеркальная призма равномерно вращается, то световой пучок на пути от зеркальца *A* до многогранника *B* будет совершать движение в вертикальной плоскости, а на пути от *B* до экрана *C* световой пучок будет одновременно совершать два движения — по вертикали и по горизонтали. Такое же сложное движение будет совершать и светлое пятно на экране. Амплитуда колебаний светлого пятна на экране по вертикали пропорциональна амплитуде колебаний рамочки осциллографа, а амплитуда колебаний рамочки зависит от величины тока, идущего по ней. Следовательно, светлое пятно на экране вычерчивает кривую, изображающую зависимость величины тока от времени. Расположение частей этой кривой относительно прямой линии, вычерчиваемой световым пятнышком при отсутствии тока в рамочке осциллографа, дает представление о направлении тока в рамочке.

Вычерчивание световым пятнышком кривой на экране длится в течение того промежутка времени, пока световой пучок, отраженный от зеркальца *A*, падает на одну и ту же грань вращающегося зеркала *B*. При смене этой грани зеркала *B* другой гранью вычерчивание кривой начинается снова. Так как световое пятно движется по экрану очень быстро, а зрительное впечатление сохраняется в глазу примерно в течение 0,1 сек., — мы видим на экране не отдельные положения светлого пятна, а непре-

рывную кривую. Поэтому, а также и потому, что накладываются друг на друга кривые почти строго идентичны, кривая на экране кажется неподвижной.

Кривая, подобная той, какая может быть получена с помощью осциллографа, питаемого переменным током от осветительной сети, показана на рис. 9.

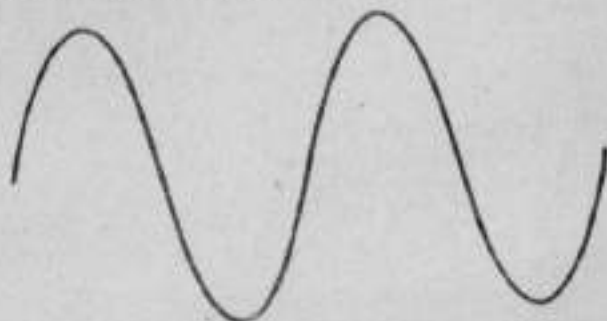


Рис. 9. Форма городского переменного тока.

Вычертив на этом рисунке ось абсцисс и ось ординат, получим кривую, графически изображающую закон, по которому изменяется с течением времени величина и направление тока (см. рис. 5).

В данном случае полученная кривая очень близка к синусоиде.

Таким образом может быть исследована форма переменного тока, идущего по рамочке осциллографа. В шлейф-осциллографе роль рамочки выполняет легкая узкая петля (шлейф). Такой осциллограф пригоден для обнаружения электрических колебаний до 20 000 μ .

ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Для исследования электрических колебаний более высокой частоты прибегают к помощи электронного (или иначе — катодного) осциллографа, основной частью которого является электроннолучевая трубка.

Электроннолучевая трубка устроена следующим образом. Из стеклянного баллона, имеющего на одном конце конусообразное расширение (рис. 10), воздух откачан до высокого вакуума. Внутренняя поверхность стекла в части трубки Э покрыта каким-либо веществом (напри-

мер, окисью цинка), способным флюоресцировать под действием ударов электронов. Внутри трубки имеется несколько электродов. Буквой К обозначен катод (он может быть различного устройства), в основе которого — нить накала, испускающая при накаливании электроны. Буквой А обозначен анод (обычно цилиндрической формы), которому сообщается высокий положительный потенциал относительно катода (порядка нескольких сотен или тысяч вольт). За анодом помещаются две пары пластин: P_y — пластины вертикального отклонения (или пластины y -грн) и P_x — пластины горизонтального отклонения (или пластины x -грн).

Проводники от электродов подводятся к штырькам на цоколе трубки. На рис. 10 они для ясности показаны выведенными через стенки трубки.

Электроннолучевая трубка работает следующим образом. Накаленный катод К испускает электроны, которые под действием сил электрического поля летят по направлению к аноду, получая значительное ускорение, а значит — и скорость. Под действием электрических полей особых электродов, не показанных на рисунке (управляющий электрод около катода, второй, а иногда и третий анод с диафрагмами),¹ поток электронов обращается в тонкий пучок, в так называемый электронный луч.

Электронный луч, по выходе из анода, проходит между двух пар пластин P_y и P_x . Если к последним не подведено напряжение, то электронный луч пройдет между ними, не претерпев отклонения, и попадет на экран Э, вызвав из-за этого появление светящегося пятнышка. Если на пластины P_y подано переменное напряжение, то электронный луч, а значит и светлое пятнышко на экране, будет колебаться по вертикали. На эти пластины P_y подается исследуемое напряжение.

На пластины P_x с помощью особого генератора раз-
вертки подается так называемое пилообразное напряжение, график которого дан на рис. 11. Если на пластины



Рис. 10. Электроннолучевая трубка.

¹ См. И. П. Жеребцов. Радиотехника. Связьиздат, 1953.

P_1 подано пилообразное напряжение, а пластины P_2 не заряжены, то электронный луч и пятнышко на экране в течение промежутка времени, пока растет напряжение на пластинах P_1 (до верхнего конца зубца „пила“), равномерно движутся по горизонтали. Когда же напряжение на пластинах P_1 резко упадет, луч и пятнышко на экране чрезвычайно быстро вернутся в исходное положение, после чего начнут опять равномерное движение по горизонтали. Если на пластины P_2 подано исследуемое переменное напряжение, а на пластины P_1 — пилообразное, то пятнышко на экране будет участвовать одновременно в двух движениях. В результате электронный луч „нарисует“ на экране развертку исследуемого напряжения по времени.



Рис. 11. График пилообразного напряжения.

Для того чтобы „рисуемая“ на экране кривая казалась неподвижной, надо, чтобы период пилообразного напряжения или был равен периоду напряжения на пластинах P_1 , или был бы в целое число раз больше.

Если на пластины P_2 подать переменное напряжение от городской осветительной сети, то на экране электроннолучевой трубки будет видна синусоида.

Заряд, приносимый пучком электронов на экран, необходимо отводить. С этой целью внутренние стенки трубки покрывают слоем проводящего вещества (графита). Этот слой соединяется с землей. Так как электроны обладают очень малой инертностью, то электронный луч успевает следовать за очень быстрыми колебаниями — порядка миллионов герц.

Методические указания

В настоящее время осциллографы имеют исключительно большое значение как в области науки, так и в области техники. Несомненно, что учащиеся средней школы должны достаточно хорошо знать устройство и принцип действия не только магнито-электрического осциллографа, но и катодного. Основная часть катодного осциллографа — электроннолучевая трубка, которая получила столь широкое

распространение в технике, в частности в телевидении, в радиолокации. Ознакомление учащихся с магнито-электрическим осциллографом предусмотрено программой в теме „Магнитное поле“ (в связи с изучением электроизмерительных приборов), т. е. до настоящей темы. Электроннолучевая трубка рассматривается в связи со следующей за „Переменным током“ темой „Электромагнитные колебания и волны“. Вполне возможно отнести изучение электроннолучевой трубки к теме „Переменный ток“, что даст возможность использовать катодный осциллограф уже при изучении переменного тока. В этом случае можно увеличить время, отводимое на изучение переменного тока, на один урок, а время на изучение электромагнитных колебаний уменьшить на 1 час.

Известно, что в усвоении устройства и принципа действия осциллографа, особенно катодного, у учащихся возникают большие затруднения. В связи с этим можно рекомендовать воспользоваться следующей установкой, поясняющей идею, лежащую в основе как магнито-электрического, так и катодного осциллографа.

На рис. 12 буквой *A* обозначен проекционный фонарь, *B* — круглая диафрагма, *L* — собирающая линза, *C* — небольшое логотонкое зеркальце, прикрепленное мendeleeвской замазкой к стальной упругой полоске *D* (полотно от ножовки по металлу), зажатой в тисках *E*. Зеркальце расположено под углом примерно в 45° к оптической оси линзы. *F* — многогранное зеркало, которое может вращаться вокруг вертикальной оси. *G* — экран. Стальная полоска *D* упруга. Поэтому если, взявшись за ее свободный верхний конец, отклонить полоску и затем отпустить, то полоска, а вместе с ней и зеркальце будут колебаться. Колебания зеркальца будут происходить по дуге. Установка может быть собрана на демонстрационном столе, а экран расположен метрах в двух от стола. Аудитория затемнена.

Целесообразен следующий порядок демонстрации.

1. Фонарь дает свет. Все неподвижно. На экране виден светлый кружок. Пользуясь чертежом установки на доске и самой установкой, объясняем ход светового пучка.

2. Приводим (рукой) в очень медленное вращение многогранное зеркало. Светлый кружок на экране медленно движется, например, слева направо. Достигнув

крайнего правого положения, кружок резко перескакивает в крайнее левое положение и затем медленно движется к крайнему правому положению. Достигнув его, кружок опять скачком переходит в левое крайнее положение, движется направо и т. д. Объясним, почему это так происходит.

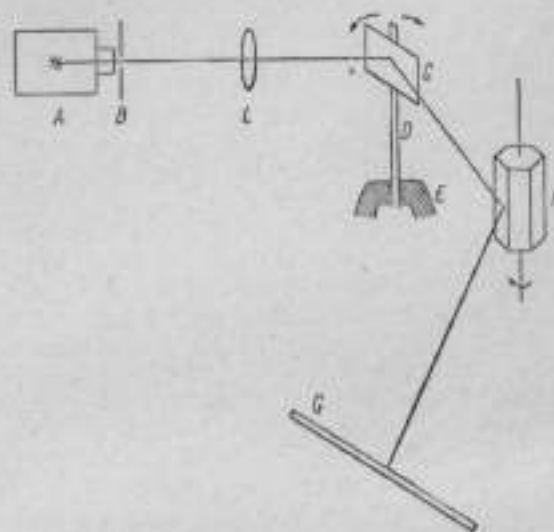


Рис. 12. Схема установки для демонстрации принципа действия осциллографа.

3. Приводим (опять рукой) многогранное зеркало в относительно быстрое вращение. На экране — сплошная горизонтальная светлая линия. Светлого кружка в отдельности не видно. Объяснение.

4. Останавливаем многогранное зеркало. Положив палец на верхний свободный конец ножовки, заставляем зеркальце совершать медленные вынужденные колебания. Светлый кружок на экране медленно движется сверху вниз, а затем снизу вверх по одной и той же вертикальной прямой. Объяснение.

5. Отогнув верхний конец ножовки, отпускаем его. Зеркальце колеблется с относительно большой частотой. На экране сплошная вертикальная светлая линия. Объяснение.

Предлагаем учащимся, смотря на экран, довольно быстро, но плавно поворачивать голову вправо и влево. Учащиеся на экране видят синусоиду. (На первых порах зрелище производит на них очень сильное впечатление.) Объяснение.

6. Приводим зеркальце в свободные колебания и заставляем (от руки) вращаться многогранное зеркало. На экране видна синусоида. Объяснение.

Трудно переоценить значение этой демонстрации в осознанном усвоении учащимися принципа действия осциллографа. (Попутно заметим, что описанная установка с успехом может быть применяема при изучении механических колебаний. Если она в то время ставилась, то в этом случае демонстрация может быть проведена очень быстро, с целью только напомнить учащимся уже им известное.)

Естественное место демонстрации — до рассмотрения магнито-электрического осциллографа. В процессе демонстрации могут быть использованы объяснения, какие приведены в § 4 применительно к шлейф-осциллографу.

В электроннолучевой трубке электронного (катодного) осциллографа роль светового пучка выполняет узкий пучок быстро движущихся электронов. Его так и называют — электронным лучом (или пучком). Отклонение электронного луча осуществляется с помощью электрического поля.

Усвоению учащимися принципа действия катодного осциллографа, помимо только что описанной демонстрации, может способствовать еще следующая, ставящаяся перед рассмотрением электроннолучевой трубки. В штатив зажимается трубка Крукса с сильно разреженным газом, служащая для демонстрации отклонения катодных лучей в магнитном поле. Около катода этой трубки имеется кружок со щелью, через которую проходит узкий пучок катодных лучей (электронов), скользящих вдоль экрана, покрытого веществом, люминесцирующим под действием катодных лучей. Электроды трубки соединяются с соответствующими полюсами индукционной катушки Румкорфа. Класк затемнен. Установка приведена в действие. На экране (и в трубке) видна светлая полоска — след, оставленный электронным лучком. Сначала полезно напомнить учащимся известный им опыт по отклонению катодных лучей в постоянном магнитном поле (на это

уходит не больше одной минуты). К трубке сбоку подносится подковообразный магнит так, чтобы катодный пучок был перпендикулярен к магнитным линиям поля. Светящийся след на экране смещается в сторону. Меняем полюсы магнита местами. След отклоняется в другую сторону. Затем к трубке сбоку подносим катушку от школьного разборного трансформатора с надписью „120 в“. Последовательно с катушкой включен реостат (ом на 50, на 2 ампера) с движком. Эта цепь (катушка с реостатом) подключается к осветительной сети (рис. 13).

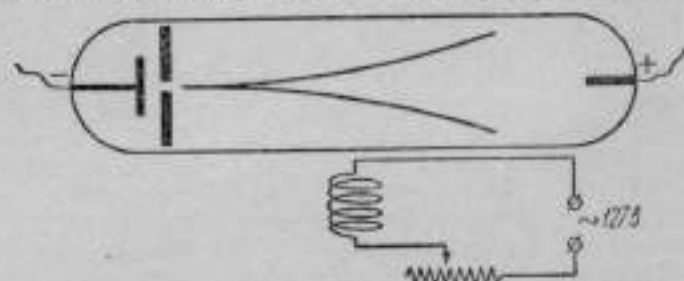


Рис. 13. Отклонение катодного пучка в переменном магнитном поле.

На экране появляется светящийся „веер“, на котором особенно отчетливо видны два следа катодного пучка в крайних положениях. Следы кажутся неподвижными. Объяснение следующее.

По катушке идет переменный ток, создающий переменное магнитное поле. Катодный пучок отклоняется то в одну, то в другую сторону, т. е. колеблется. Скорость перемещения пучка по экрану от одного крайнего положения к другому весьма велика, но в крайних положениях она равна нулю. Поэтому на экране особенно отчетливо видны два следа катодного пучка в крайних положениях.

В связи с рассмотрением электроннолучевой трубки у учащихся обычно возникает вопрос о том, как получают пилообразное напряжение. Можно познакомить учащихся с принципом действия релаксационного генератора на основе следующей демонстрации.

Батарея конденсаторов C_1, C_2, C_3 через сопротивление R подключается к источнику постоянного тока E . Параллельно батарее конденсаторов присоединяется неоновая

лампа Ne (рис. 14). Неоновая лампа зажигается тогда, когда напряжение на ее электродах достигнет определенного для каждой данной лампы напряжения, называемого потенциалом зажигания, и гаснет при более низком напряжении, называемом потенциалом погасания. Для каждой лампы потенциал зажигания всегда выше потенциала погасания. Эти потенциалы не являются строго постоянными характеристиками лампы, — они могут

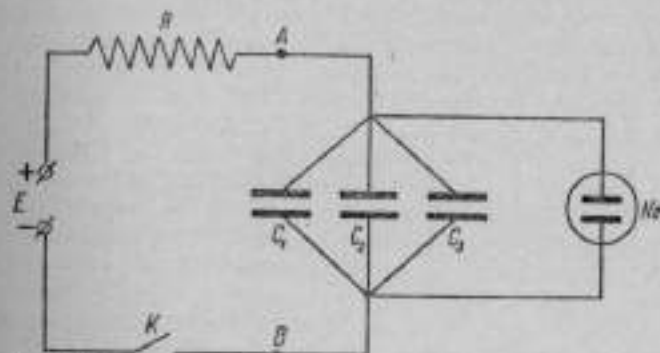


Рис. 14. Схема релаксационного генератора (дающего пилообразное напряжение).

несколько измениться в зависимости от степени ионизации неона в лампе и продолжительности службы ее. Для ламп, рассчитанных на напряжение в 127 в, потенциал зажигания порядка 90 в, а погасания — 75 в. В установке, показанной на рис. 14, источник тока должен давать напряжение выше потенциала зажигания, т. е. порядка 100 в, емкость батареи конденсаторов может быть весьма различной, например, 2—6—12 μF (нужная емкость подбирается опытным путем), сопротивление R — порядка десятков тысяч ом, неоновая лампа — любого типа с потенциалом зажигания меньшим 100 в (например, типа МН-3, МН-5). Демонстрация ведется следующим образом.

Замыкаем рубильник K . Батарея конденсаторов начинает заряжаться. Когда напряжение на ней достигнет потенциала зажигания неоновой лампы, лампа вспыхнет. Батарея конденсаторов разрядится до потенциала погасания неоновой лампы. Лампа погаснет. Затем батарея конденсаторов снова начнет заряжаться, и когда напряжение на ней

достигнет потенциала зажигания, лампа вновь вспыхнет, и т. д. В итоге неоновая лампа периодически вспыхивает. Длительность вспыхек невелика — порядка нескольких микросекунд. Частота вспыхек лампы зависит от емкости батарей конденсаторов (с уменьшением емкости частота вспыхек увеличивается), от величины сопротивления R и от величины напряжения, подаваемого источником тока E . Так как потенциалы зажигания и погасания лампы отличны друг от друга, то несомненно, что этот опыт свидетельствует о том, что напряжение на батарее конденсаторов периодически изменяется в пределах между потенциалами зажигания и погасания неоновой лампы. На рис. 11

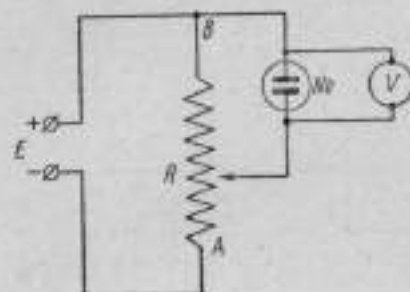


Рис. 15. Схема установки для определения потенциала зажигания и погасания неоновой лампы.

электроннолучевой трубки называют периодом развертки. Можно показать эту пилообразную кривую с помощью осциллографа. С этой целью шлейф осциллографа следует подключить, например, к точкам A и B установки, показанной на рис. 14.

На графике рис. 11 видно, как напряжение относительно медленно возрастает от минимального значения до максимального, а затем очень быстро падает до минимального, после чего напряжение снова относительно медленно увеличивается до максимума и т. д.

При желании потенциалы зажигания и погасания неоновой лампы могут быть легко определены опытным путем с помощью установки, изображенной на рис. 15. На этом рисунке E — источник постоянного тока на 100–120 в, R — реостат с движком на 300–500 ом, используемый в качестве потенциометра, Ne — неоновая

лампа и V — вольтметр постоянного тока на 100 в. Начальное положение движка реостата — ближайшее к точке B . Медленно передвигая движок от B к A , постепенно увеличиваем напряжение на электродах лампы до тех пор, пока лампа не загорится. Вольтметр в этот момент и покажет потенциал зажигания. Медленно передвигая движок реостата в противоположном направлении (от A к B), постепенно уменьшаем напряжение на электродах лампы до тех пор, пока лампа не погаснет. По показаниям вольтметра в этот момент определяем потенциал погасания.

Знакомить учащихся на уроке с принципом работы релаксационного генератора обычно не удается — не хватает времени. Этот вопрос может служить интересной темой для внеклассных занятий.

Демонстрацию же формы переменного тока всем учащимся на уроке с помощью осциллографа (магнито-электрического или электронного) в ваше время следует считать безусловно необходимой. Эта демонстрация вместе с прежде поставленными, описанными в § 3, создаст у учащихся весьма наглядные и правильные представления о способах получения переменного тока и его характерных особенностях.

М. А. Ушаков¹ предлагает для демонстрации учащимся переменного тока использовать специальный прибор, являющийся по существу преобразователем постоянного тока в переменный. Преобразование это осуществляется путем подключения к источнику постоянного тока реостата по потенциометрической схеме. Напряжение на нагрузочную цепь снимается с движка и со средней точки реостата (рис. 16). Ясно, что при плавном перемещении движка реостата сверху вниз и снизу вверх напряжение на нагрузочном сопротивлении будет плавно изменяться при переходе через нулевое значение, меняя свое направление на противоположное. Тот же автор рекомендует и действующую модель генератора переменного тока, основанную на этом принципе.

Более подробные указания на использование этих приборов читатель найдет в указанных книгах М. А. Ушакова.

¹ См. М. А. Ушаков. Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955; М. А. Ушаков. К изучению законов электрического тока. Учпедгиз, 1953.

Нет нужды доказывать, что замена изучения какого-либо „естественного“ процесса, хотя бы и быстро протекающего, другим „искусственным“ процессом, дающим такие же внешние результаты, но отличным по своей физической сущности, совершенно недопустима. Такая „благонамеренная фальсификация“ противоречит требованиям физики как науки о природе, методологии и методике преподавания физики, так как в данном случае физический процесс, протекающий в „действующей модели генератора переменного тока“, не имеет абсолютно

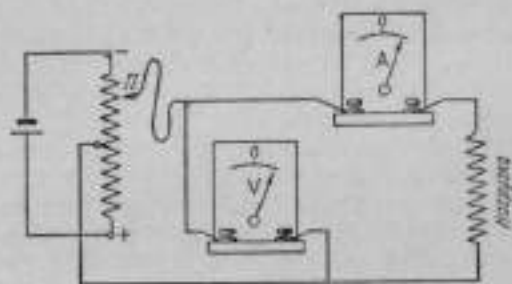


Рис. 16. Схема преобразователя постоянного тока в синусоидальный переменный ток.

ничего общего с возбуждением переменного тока в витке, вращающемся в магнитном поле. Поэтому отпираться в изучении способов получения переменного тока от указанных выше приборов мы считаем приемом глубоко ошибочным. (Нам известны случаи проявления такой тенденции и не только в средней, но и в высшей школе.) В соответствии со сказанным, необходимо горячо поддержать мысль М. А. Ушакова, выраженную следующей фразой: „Чтобы избежать неправильных представлений, могущих возникнуть у учащихся в связи с этим положением (речь идет о наличии напряжения на клеммах модели генератора при неподвижном витке. — К. Е.), учитель должен непременно сначала показать явление в „натуральном виде“, а затем, *раскрыв принципы работы этой модели*, перейти к демонстрации с ее использованием“.¹

¹ М. А. Ушаков. Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1953.

Совершенно правильно, с нашей точки зрения, установка. Несколько уточнив ее, можно добавить, что следует не только „показать явление в натуральном виде“, но и изучить его, а конечный результат процесса — периодические изменения э. д. с. (напряжения, тока) — проиллюстрировать на указанной модели. Этим целям могут прекрасно служить приборы, описанные М. А. Ушаковым. Особенно велико значение их для школ, не располагающих переменным током. Все это дает основание настоятельно рекомендовать учителям физики воспользоваться советами, содержащимися в книжках М. А. Ушакова по изготовлению упомянутых приборов и использованию их для соответствующих демонстраций.

§ 5. Генератор переменного тока

Генераторами называются электрические машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую. В основе действия генераторов лежит явление электромагнитной индукции.

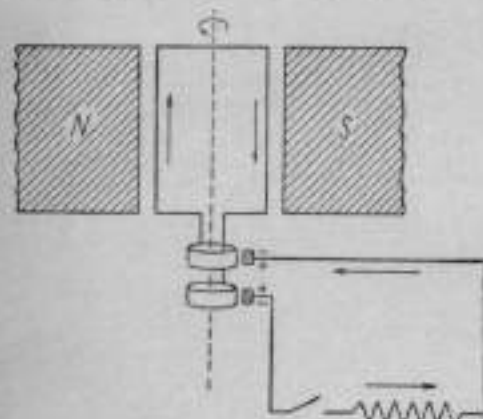


Рис. 17. Принципиальная схема генератора переменного тока.

Принцип действия генератора переменного тока рассмотрен нами в § 1—3, а чертеж на рис. 1 может рассматриваться как принципиальная схема такого генератора. Принципиальная схема генератора переменного тока

может быть изображена и так, как это показано на рис. 17.

Рассмотрим сначала устройство генераторов небольшой мощности.

ГЕНЕРАТОР С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЯКОРЕМ

Генератор переменного тока имеет следующие основные части: 1) магнитную систему (индуктор машины), создающую магнитное поле, 2) вращающуюся часть машины — якорь, в обмотке которого возбуждается переменная э. д. с., и 3) контактные кольца, расположенные на валу вращающейся части машины, к которым прижимаются неподвижные щетки, посредством которых ток подается во внешнюю цепь.

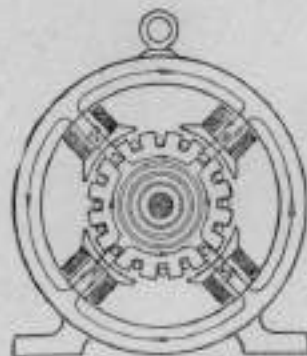


Рис. 18. Схема устройства станины генератора переменного тока с вращающимся якорем.

а) Магнитная система генератора состоит из станины кольцевой формы из мягкой литой стали, внутри которой укреплены сердечники электромагнитов с катушками.¹ Станина заключена внутри чугунного корпуса. Число магнитных полюсов станины может быть различным. Генераторы небольшой мощности изготавливаются двухполюсными, большей мощности — многополюсными. Число полюсов всегда четное, причем северный и южный полюсы чередуются так, как это показано на рис. 18.

Полярность полюса электромагнита зависит от направления постоянного тока, идущего по его обмотке. Провод же, представляющий собой обмотку полюса, можно мотать на полюс в одном направлении, например, по часовой стрелке, и в противоположном направлении — против часовой стрелки. В соответствии с этим можно добиться нужной полярности полюса (рис. 19).

Обмотку электромагнитов называют обмоткой возбуждения. Обмотка возбуждения питается током от неболь-

¹ Деление на станину и сердечники электромагнитов весьма условно, так как сама станина тоже играет роль сердечника.

шого генератора постоянного тока, называемого возбуждателем, якорь которого расположен на валу самого генератора переменного тока. Иногда обмотка возбуждения питается током от батарей аккумуляторов. В генераторах малой мощности для возбуждения пользуются током самого генератора после выпрямления тока с помощью полупроводниковых выпрямителей.

б) Якорь генератора состоит из стального сердечника и обмотки. Для уменьшения потерь на вихревые токи

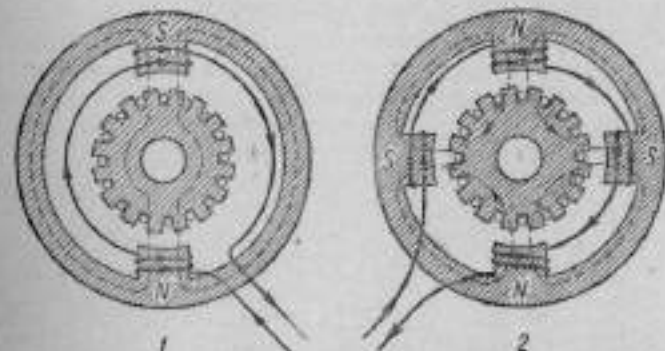


Рис. 19. Схема магнитной системы двухполюсного и четырехполюсного генератора переменного тока.

сердечник якоря делается не сплошным, а собирается из отдельных изолированных друг от друга пластин обычно такой формы, как это видно на рис. 18. Вследствие такой формы листов на внешней цилиндрической поверхности сердечника образуются продольные пазы, в которые укладываются изолированные проводники обмотки якоря. В этой обмотке при вращении якоря в магнитном поле, созданном индуктором, возбуждается переменная э. д. с. Сердечник якоря с обмоткой жестко крепится на валу, концы которого находятся в подшипниках, расположенных в боковых крышках генератора.

в) Контактные кольца насаживаются на вал якоря; делаются они из меди. Кольца изолированы от вала. К кольцам припаиваются концы обмотки якоря. Угловые щетки с помощью особых щеткодержателей с пружинами прижимаются к кольцам. От щеток ток подается во внешнюю цепь.

может быть изображена и так, как это показано на рис. 17.

Рассмотрим сначала устройство генераторов небольшой мощности.

ГЕНЕРАТОР С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЯКОРЕМ

Генератор переменного тока имеет следующие основные части: 1) магнитную систему (индуктор машины), создающую магнитное поле, 2) вращающуюся часть машины — якорь, в обмотке которого возбуждается переменная э. д. с., и 3) контактные кольца, расположенные на валу вращающейся части машины, к которым прижимаются неподвижные щетки, посредством которых ток подается во внешнюю цепь.

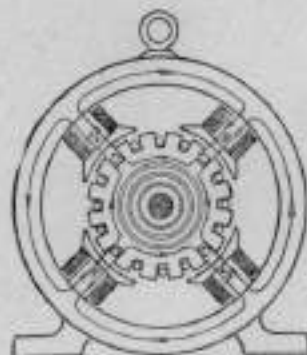


Рис. 18. Схема устройства станины генератора переменного тока с вращающимся якорем.

а) Магнитная система генератора состоит из станины кольцевой формы из мягкой литой стали, внутри которой укреплены сердечники электромагнитов с катушками.¹ Станина заключена внутри чугуниного корпуса. Число магнитных полюсов станины может быть различным. Генераторы небольшой мощности изготавливаются двухполюсными, большей мощности — многополюсными. Число

полюсов всегда четное, причем северный и южный полюсы чередуются так, как это показано на рис. 18.

Полярность полюса электромагнита зависит от направления постоянного тока, идущего по его обмотке. Провод же, представляющий собой обмотку полюса, можно мотать на полюс в одном направлении, например, по часовой стрелке, и в противоположном направлении — против часовой стрелки. В соответствии с этим можно добиться нужной полярности полюса (рис. 19).

Обмотку электромагнитов называют обмоткой возбуждения. Обмотка возбуждения питается током от неболь-

¹ Деление на станину и сердечники электромагнитов весьма условно, так как сама станина тоже играет роль сердечника.

шого генератора постоянного тока, называемого возбуждателем, якорь которого расположен на валу самого генератора переменного тока. Иногда обмотка возбуждения питается током от батарей аккумуляторов. В генераторах малой мощности для возбуждения пользуются током самого генератора после выпрямления тока с помощью полупроводниковых выпрямителей.

б) Якорь генератора состоит из стального сердечника и обмотки. Для уменьшения потерь на вихревые токи

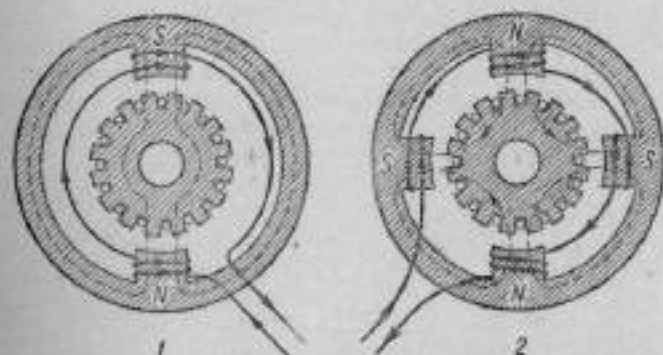


Рис. 19. Схема магнитной системы двухполюсного и четырехполюсного генератора переменного тока.

сердечник якоря делается не сплошным, а собирается из отдельных изолированных друг от друга пластин обычно такой формы, как это видно на рис. 18. Вследствие такой формы листов на внешней цилиндрической поверхности сердечника образуются продольные пазы, в которые укладываются изолированные проводники обмотки якоря. В этой обмотке при вращении якоря в магнитном поле, созданном индуктором, возбуждается переменная э. д. с. Сердечник якоря с обмоткой жестко крепится на валу, концы которого находятся в подшипниках, расположенных в боковых крышках генератора.

в) Контактные кольца насаживаются на вал якоря; делаются они из меди. Кольца изолированы от вала. К кольцам припаиваются концы обмотки якоря. Угольные щетки с помощью особых щеткодержателей с пружинами прижимаются к кольцам. От щеток ток подается во внешнюю цепь.

Генератор конструируется так, что при вращении якоря каким-либо двигателем магнитный поток, охватываемый обмоткой якоря, периодически изменяется, а в обмотке якоря возбуждается синусоидальная э. д. с. Если обмотка якоря замкнута на внешнюю цепь, то по обмотке якоря (являющейся внутренней цепью источника тока) и по внешней цепи пойдет синусоидальный переменный ток. Частота переменного тока, даваемого генератором, зависит от скорости вращения якоря и от числа пар полюсов. При одной паре полюсов за один оборот якоря э. д. с. претерпевает одно полное колебание.

Следовательно, частота переменного тока, даваемого таким генератором, равна числу оборотов якоря за 1 секунду. Если генератор имеет p пар полюсов и делает n оборотов в минуту, то частота переменного тока может быть определена по формуле

$$f = p \frac{n}{60}.$$

Отсюда число оборотов якоря в минуту

$$n = \frac{60f}{p}.$$

Стандартная частота переменного тока в СССР 50 Гц.

ГЕНЕРАТОР С ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНДУКТОРОМ

Мы кратко описали устройство генераторов переменного тока с неподвижной магнитной системой и с вращающимся якорем. Так устраиваются генераторы небольшой мощности. Генераторы значительной мощности строятся несколько иначе, а именно так, что обмотка, в которой индуцируется переменная э. д. с., размещается в неподвижной части машины, называемой *статором*, а электромагнит с обмоткой возбуждения является вращающейся частью машины, называемой *ротором*.

Такая конструкция генераторов обусловлена следующими соображениями.

Современные генераторы строятся на довольно высокие напряжения (1—15 киловольт) и большие мощности (до 50 000—100 000 киловатт-ампер¹) и имеют большую

¹ Так как генераторы работают на нагрузку с cos φ , меньшим единицы, то мощность их выражается не в киловаттах (в которых выражается обычно активная мощность), а в киловольтамперах.

скорость вращения ротора. При наличии вращающегося якоря трудно получить достаточно надежный контакт между контактными кольцами и щетками. Вследствие возникающего искрения быстро изнашиваются кольца и щетки. При неподвижной рабочей обмотке проще (так как нет скользящего контакта) вывести значительные токи во внешнюю цепь.

Устройство скользящего контакта для питания обмотки возбуждения менее трудно, так как мощность тока, нужного для возбуждения, относительно невелика.

Статор генератора (С) (рис. 20) делается цилиндрической формы, собирается из листовой стали в целях борьбы с вихревыми токами. Статор заключен в чугунный корпус. На внутренней цилиндрической поверхности статора имеются пазы, параллельные оси статора. В пазах уложена рабочая обмотка генератора (обмотка якоря).

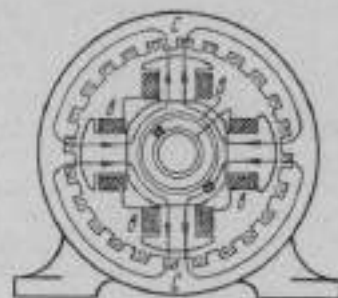


Рис. 20. Схема устройства генератора переменного тока с неподвижным якорем и вращающимся индуктором.

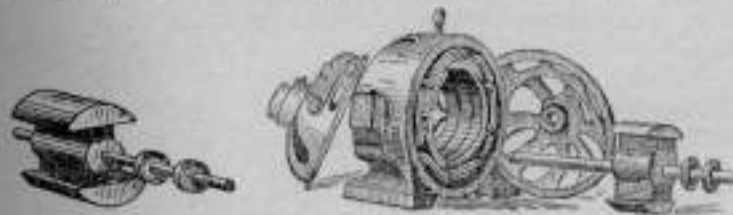


Рис. 21. Внешний вид ротора с одной парой полюсов.

Рис. 22. Детали генератора переменного тока небольшой мощности.

Ротор генератора представляет собою вращающийся электромагнит с обмоткой возбуждения. Число магнитных полюсов может быть различным. Бывают генераторы двухполюсные и многополюсные. На рис. 20 дана схема устройства генератора с двумя парами полюсов на роторе. На рис. 21 показан внешний вид ротора с одной парой полюсов. Обмотка возбуждения укреп-

ляется на полюсах ротора, концы обмотки возбуждения присоединяются к двум изолированным кольцам, насаженным на вал ротора. К кольцам прижимаются щетки, к которым подводится постоянный ток от возбуждателя. На рис. 22 показан в разобранном виде генератор переменного тока небольшой мощности.

При вращении ротора каким-либо двигателем вместе с ротором вращается и создаваемое им магнитное поле. Магнитный поток, охватываемый обмоткой, вложенной в пазы статора, будет изменяться. В обмотке статора возникнет переменная э. д. с. Если обмотка статора замкнута на внешнюю цепь, то по обмотке статора (представляющей собой внутреннюю цепь источника тока) и по внешней цепи пойдет синусоидальный переменный ток.

Э. д. с. генератора зависит от размера и типа обмотки статора, от величины магнитной индукции поля, созданного ротором, и от скорости его вращения. Частота переменной э. д. с. (а значит, и переменного тока) прямо пропорциональна скорости вращения ротора. Поэтому такие генераторы называют *синхронными* (от греческих слов *вместе* и *время*).

Методические указания

Изучение принципа действия генератора переменного тока предусмотрено программой по физике, поэтому § 5 включен в учебный план темы.

В связи с рассмотрением устройства и принципа действия генератора переменного тока учителю полезно иметь в виду следующее.

Проходящий по обмотке возбуждения постоянный ток создает магнитное поле. Генератор конструктивно выполнен так, что магнитная индукция поля B распределяется на поверхности якоря синусоидально. Этим обусловлено появление в обмотке якоря э. д. с., изменяющейся по синусоидальному закону. В соответствии со сказанным в методических указаниях к § 1 эти подробности учащимся не сообщаем.

Более подробное ознакомление учащихся с техническими особенностями генераторов должно быть отнесено к курсу электротехники, здесь же (в § 5) систематизированы самые основные и общие данные, характеризующие устройство и принцип действия генераторов переменного

тока и вскрывающие, главным образом, физическую сущность процесса. Техническая сторона дела затронута лишь в таком размере, в каком это необходимо для установления путей, которыми физические закономерности используются в практических целях современной техникой. Вскрытие связей школьного курса физики с техникой особенно существенно с точки зрения решения задач, преследуемых политехническим обучением.

Для создания у учащихся возможно более полного и верного представления об устройстве и принципе действия генератора переменного тока следует широко использовать разнообразные детали генератора, во-первых, чертежи и фотографии их, во-вторых. В тексте § 5 приведены лишь самые необходимые чертежи и фотографии деталей генераторов. Количество их легко может быть увеличено. Во многих курсах электротехники можно найти пригодные для этой цели иллюстрации. Могут и должны быть использованы имеющиеся в продаже стенные плакаты, посвященные этой теме.

О многополюсных машинах учащимся можно не рассказывать.

Мощность генераторов, упоминаемых на стр. 46, дана в киловольтамперах. Эта единица мощности должна быть известна учащимся в связи с практическими занятиями по электротехнике, программа которых предусматривает ознакомление учащихся с $\cos \varphi$. Если нужных знаний у учащихся нет, то можно не приводить значения мощностей генераторов.

§ 6. Графические способы изображения переменного тока

Зависимость между величинами может быть выражена тремя способами: 1) словесной формулировкой, 2) аналитически (с помощью формулы) и 3) графически (с помощью графика). Всеми тремя способами мы пользовались, изучая вопрос о получении переменной э. д. с. и переменного тока (§ 1—3). Так, зависимость величины переменного тока от угла поворота витка (равномерно вращающегося в однородном магнитном поле), а значит, и от времени может быть выражена словесной формулировкой: величина тока пропорциональна синусу угла поворота витка. Та же зависимость аналитически выражается

формулой: $i = I_m \cdot \sin \alpha$. И, наконец, эта же зависимость графически выражается синусоидой (см. рис. 5).

Графически синусоидой выражаются различные величины, изменяющиеся во времени по закону синуса, в частности, синусоидальный переменный ток, а. д. с.

При этом ординаты синусоиды (в масштабе) выражают мгновенные значения величины (например, тока, а. д. с.), а абсциссы — отрезки времени (тоже в масштабе), считая от условного начала отсчета времени.

Так, на рис. 5 по ординате ab можно судить, что ток положителен и имеет максимальное значение, а по абсциссе Ob видно, что это значение ток имеет к концу первой четверти периода.

Помимо синусоиды, возможен и другой способ графического изображения синусоидальных величин, в частности, переменного тока. Синусоидальные величины в каждый данный момент времени характеризуются не только размерами, но и направлением. Поэтому графически они могут выражаться векторами. Но для того чтобы изобразить на чертеже все фазы изменения синусоидальной величины за один период, нужно прибегнуть к вращающемуся вектору. Поясним эту мысль на примере векторного изображения синусоидального переменного тока.

Длина вектора в произвольном выбранном масштабе должна выражать амплитудное (максимальное) значение тока.

Представим себе, что начало этого вектора находится в точке пересечения оси ординат и оси абсцисс прямоугольной системы координат (см. левую часть рис. 23), причем вектор равномерно вращается против часовой стрелки, так что начало его все время находится в точке O , а конец движется по окружности, радиус которой равен длине вектора. Кроме того, пусть вектор совершает один полный оборот за время, равное периоду переменного тока; следовательно, период и частота вращающегося вектора будут соответственно равны периоду и частоте переменного тока. Если теперь спроектировать вращающийся вектор на ось ординат, то эти проекции вектора дадут в выбранном нами масштабе мгновенные значения величины и направления тока для соответствующих моментов времени.

Начальное положение вращающегося вектора — OA (см. левую часть рис. 23). Проекция его на ось ординат —

точка, совпадающая с началом координат. Значит, ток в это время равен нулю. Через $1/16$ долю периода вектор занимает положение OB . Проекция его Ob на ось ординат дает в выбранном масштабе значение тока в этот момент времени, причем ток положительный (одного какого-то направления). Через $1/4$ периода вектор занимает положение OE . Проекция его равна вектору. Ток максимальный, направление его прежнее. Через $3/16$ периода вектор занимает положение OB_1 , проекция его Ob_1 дает значение тока, равное тому, какое было в конце $1/16$ доли

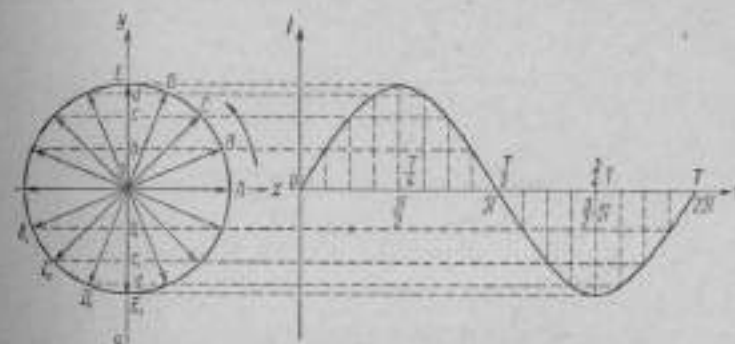


Рис. 23. Графическое изображение синусоидального переменного тока вращающимся вектором и синусоидой.

периода, но направление тока изменилось на противоположное. Через $5/16$, т. е. через $3/4$ периода, вращающийся вектор занимает положение OE_1 . Проекция равна вектору. Ток максимален, как и в конце первой четверти периода, но противоположного направления, и т. д. Таким образом ординаты Ob , Ob_1 и т. д. дают мгновенные значения переменного тока для соответствующих моментов времени.

Как видим, с помощью вращающегося вектора можно графически выразить зависимость величины синусоидального тока от времени.

Это свойство вращающегося вектора может быть использовано для вычерчивания синусоиды переменного тока. С этой целью на оси абсцисс (Ot на правой части рис. 23) откладывается время (в долях периода), а на ось ординат (Oi) проектируется вращающийся вектор. Дальше обычным путем находим точки, после соединения которых

кривой получаем синусоиду. Отсюда вытекает, что проекция вращающегося вектора на ось ординат изменяется во времени по синусоидальному закону.

В итоге — левая и правая части рис. 23 выражают одну и ту же зависимость, а именно: зависимость величины синусоидального переменного тока от времени.

Рассмотренный нами способ выражать изменения синусоидальной величины с помощью вращающегося вектора (круговая диаграмма) применяется довольно часто. Он особенно удобен, когда на одной диаграмме выражается взаимное соотношение нескольких синусоидальных величин, различающихся по фазе. Угол сдвига фаз на круговой диаграмме, как мы это увидим в следующем параграфе, обнаруживается более отчетливо, чем в случае изображения этих величин синусоидами.

§ 7. Сдвиг фаз. Векторные диаграммы.

Мгновенное значение колеблющейся величины характеризуется особой физической величиной — фазой. Как уже говорилось в § 2, в случае переменного тока фаза равна углу поворота витка, отсчитываемому от начального положения его в нейтральной плоскости. Теперь, в связи с введением понятия о вращающемся векторе, мы можем сказать, что фаза переменного тока и других синусоидальных величин численно равна углу поворота вращающегося вектора, отсчитываемому от начального положения вектора вдоль положительного направления оси абсцисс. Этот угол обычно выражают в радианах (иногда — в градусах). Представим себе, что в однородном магнитном поле, созданном магнитными полюсами N и S (см. рис. 1), вращается не один виток, а два витка, расположенных под углом друг к другу. В каждом из них возникнет переменная э. д. с., а если каждый из витков замкнут — возникает синусоидальный переменный ток. Частоты и периоды обоих токов будут одинаковыми. Так как витки будут проходить через нейтральную плоскость не одновременно, то амплитудные и нулевые значения токов не будут совпадать по времени. Иными словами, токи не будут совпадать по фазе.

Разность фаз двух синусоидальных переменных токов с одинаковой частотой называется *углом сдвига фаз* (обычно обозначается буквой φ).

В том случае, если два переменных тока достигают амплитудных (и нулевых) значений одного знака, одновременно, говорят, что токи совпадают по фазе или что угол сдвига фаз равен нулю.

Взаимное соотношение токов удобно выражать графически — с помощью синусоид или вращающихся векторов.

На рис. 24 изображены синусоиды двух переменных токов. На графике видно, что эти токи имеют одинаковый период и совпадают по фазе, но амплитудные значения их разные.

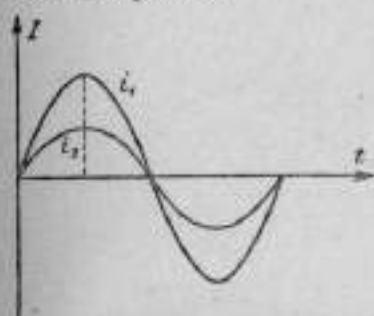


Рис. 24. Синусоиды переменных токов, совпадающих по фазе.

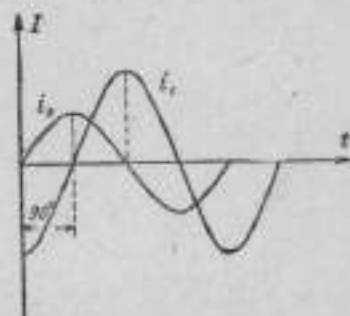


Рис. 25. Синусоиды переменных токов. Угол сдвига фаз равен 90° .

На рис. 25 изображены синусоиды двух переменных токов различной амплитуды, сдвинутых по фазе. Угол сдвига фаз между ними равен 90° или $\frac{\pi}{2}$ радианов (разность фаз по времени равна четверти периода).

Ток, который достигает нулевого значения или положительного амплитудного значения раньше, чем другой, считается *опережающим*, а тот, у которого те же значения достигаются позже, — *отстающим по фазе*. На рис. 25 видно, что ток i_2 опережает по фазе ток i_1 на угол 90° или, что то же, ток i_1 отстает по фазе от тока i_2 на угол 90° .

Взаимное соотношение синусоидальных величин (токов, э. д. с., напряжений) может быть выражено и с помощью вращающихся векторов.

На рис. 26 изображены векторы двух токов одинакового периода, совпадающих по фазе, но различающихся по амплитуде.

На рис. 27 изображены векторы двух э. д. с., сдвинутых по фазе на угол $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$. На рис. 28 изображены векторы двух токов, сдвинутых по фазе на 90° . На рис. 27 видно, что э. д. с. E_1 по фазе опережает

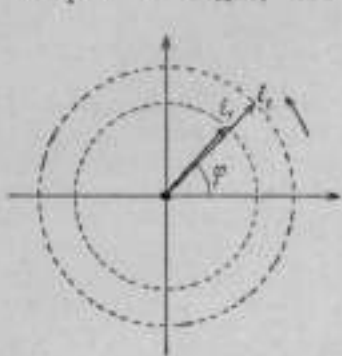


Рис. 26. Векторная диаграмма двух переменных токов, совпадающих по фазе, но различающихся по амплитуде.

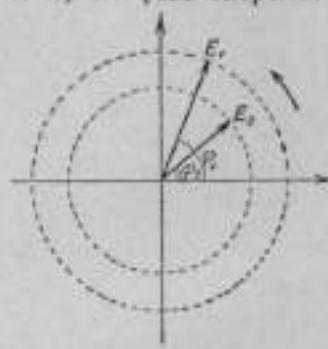


Рис. 27. Векторная диаграмма э. д. с., различающихся по амплитуде, сдвинутых по фазе на угол $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

э. д. с. E_2 на угол $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, а на рис. 28 — ток i_2 по фазе опережает ток i_1 на угол 90° .

Совокупность нескольких вращающихся векторов, изображающих синусоидальные величины (токи, э. д. с., напряжения) одинаковой частоты, называется векторной диаграммой.

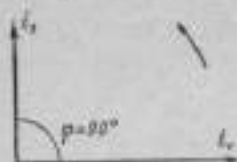


Рис. 28. Векторная диаграмма токов различной амплитуды и сдвинутых по фазе на угол 90° .

Вычерчивая векторные диаграммы, можно не изображать окружностей, по которым движутся концы вращающихся векторов. Так выполнена векторная диаграмма на рис. 28. Если частота токов или других синусоидальных величин различна, то угол сдвига фаз не является постоянным, а непрерывно меняется. При

одинаковой частоте взаимное расположение векторов остается неизменным, угол сдвига фаз постояен. Поэтому на векторных диаграммах можно изображать только синусоидальные величины, имеющие одинаковую частоту, так как только в этом случае угловая скорость вращения векторов будет тоже одинаковой.

Методические указания

Понятие о вращающемся векторе, векторные диаграммы, угол сдвига фаз не входят в программу курса физики средней школы. Поэтому в учебный план темы § 6 и 7 не включены. Однако в связи с тем, что понятие о сдвиге фаз и о векторных диаграммах имеет очень большое значение в учении о переменном токе, целесообразно при малейшей к тому возможности познакомить учащихся с этими вопросами. В этих целях могут быть использованы и внеклассные занятия. Идея, лежащая в основе изображения синусоидальных величин с помощью вращающегося вектора, вполне доступна учащимся X класса. Учащиеся, изучая механические колебания, связь колебательного движения с вращательным, узнали, что проекция на диаметр точки, равномерно движущейся по окружности, совершает по диаметру простое гармоническое колебательное движение. Известно также, что смещение колеблющейся по диаметру проекции точки изменяется с течением времени по синусоидальному закону. Отсюда естественный переход к колебаниям проекции вращающегося вектора на диаметр, лежащий на оси ординат. При этом очевидно, что проекция вращающегося вектора изменяется тоже синусоидально.

Знания учащихся в области таких вопросов, как угол сдвига фаз, векторные диаграммы, могли быть с успехом использованы не только во время изучения однофазного и трехфазного тока, но и в теме «Электромагнитные колебания и волны».

§ 8. Действующее значение переменного тока и напряжения

Для переменного тока характерно то, что величина его непрерывно изменяется, колеблется между нулем и некоторым наибольшим (амплитудным) значением. Поэтому об абсолютном значении величины переменного тока можно говорить, имея в виду только какой-то определенный момент времени, т. е. можно говорить о мгновенном значении величины тока. Как же можно оценить величину переменного тока, действующего в течение того или иного промежутка времени? Казалось бы, что можно взять среднее значение величины тока. Но нетрудно

видеть, что в связи с тем, что направление переменного тока через каждую половину периода меняется на противоположное, средняя величина тока за период его изменения равна нулю. Поэтому для оценки величины переменного тока избрали другой путь — сравнение переменного тока с таким постоянным, который производит за то же время такое же действие. Разумеется, что при этом надо иметь дело с такими действиями тока, какие не зависят от его направления. К таким действиям относятся тепловые действия тока. Известно, что при прохождении по проводнику как постоянного, так и переменного тока проводник нагревается. При этом количество выделившейся в проводнике теплоты пропорционально квадрату величины тока и не зависит от направления его. Допустим, что через проводник некоторого сопротивления R , например, через спиральку электроплитки, пропускается в течение некоторого промежутка времени t переменный ток, величина которого I_1 . В спиральке выделится некоторое количество теплоты Q . Можно подобрать постоянный ток такой величины I_2 , при прохождении которого через то же сопротивление R в течение того же промежутка времени t в проводнике выделится такое же количество теплоты Q . Очевидно, что в этом случае (при равенстве выделенных количеств теплоты) работа и мощность переменного тока будут соответственно эквивалентны работе и мощности постоянного тока.

Значение такого эквивалентного постоянного тока, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет в нем за то же время такое же количество теплоты, называется действующим (эффективным) значением переменного тока.

Нетрудно догадаться, что действующее значение переменного тока меньше его амплитудного (максимального) значения. В самом деле, действующее значение переменного тока равно величине постоянного тока, выделяющего такое же количество теплоты при прочих равных условиях. Но постоянный ток проходит по проводнику непрерывно и не изменяется по величине, а переменный ток достигает максимального значения только дважды за время, равное периоду, а в остальную часть этого промежутка времени (периода) он имеет меньшую величину, при этом дважды за период падает до нуля.

Итак, действующее значение переменного тока меньше его максимального (амплитудного) значения.

На сколько же или во сколько раз меньше?

Теория и опыт показывают, что для синусоидального переменного тока квадрат действующего значения переменного тока (I) меньше квадрата максимального значения этого тока (I_m) в 2 раза, т. е.

$$I^2 = \frac{I_m^2}{2}.$$

Отсюда

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Таким образом, действующее значение переменного тока меньше максимального в $\sqrt{2}$ раз, т. е. в 1,41 раза, и, таким образом, составляет 0,707 максимального значения тока:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{1,41} = 0,707 I_m.$$

Выше было указано, что при равенстве теплоты, выделенной переменным и постоянным током (при прочих равных условиях), мощности этих токов одинаковы. Мощность постоянного тока измеряется произведением величины тока на напряжение. Если действующее значение величины переменного тока (и оно равно величине эквивалентного постоянного тока) меньше максимального значения того же переменного тока в $\sqrt{2}$ раз, то при равенстве мощностей эквивалентных токов действующее значение напряжения переменного тока (оно равно напряжению эквивалентного постоянного тока) тоже меньше максимального значения напряжения переменного тока в $\sqrt{2}$ раз. Следовательно,

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{1,41} = 0,707 U_m.$$

Такое же соотношение существует между действующим и максимальным значениями э. д. с.

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{E_m}{1,41} = 0,707 E_m.$$

Зная максимальное значение тока (э. д. с., напряжения), можно вычислить его действующее значение, и наоборот,

зная действующее значение тока (э. д. с., напряжения), можно найти его максимальное значение, имея в виду, что:

$$I_m = I \sqrt{2}, \\ U_m = U \sqrt{2}, \\ E_m = E \sqrt{2}.$$

Все электроизмерительные приборы для переменного тока — вольтметры, амперметры, ваттметры, счетчики — измеряют действующие значения напряжения, величины тока, мощности и работы тока.

Для измерения переменного тока пригодны электроизмерительные приборы, поворот подвижной системы в которых не зависит от частых изменений направления тока.

Так, тепловые приборы пригодны для постоянного и переменного тока. (Поворот подвижной системы, с которой соединена стрелка прибора, обусловлен удлинением тонкого проводника, по которому пропускается измеряемый ток.)

Электромагнитные приборы пригодны для постоянного и переменного тока частотой 50 гц. Подвижная система — небольшой из мягкой стали диск на оси, расположенный над катушкой, по которой проходит измеряемый переменный ток. Диск, намагничиваясь, втягивается внутрь катушки, поворачиваясь при этом вокруг оси.

Магнито-электрические приборы (с постоянным магнитом) пригодны только для постоянного тока. Подвижная система — легкая катушка на оси, расположенная в поле постоянного магнита. При прохождении по катушке переменного тока с частотой 50 гц и выше катушка вследствие инерции не успевает менять направление своего поворота, практически оставаясь на месте.

Электродинамические приборы пригодны для постоянного и переменного тока. Подвижная система состоит из двух катушек. При прохождении по ним тока, происходит взаимодействие магнитных полей, взаимоположение катушек изменяется.

Методические указания

В основе понятия о действующем значении переменного тока (э. д. с., напряжения) лежит идея эквивалентных токов — постоянного и переменного. Говоря, например,

о том, что действующее значение переменного тока равно 5 а, мы имеем в виду, что данный переменный ток производит такое же тепловое действие, как и постоянный ток величиной в 5 а. Для того чтобы знания учащихся были осознанными, а значит, и твердыми, эта мысль должна быть ими достаточно хорошо усвоена. В этих целях можно использовать следующую аналогию.

В неравномерном движении скорость непрерывно изменяется. Применительно к этому движению мы можем говорить или о мгновенной скорости (о скорости в данный момент времени), или о средней скорости. Как известно, под средней скоростью неравномерного движения понимают скорость равномерного движения, у которого путь и время такие же, как и в движении неравномерном. И тут „замена“ одного движения другим. Разумеется, данная аналогия, как и всякая другая, не может быть произвольно углубляема.

Соотношение между действующим и максимальным значением переменного тока должно быть дано учащимся средней школы догматично. К этому вынуждают нас следующие обстоятельства. Достаточно строгий вывод

соотношения $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ требует знаний в области интегрирования. Этих знаний учащиеся средней школы не имеют. Правда, этот вывод может быть сделан и приемами средней математики, но такой путь сложен, громоздок и очень трудоемок. Поэтому и от него приходится отказаться.

В тексте § 8 сделана попытка несколько „смягчить“ догматизм в этом вопросе. Исходной взята формула

$$P = \frac{I_m^2}{2}, \text{ а не } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Дело в том, что, как свидетельствует опыт работы с X классами, учащиеся чрезвычайно смущает появление неизвестно откуда квадратного корня.

Кроме того, формула $P = \frac{I_m^2}{2}$ кажется учащимся более

„привычной“ по следующим соображениям. Подбирая переменному току эквивалентный постоянный ток, мы опираемся на тепловые действия тока. Учащимся известен закон Джоуля и Ленца, известна квадратичная зависимость между током и количеством теплоты. Уже поэтому появление квадратов токов окажется для учащихся в известной мере оправданным. Больше того, имея в виду

необходимость удовлетворить запросы наиболее вдумчивых учащихся, можно сказать, что в процессе выведения этой формулы приравниваются количества теплоты, выделенные переменным током и эквивалентным ему постоянным током, а после соответствующих математических преобразований и сокращений и получается указанное соотношение. Мы глубоко убеждены, что в целях борьбы с бессмысленным заучиванием, борьбы за осознанные и действенные знания учащихся нельзя пренебрегать никакими возможностями для того, чтобы сделать в глазах учащихся сколько-нибудь оправданными те формулы, которые мы им по необходимости даем без вывода.

По этим же причинам в § 8 осуществлена попытка „оправдать“ и утверждение, что соотношение между действующим и максимальным значением напряжения переменного тока такое же, как и между действующим и максимальным значением величины тока (ссылкой на равенство мощностей эквивалентных токов).

В заключение урока, посвященного данной теме, полезно решить пару примеров на вычисление действующего или максимального значения тока, напряжения. Например: действующее напряжение в осветительной сети 127 в. На какое максимальное напряжение должна быть рассчитана изоляция проводов?

$$U_{\text{м}} = U \cdot \sqrt{2} = 127 \cdot 1,41 \approx 180 \text{ в.}$$

Или: через спиральку плитки идет переменный ток в 5 а. Каких максимальных значений достигает ток?

$$I_{\text{м}} = I \cdot \sqrt{2} = 5 \cdot 1,41 \approx 7 \text{ а.}$$

§ 9. Активное сопротивление

Из учения о постоянном токе известно, что сопротивление, оказываемое каким-либо проводником постоянному току, зависит от длины проводника, площади поперечного сечения его, от вещества проводника и температуры, но не зависит от величины тока, идущего по проводнику, и от напряжения, приложенного к проводнику.

Переменный ток качественно отличается от тока постоянного и обладает свойствами, которых нет у постоянного тока. В частности, сопротивление проводников, оказываемое переменному току, зависит от частоты идущего

по ним переменного тока. А именно — с увеличением частоты тока сильно возрастает сопротивление данного проводника. Другой пример: при наличии в электрической цепи катушек индуктивности переменному току оказывается некоторое дополнительное сопротивление по сравнению с сопротивлением этой же цепи постоянному току.

Рассмотрим вопрос о сопротивлении электрических цепей постоянному и переменному току, начиная со следующего случая.

Допустим, что к полюсам источника постоянного тока подключена цепь, не обладающая ни емкостью, ни индуктивностью (практически это может быть лампа накаливания, реостат, провод, подводящие ток). Известно, что сопротивление проводника току обусловлено взаимодействием движущихся под действием сил электрического поля свободных электронов с ионами кристаллической решетки металла, по которому идет ток. При этом энергия тока преобразуется во внутреннюю энергию проводника — проводник в той или иной степени нагревается. Это сопротивление проводников постоянному току часто называют *омическим сопротивлением*. Его обозначают буквой R , а на схемах — так, как показано на рис. 30.

Теперь представим себе, что та же электрическая цепь, не обладающая ни емкостью, ни индуктивностью, подключена к генератору переменного тока. И опыт, и теории показывают, что сопротивление этой цепи переменному току будет несколько большим, чем постоянному току, причем сопротивление заметно возрастает с увеличением частоты тока. Оказывается, что помимо сопротивления, обусловленного взаимодействием электронов с ионами металла проводника, проводник оказывает переменному току некоторое, условно скажем, дополнительное сопротивление. Это вызвано тем, что распределение плотности переменного тока по сечению проводника происходит неравномерно: плотность максимальна у поверхности проводника и уменьшается к центру его (рис. 29). (Это явление носит название *поверхностного эффекта*.) Поэтому рабочая площадь сечения проводника уменьшается, а сопротивление проводника увеличивается.

С увеличением частоты тока поверхностный эффект возрастает. Так же как и при постоянном токе, энергия переменного тока в цепи с активным сопротивлением преобразуется во внутреннюю энергию проводника.

Такое сопротивление переменному току, при котором происходит безвозвратная потеря энергии (безвозвратная в смысле превращения энергии тока в энергию другого вида, например, во внутреннюю энергию проводника), называется активным сопротивлением.

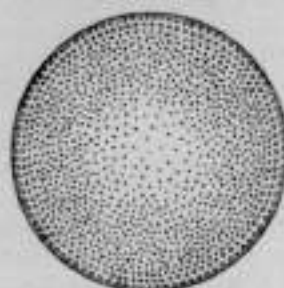


Рис. 29. Схематическое изображение распределения плотности переменного тока по сечению проводника.

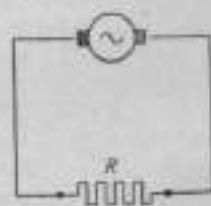


Рис. 30. Цепь переменного тока с активным сопротивлением.

Активное сопротивление, так же как и сопротивление постоянному току, измеряется в омах.

Активное сопротивление обозначается буквой R , а условное обозначение на схемах — как показано на рис. 30.

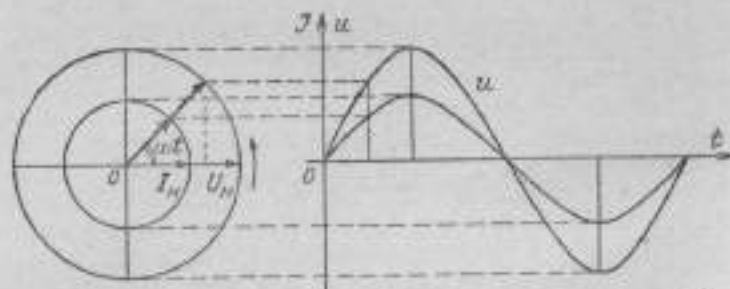


Рис. 31. Векторная диаграмма и синусоиды напряжения и тока в цепи, имеющей только активное сопротивление.

Закон Ома справедлив и для цепи переменного тока с активным сопротивлением. В этом случае нужно брать величины действующих значений тока и напряжения и активное сопротивление цепи для данной частоты тока.

Если цепь, подключенная к источнику переменного тока, имеет только активное сопротивление (а в цепи могут быть и другие сопротивления, о которых речь идет в § 10 и 11), то напряжение на ней и ток в цепи одновременно достигают положительного и отрицательного максимальных значений и одновременно проходят через нулевое значение как в одном, так и в противоположном направлении. Можно на одном и том же графике начертить синусоиду тока и синусоиду напряжения для такой цепи, или на одной векторной диаграмме начертить вращающиеся векторы тока и напряжения. Оба эти приема использованы в чертеже на рис. 31. Из рисунка видно, что ток и напряжение в цепи, имеющей только активное сопротивление, совпадают по фазе (или иначе — угол сдвига фаз между ними равен нулю).

Методические указания

Материал § 9 входит в учебный план темы и вполне доступен учащимся. Основное в этом параграфе — понятие об активном сопротивлении. В связи с этим существенно, чтобы учащиеся представляли себе «механизм» сопротивления проводника постоянному току. Подумно заметим, что термин «омическое» сопротивление неудачен, ведь омами измеряются и реактивные сопротивления. Нам представляется более удачным деление сопротивлений на активные и реактивные. Сопротивление проводников постоянному току типично активное. Поскольку для него все же до сих пор употребляется название «омическое» сопротивление, этот термин сохранен и в тексте § 9. Если строго придерживаться программы, то можно не знакомить учащихся с поверхностным эффектом (даже в самых общих чертах, как это сделано в § 9). В этом случае не придется говорить о том, что каждый длинный проводник оказывает переменному току несколько большее сопротивление, чем току постоянному. Кроме того, могут быть опущены векторная диаграмма и график, данные на рис. 31.

Программа предусматривает минимум материала, подлежащего изучению на уроке. При малейшей возможности следует дать учащимся график напряжения и тока в цепи с активным сопротивлением. Данные, необходимые для построения графика, могут быть получены с помощью

уже упоминавшегося нами прибора, рекомендуемого М. А. Ушаковым. (М. А. Ушаков. Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955.)

Изучая сопротивление электрических цепей переменному току, мы встречаемся с такими величинами, как емкость, индуктивность. С ними учащиеся уже знакомы и должны их достаточно хорошо знать.

В процессе изучения § 9—11 полезно сказать учащимся, что термин „емкость“ принято употреблять не только по отношению к величине, характеризующей известное свойство проводника, но и по отношению к прибору — конденсатору. Аналогично этому, термин „индуктивность“ употребляется, имея в виду или величину, характеризующую свойства проводника, или прибор — катушку самоиндукции. Термин „индуктивность“ (в смысле физической величины) чаще применяется, чем термин „коэффициент самоиндукции“. Эта терминология принята и в данной книге.

§ 10. Емкостное сопротивление

Как указывалось в предыдущем параграфе, в цепях переменного тока, помимо активного сопротивления, мы часто имеем дело с сопротивлениями и другого вида. Познакомимся с так называемым емкостным сопротивлением.

Представим себе, что к источнику постоянного тока подключены конденсатор и рубильник. Пусть собранная нами цепь индуктивностью не обладает.

Когда цепь будет замкнута, между полюсами источника тока и обкладками конденсатора произойдет выравнивание потенциалов: возникнет ток, который через очень малый промежуток времени прекратится. Конденсатор окажется заряженным.

В момент замыкания ключа в цепи возникает ток, величина которого определится величиной э. д. с. источника тока и сопротивлением цепи. Но, по мере заряжения пластин конденсатора и уменьшения разности потенциалов между ними и полюсами генератора, величина тока в цепи станет уменьшаться и, наконец, к моменту времени, когда конденсатор зарядится, окажется равной нулю. Этот ток называют током заряда конденсатора. Изменение тока заряда во времени графически может быть выражено так, как это показано на рис. 32.

Таким образом, ток в цепи с емкостью за очень короткий промежуток времени падает до нуля, после чего тока в цепи нет. Конденсатор в цепи постоянного тока своим диэлектриком создает разрыв в цепи; поэтому постоянный ток по такой цепи не идет. В последнем можно убедиться на опыте, включив в цепь источника постоянного тока (динамомашины) лампу накаливания, рассчитанную на 127 в. Лампа не горит.

Можно обнаружить и пронаблюдать указанный ток заряда конденсатора на следующем опыте.

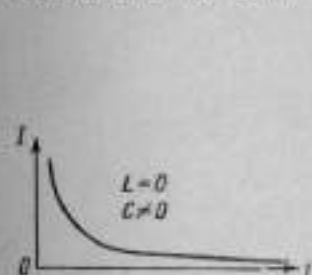


Рис. 32. График тока заряда конденсатора, подключенного к источнику постоянного тока.

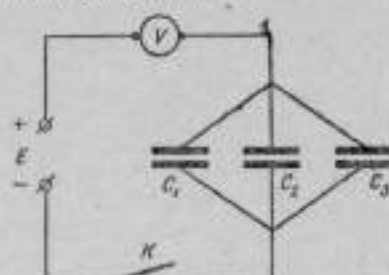


Рис. 33. Схема установки для обнаружения тока заряда батарей конденсаторов.

Воспользуемся установкой, изображенной на рис. 33. E — источник постоянного тока на 50 в, C_1 , C_2 и C_3 — батареи конденсаторов на 6 μF — 12 μF , K — рубильник и V — вольтметр постоянного тока сопротивлением порядка 10 000 Ω — 15 000 Ω , со шкалой, соответствующей э. д. с. источника тока. Вольтметр в этой установке используем в двух целях — как нагрузочное сопротивление и как измеритель тока (миллиамперметр). Замкнем рубильник. Стрелка вольтметра сначала сильно и резко отклонится (см. график рис. 32), а затем, по мере того как батареи конденсаторов будут заряжаться, относительно медленно вернется к нулю шкалы.

Иное получится в случае включения емкости в цепь переменного тока. Произведем следующий опыт.

В цепь городского переменного тока, частота которого, как известно, 50 гц, включим конденсатор в 4—6 микрофарад (2—3 конденсатора по 2 микрофарады, соединенных параллельно) и лампу накаливания на 127 в

(мощностью в 40 Вт). Батарею конденсаторов и лампу соединим последовательно. Лампа горит, значит, ток в цепи есть. Закоротив конденсаторы, обратим внимание на то обстоятельство, что при наличии конденсатора в цепи с лампой она горит менее ярко; значит, ток в цепи, когда в нее включен конденсатор, уменьшается.

Уменьшим емкость батареи конденсаторов. Лампа горит, но менее ярко. Таким образом, чем больше емкость, включенная в цепь, тем ярче горит лампа, следовательно, тем больше величина тока в цепи.

Разберемся в явлениях, которые протекают в цепи переменного тока с конденсатором. Очевидно, нужно ответить на следующие вопросы, возникающие в связи с поставленным нами опытом.

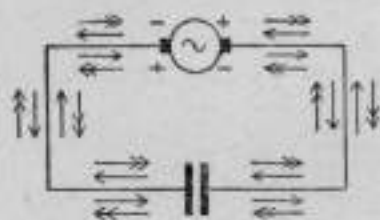


Рис. 34а. Конденсатор не создает разрыва в цепи переменного тока.

1. Почему в цепи с конденсатором, имеющим между обкладками прослойку из диэлектрика, переменный ток все же имеет место?

2. Почему лампа в этом случае горит менее ярко?

Или, что то же самое, почему при наличии, кроме лампы, конденсатора в цепи переменного тока величина тока уменьшается?

3. Почему с увеличением емкости конденсатора ток в цепи увеличивается?

Начнем с решения первого вопроса.

Конденсатор подключен к генератору переменного тока (рис. 34а). Учтем, что напряжение на полюсах генератора изменяется, причем в первую четверть периода напряжение на полюсах растет от нуля до максимума, во вторую четверть, имея то же направление, уменьшается до нуля, в третью, изменив направление на противоположное, увеличивается до максимума и в четвертую, — имея прежнее (как и в третью четверть) направление, падает до нуля. Пусть начальный момент наших рассуждений совпадает с началом периода переменного тока, причем в этот момент времени левая щетка генератора отрицательна, а правая — положительна. Так как начальный потенциал обкладок конденсатора, соединенных с по-

люсами генератора, равен нулю, то в цепи возникает ток. Обкладки конденсатора (см. рис. 34а) будут заряжаться: левая — отрицательно, правая — положительно.

Процесс заряда конденсатора происходит в течение первой четверти периода. К концу первой четверти периода напряжение на полюсах генератора и на соединенных с ним обкладках конденсатора становится максимальным. Заряд конденсатора закончен. Во вторую четверть периода напряжение на полюсах генератора уменьшается до нуля, конденсатор в течение этой второй четверти периода разряжается на генератор, и напряжение на обкладках конденсатора становится равным нулю. В течение третьей четверти периода напряжение на полюсах генератора изменяет свое направление на противоположное и возрастает от нуля до максимума. В течение этой третьей четверти периода конденсатор вновь заряжается и напряжение на его обкладках возрастает до максимума. Теперь ток заряда имеет направление, противоположное току заряда в первой четверти периода, и левая обкладка конденсатора (см. рис. 34а) заряжается положительно, а правая — отрицательно. В течение четвертой четверти периода напряжение на полюсах генератора падает до нуля. Конденсатор разряжается на генератор, и напряжение на обкладках конденсатора становится равным нулю. На рис. 34 направление тока в цепи за первую и вторую четверти периода показано стрелками вне контура цепи, а за третью и четвертую четверти периода — стрелками внутри контура, причем ток заряда конденсатора показан стрелками с одним острием, а ток разряда — стрелками с двумя остриями.

Рассмотренный нами процесс заряда и разряда конденсатора дальше вновь повторяется и длится до тех пор, пока замкнута цепь.

Мы рассмотрели процесс заряда и разряда конденсатора в цепи переменного тока на рис. 34а. Этот процесс может быть пояснен серией рисунков (см. рис. 34б).¹

Говоря о токе заряда и разряда конденсатора, мы обращали основное внимание на направление тока, установив, что оно периодически изменяется. Нетрудно видеть, что ток заряда и разряда конденсатора периодически изменяется и по абсолютному значению. В самом деле,

¹ Этот прием предложен проф. М. Ю. Плотновским.

напряжение на полюсах генератора, а значит, и на соединенных с ними обкладках конденсатора изменяется синусоидально. Значит, и величина тока заряда и разряда изменяется тоже синусоидально. Отсюда ясно, что ток, который до сих пор мы называли током заряда и разряда конденсатора, есть синусоидальный переменный ток.

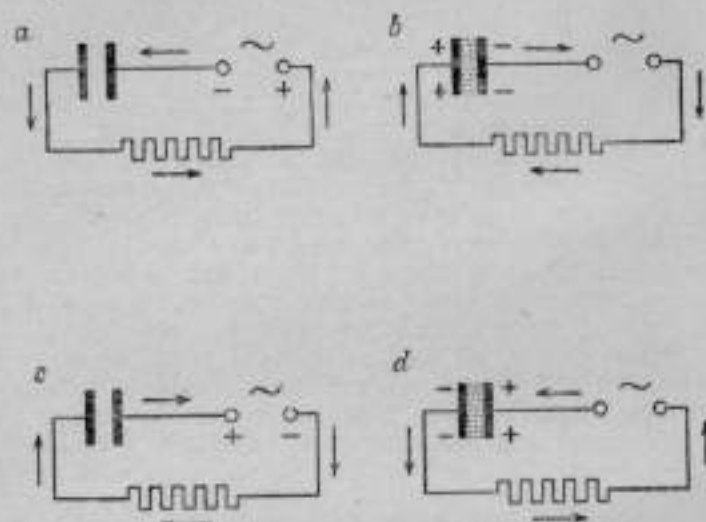


Рис. 34б. Конденсатор в цепи переменного тока:

а — 1-я четверть периода. Конденсатор заряжается, накапливая энергию, получаемую от генератора; б — 2-я четверть периода. Конденсатор разряжается, возвращая накопленную энергию; в — 3-я четверть периода. Конденсатор перезаряжается, накапливая энергию, получаемую от генератора; д — 4-я четверть периода. Конденсатор вновь разряжается, возвращая накопленную энергию.

Следовательно, конденсатор в цепи переменного тока разрыва не создает. Поэтому в описанном выше опыте лампы, включенная в цепь переменного тока с конденсатором, горела. Можно условно сказать, что конденсатор в цепи переменного тока ведет себя как проводник. Мы говорим „можно условно сказать“ потому, что нельзя представить себе, что поток ориентированно движущихся свободных электронов „проходит“ сквозь конденсатор. На самом деле явление протекает иначе. При заряде конденсатора диэлектрик, находящийся между обкладками его, оказавшись в электрическом поле, поляризуется (в нем происходит ориентированное смещение молеку-

лярных диполей). При разряде конденсатора поляризация диэлектрика исчезает (порядок во взаимном расположении диполей нарушается). Ориентированное смещение диполей может быть уподоблено току. Его называют током смещения. Ясно, что ток смещения имеет место только в пределах диэлектрика между обкладками конденсатора.

Включение конденсатора в разомкнутую цепь переменного тока увеличивает ее проводимость, обращает цепь в замкнутую для переменного тока. В самом деле: пусть цепь генератора переменного тока разомкнута; сопротивление бесконечно велико. В место разрыва цепи включили конденсатор — сопротивление стало конечным, цепь оказалась замкнутой, ток по цепи идет. Увеличили емкость включенного конденсатора — проводимость увеличилась, что мы и наблюдали на опыте.

В итоге, принимая во внимание все сказанное до сих пор о конденсаторе в цепи переменного тока, мы приходим к заключению, что *влияние емкости в цепи переменного тока аналогично влиянию проводимости*.

Описанный опыт показал, что изменение емкости, включенной в цепь переменного тока, влияет на величину тока в цепи. Об изменении тока мы судили по степени накала нити лампы. Очевидно, что с увеличением емкости конденсатора увеличивается его проводимость, с уменьшением емкости — проводимость уменьшается. Влияние проводника на величину тока в нем обычно оценивается величиной, обратной проводимости — сопротивлением проводника. В связи с этим принято говорить, что конденсатор оказывает переменному току некоторое сопротивление.

Из сказанного выше вытекает, что „механизм“ проводимости конденсатора отличен от „механизма“ проводимости проводников. Следовательно, и происхождение сопротивления конденсатора отлично от происхождения сопротивления проводников.

Причиной возникновения сопротивления со стороны конденсатора является напряжение, образующееся на обкладках конденсатора, включенного в цепь переменного тока. Напряжение на обкладках конденсатора противоположно напряжению на полюсах генератора, так как каждая из обкладок заряжается одноименно с полюсом генератора, с которым она соединена. Так, на рис. 34а левая обкладка конденсатора соединена с левым полюсом

генератора, правая обкладка — с правым полюсом. В течение одной половины периода левый полюс отрицателен, правый — положителен; в это время левая обкладка заряжена отрицательно, правая — положительно. В течение другой половины периода знаки полюсов генератора меняются, соответственно этому меняются и знаки заряда обкладок конденсатора, оставаясь одноименными со знаками полюсов.

В отличие от активного сопротивления, сопротивление, оказываемое конденсатором, называют емкостным сопротивлением.

Итак, сопротивление, оказываемое конденсатором переменному току, называется емкостным сопротивлением.

В отличие от активного сопротивления, емкостное сопротивление потерь энергии в цепи не вызывает. Объясняется это следующим образом.

Как указывалось выше, в течение первой четверти периода конденсатор заряжается, напряжение на его обкладках увеличивается. Между обкладками конденсатора возникает электрическое поле, энергия которого за счет работы генератора возрастает. В течение второй четверти периода конденсатор разряжается, напряжение на его обкладках падает до нуля. Электрическое поле исчезает, и энергия его уменьшается до нуля, возвращаясь в цепь (генератора). То же самое происходит в течение третьей и четвертой четверти периода. При разряде конденсатор возвращает генератору столько же энергии, сколько он получил от него при заряде. По этой причине наличие конденсатора в цепи переменного тока потерь энергии не вызывает. Емкостное сопротивление относится к виду так называемых реактивных сопротивлений (от слова «реакция» — противодействие).

Сопротивление переменному току, не вызывающее потерь энергии, называется реактивным сопротивлением.

(В следующем параграфе мы встретимся еще с одним из сопротивлений, тоже относящимся к виду реактивных.)

Сопоставим изменения тока в цепи с конденсатором с изменениями напряжения на обкладках конденсатора. Ток в цепи и напряжение на обкладках конденсатора (так же как и напряжение на полюсах генератора) изменяются синусоидально. Если начертить график тока и график

напряжения, то каждый из них будет представлять собой синусоиду. Если же мы хотим сопоставить во времени изменения тока с изменениями напряжения на обкладках конденсатора, то тогда следует график напряжения нанести на те же координатные оси, на которых построен график тока. Такой график тока и напряжения дан на рис. 35. На графике, кроме синусоиды тока (i) и синусоиды напряжения на обкладках конденсатора (u_k), показана пунктиром синусоида напряжения на полюсах генератора (u_g), которое все время по абсолютному зна-

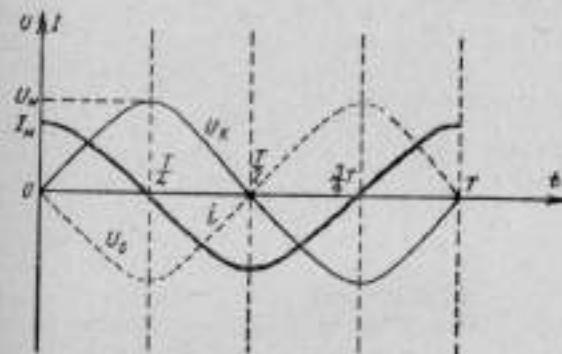


Рис. 35. График тока и напряжения для цепи с емкостью.

чению равно напряжению на обкладках конденсатора, но противоположно ему по направлению.

На графике видно, что в цепи с конденсатором между током и напряжением имеется сдвиг фаз. Угол сдвига фаз равен 90° ($\frac{\pi}{2}$ радиан). На том же графике видно, что максимальное значение тока наступает раньше максимального значения напряжения. Значит, в цепи с емкостью ток опережает напряжение на 90° (или, что то же самое, в цепи с емкостью напряжение отстает от тока на 90°).

На рис. 36 приведена векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с емкостью. Она свидетельствует о том же, о чем и график на рис. 35.

На диаграмме, кроме вектора тока (I) и вектора напряжения на обкладках конденсатора (U_k), показан пунктиром вектор напряжения на полюсах генератора (U_g), равный

по величине, но противоположный по направлению вектору (u_c).

Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с емкостью обусловлен следующими причинами.

Как мы уже знаем, конденсатор в цепи переменного тока периодически заряжается (от генератора) и разряжается (на генератор). Оказывается, что величина тока заряда, а также и разряда конденсатора пропорциональна скорости заряда или разряда конденсатора, т. е. пропорциональна скорости изменения напряжения на его обкладках. А скорость изменения синусоидального напряжения максимальна, когда напряжение проходит через нулевое значение, и равна нулю, когда напряжение проходит через максимальное значение. В течение первой четверти периода происходит заряд конденсатора. Напряжение на полюсах генератора, пройдя через нуль, растет от нуля до максимума. Скорость изменения напряжения в начальный момент самая большая, потому в этот момент времени ток максимален. Дальше, в течение первой четверти периода, по мере заряжения конденсатора, напряжение на его обкладках растет все медленнее (скорость изменения напряжения становится меньше), а поэтому ток уменьшается.

К концу первой четверти заряд конденсатора закончен, напряжение на обкладках конденсатора, так же как и на полюсах генератора, становится максимальным, скорость изменения напряжения оказывается равной нулю и ток падает до нуля (см. график, рис. 35).

С начала второй четверти напряжение на полюсах генератора уменьшается сначала медленно, а потом быстрее. Конденсатор начинает разряжаться на генератор. По мере того, как все быстрее падает напряжение на полюсах генератора, увеличивается ток разряда конденсатора, а напряжение на его пластинках уменьшается. К концу второй четверти ток становится максимальным, а напряжение на конденсаторе, так же как и на полюсах генератора, доходит до нуля (см. график, рис. 35).

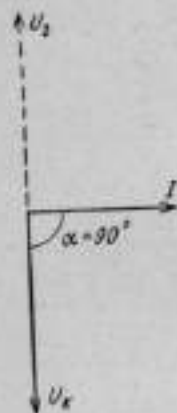


Рис. 36. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с емкостью.

С начала третьей четверти полярность полюсов генератора меняется на обратную и напряжение на полюсах генератора начинает возрастать, но скорость изменения напряжения становится все меньше. Вновь начинается заряд конденсатора, но полярность обкладок его тоже изменяется, напряжение на обкладках (как и на полюсах генератора) увеличивается, а ток, продолжая идти в том же направлении, уменьшается. К концу третьей четверти заряд конденсатора закончен. Напряжение на его обкладках и на полюсах генератора максимально, а ток равен нулю (см. график, рис. 35).

В течение четвертой четверти напряжение на полюсах генератора уменьшается, а скорость изменения напряжения увеличивается. Конденсатор разряжается на генератор, напряжение на его обкладках падает все быстрее и быстрее, а ток, изменив свое направление, возрастает. К концу последней четверти периода напряжение на обкладках конденсатора падает до нуля, а ток возрастает до максимума (см. график, рис. 35). Дальше этот процесс повторяется вновь.

Так объясняется сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с емкостью.

Для цепи, оказывающей току только емкостное сопротивление, угол сдвига фаз, как уже указывалось, равен $\frac{\pi}{2}$ радиан (90°). Если цепь имеет не только емкостное, но и активное сопротивление, то угол сдвига фаз между током и напряжением меньше $\frac{\pi}{2}$ радиан.

Перейдем к рассмотрению вопроса о том, от чего и как зависит емкостное сопротивление конденсаторов.

Сопротивление конденсатора уменьшается с увеличением его емкости. В этом мы убедились на опыте. Лампа накаливания, включенная в осветительную сеть последовательно с батареей конденсаторов, горела ярче, когда емкость батарей была нами увеличена (частота тока оставалась той же). Оказывается, что сопротивление конденсатора зависит также и от частоты тока. С увеличением частоты переменного тока сопротивление, оказываемое конденсатором, уменьшается. Эта зависимость сопротивления конденсатора от его емкости и от частоты переменного тока подтверждается и опытом и теорией.

Емкостное сопротивление (обозначается буквой x_c) измеряется в омах и вычисляется по формуле:

$$x_c = \frac{1}{\omega c},$$

где x_c — емкостное сопротивление (в омах), ω — угловая частота, равная $2\pi f$ (f — частота переменного тока, выраженная в герцах), а c — емкость (в фарадах).

Формуле емкостного сопротивления может быть придан и такой вид:

$$x_c = \frac{1}{2\pi fc}.$$

Из этой формулы видно, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока и емкости.

Закон Ома справедлив и для цепи с емкостным сопротивлением. Если в цепи имеется только емкостное сопротивление (активное настолько мало, что им можно практически пренебречь), то величина тока в цепи может быть определена по формуле

$$I = \frac{U}{x_c},$$

или

$$I = \frac{U}{1/\omega c} = \frac{U}{1/2\pi fc},$$

где I — действующее значение переменного тока (в амперах),

U — действующее значение напряжения (в вольтах),

x_c — емкостное сопротивление (в омах), f — частота тока (в герцах), а c — емкость (в фарадах).

Подсчитаем емкостное сопротивление переменному току с частотой в 50 Гц, оказываемое конденсатором в 1 микрофараду.

Напомним единицы электроемкости.¹

1 фарада (F) = 1 К/В

1 микрофарада (μF) = 10^{-6} F.

1 пикофарада (пФ) или, иначе, пикофарада (пФ) = 10^{-12} F.

Емкостное сопротивление указанного конденсатора вычисляется по формуле

$$x_c = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi fc};$$

$$x_c = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \approx 3185 \text{ ом.}$$

Этот же конденсатор в цепи тока высокой частоты, например в 10⁶ Гц, имеет емкостное сопротивление

$$x_c = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6} \approx 0,16 \text{ ом.}$$

Как видим, емкостное сопротивление конденсатора при увеличении частоты тока с 50 до 10⁶ Гц уменьшается в 20 000 раз.

Таким образом, один и тот же конденсатор, оказывающий току низкой частоты очень большое сопротивление, для токов высокой частоты оказывается „легко проходимым“. Это ценное свойство конденсаторов чрезвычайно широко использовано в радиотехнике для разделения постоянных токов и токов низкой частоты от токов высокой частоты.

Сопротивление, оказываемое переменному току цепью, в которой имеется активное и емкостное сопротивления, вычисляется по формуле¹

$$z = \sqrt{R^2 + x_c^2},$$

где z — полное сопротивление (в омах), R — активное сопротивление (в омах), а x_c — емкостное сопротивление (в омах).

Так как $x_c = \frac{1}{\omega c}$, то

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega c}\right)^2},$$

или

$$z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2}}.$$

Закон Ома применим и для цепи, состоящей из активного и емкостного сопротивлений, причем в этом случае формула закона принимает следующий вид:

$$I = \frac{U}{z},$$

или

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2}}},$$

где I и U — соответственно действующие значения тока (в амперах) и напряжения (в вольтах).

¹ Вывод формулы здесь выходит за пределы курса средней школы и потому не приводится.

Изучение явлений в цепи переменного тока с емкостью (а также и с индуктивностью) имеет очень большое образовательное и практическое (политехническое) значение. Кроме того, знания этих вопросов крайне существенны для осознанного усвоения учащимися материала следующей программной темы „Электромагнитные колебания и волны“. Вместе с тем, как показывает опыт, в усвоении учащимися основных понятий и представлений, связанных с цепью переменного тока, имеющей емкостное сопротивление, часто возникают большие трудности. Все это обязывает учителей физики обратить на эту часть темы особое внимание.

Имея в виду требования программы, основным в рассматриваемом параграфе надо считать понятие об емкостном сопротивлении и, следовательно, о реактивных сопротивлениях вообще. Подойти к этому вопросу можно, установив тот факт, что конденсатор, прерывая своим диэлектриком цепь постоянного тока, не создает разрыва в цепи переменного тока. В такой последовательности и рассматривается этот вопрос в § 10.

Для того чтобы облегчить учащимся понимание процесса в цепи переменного тока с конденсатором, не следует пренебрегать демонстрацией заряда конденсатора от источника постоянного тока, пользуясь установкой, данной на рис. 33, а затем уже перейти к демонстрации конденсатора с последовательно соединенной с ним лампой накаливания в цепи переменного тока. Необходимо особенно четко и последовательно проанализировать этот опыт и тщательно изложить процесс заряда и разряда конденсатора в цепи переменного тока, используя, в частности, рис. 34. Очень важно, чтобы учащиеся разобрались в том, как дважды в течение периода (в первую и третью четверти) конденсатор заряжается, получая энергию от генератора, и как он дважды за тот же период (во вторую и четвертую четверти) разряжается, возвращая энергию генератору. Понимание сути этого процесса обеспечит осознанное усвоение учащимися следующих вопросов: 1) почему конденсатор не создает разрыва в цепи переменного тока, 2) какова природа емкостного сопротивления и 3) почему емкостное сопротивление не вызывает потерь энергии. Изучением этих вопросов и

можно ограничиться, имея в виду требования программы. Следовательно, обязательным минимумом для изложения на уроке нужно считать материал, содержащийся в § 10 (стр. 64—70), за исключением указаний на ток смещения в конденсаторе, и последний абзац стр. 73—зависимость емкостного сопротивления от емкости и частоты тока (без формул).

Остальной материал этого параграфа в тех или иных размерах может быть использован при наличии времени в занятиях с наиболее сильными классами на уроке и во внеклассных занятиях.

По отношению к этой части содержания § 10 полезно сделать следующие замечания.

Объяснение сдвига фаз между током и напряжением в цепи с емкостью принадлежит к числу весьма трудных вопросов. Основное затруднение возникает у учащихся в связи с тем, что когда напряжение на обкладках конденсатора растет, ток уменьшается, и наоборот. Учащиеся склонны видеть в этом сдвиге фаз нарушение закона Ома. Очевидно, объяснив происхождение сдвига фаз, нужно в основу рассуждений положить утверждение, что ток в цепи с конденсатором зависит не от абсолютного значения напряжения на его обкладках, а от скорости изменения этого напряжения. Математическое доказательство этой зависимости требует знаний в области производных и потому недоступно учащимся средней школы. Тем не менее, помочь им осознать эту закономерность можно. Известно, что аналогия, сводя новое для нас явление или закономерность к уже известному, обращают это новое в более привычное, обоснованное и потому приемлемое. Не что подобное соотношению между током и напряжением в цепи переменного тока с конденсатором можно усмотреть в явлениях индукции в витке, вращающемся в магнитном поле. При прохождении витка через нейтральную плоскость магнитный поток, пронизывающий контур витка, максимален, а скорость изменения магнитного потока равна нулю, и э. д. с. равна нулю. При дальнейшем вращении витка магнитный поток уменьшается, скорость же изменения потока, а вместе с ней и э. д. с. увеличиваются. Можно продемонстрировать сдвиг фаз между током и напряжением, прибегнув к прибору, рекомендуемому М. А. Ушаковым. (Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955.)

Можно помочь учащимся осмыслить и величину угла сдвига фаз между током и напряжением в цепи с емкостным и активным сопротивлением. Если цепь имеет только активное сопротивление, ток и напряжение совпадают по фазе, т. е. угол сдвига фаз равен нулю. Если цепь имеет только емкостное сопротивление, угол сдвига фаз 90° . Есть все основания полагать, что если цепь имеет и емкостное, и активное сопротивление, то угол сдвига фаз будет больше нуля, но меньше 90° . Известно, что это предположение полностью оправдывается.

В связи с формулой емкостного сопротивления $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$ мы приходим к выводу, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока и величине емкости. Эта зависимость может быть подтверждена следующими рассуждениями.

С увеличением емкости конденсатора увеличивается (во столько же раз) количество электричества, идущего на заряд конденсатора (при том же напряжении на полюсах генератора, а значит, и на обкладках конденсатора и при той же частоте тока). Но конденсатор и в этом случае дважды заряжается и дважды разряжается за тот же промежуток времени, равный периоду. Значит, количество электричества, проходящего по цепи за то же время, возросло (в то же число раз), т. е. увеличился ток, а это свидетельствует о том, что сопротивление уменьшилось (в то же число раз).

Допустим, что, не изменяя емкости конденсатора и напряжения на его обкладках, мы увеличим частоту тока (в несколько раз). Период уменьшится (во столько же раз). Теперь конденсатор будет дважды заряжаться и дважды разряжаться за меньший промежуток времени. Следовательно, по цепи будет проходить за каждую единицу времени большее (во столько же раз) количество электричества. Иначе говоря, ток возрастет, а значит, сопротивление уменьшится (во столько же раз). Отсюда емкостное сопротивление конденсатора, при прочих равных условиях, обратно пропорционально частоте тока.

Очень полезен расчет, произведенный в конце § 10, иллюстрирующий зависимость емкостного сопротивления от частоты тока. В теме „Электромагнитные колебания и волны“ нам часто придется ссылаться на свойство конденсаторов оказывать переменному току большое или малое сопротивление в зависимости от частоты тока.

§ 11. Индуктивное сопротивление

В предыдущем параграфе мы разобрали вопрос о емкости в цепи постоянного и переменного тока. Рассмотрим теперь цепь постоянного и переменного тока с включенной в нее катушкой индуктивности. С этой целью произведем следующие опыты.

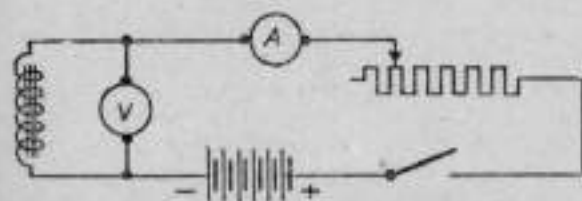


Рис. 37. Катушка индуктивности в цепи постоянного тока.

Соберем установку, изображенную на рис. 37. В качестве катушки индуктивности используем катушку с надписью „120 вольт“ от разборного школьного трансформатора, надев ее на разборный стальной сердечник, состоящий из двух половинок; источник тока — батарея аккумуляторов. Дадим катушке индуктивности напряжение в 6 в и измерим ток в цепи. Допустим, что он

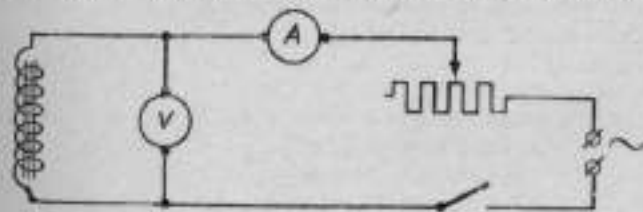


Рис. 38. Катушка индуктивности в цепи переменного тока.

окажется равным 2 а. Теперь включим эту же катушку индуктивности в цепь переменного тока, собранную, как это указано на рис. 38.

В качестве источника тока используем городскую осветительную сеть. Пользуясь реостатом, установим снова в цепи катушки ток в 2 а. Окажется, что в этом случае напряжение на катушку индуктивности придется

дать больше 6 а. Заметим, что активное сопротивление катушки осталось прежним. (При частоте тока в 50 гц небольшим изменением сопротивления проводника, из которого сделана катушка, можно пренебречь.) Очевидно, что в случае переменного тока катушка индуктивности оказывает току еще какое-то другое сопротивление, кроме активного.

Перейдем к следующему опыту.

Последовательно с катушкой трансформатора включим лампу на 12 в мощностью 50 вт и будем питать эту цепь в одном случае постоянным током от батареи аккумуляторов на 12 в (активное сопротивление провода катушки очень мало), в другом — переменным током от городской осветительной сети с напряжением 127 в.

Когда цепь питается постоянным током, лампа горит нормально. Когда же эта цепь с тем же активным сопротивлением питается переменным током, лампа горит тускло, несмотря на то, что напряжение в этом случае подается в 10 раз большее. И, наконец, поставим еще один опыт.

Возьмем стальной сердечник школьного разборного трансформатора с надетой на него катушкой с надписью „127 вольт“ (сердечник, состоящий из двух половин, должен быть замкнут и стянут болтом). Последовательно с катушкой соединим лампу накаливания на 127 в мощностью в 40 вт, рубильник и собранную цепь подключим к сети городского переменного тока. Замкнем цепь.

Нить лампы еле накалится. Выключив катушку из цепи (прикоснувшись к клеммам ее металлическим предметом, например, отверткой или ножом), увидим, что лампа загорится нормально, хотя изменение активного сопротивления цепи произошло очень небольшое, так как активное сопротивление катушки очень мало по сравнению с сопротивлением лампы. Снизь перемычку с клемм катушки, обнаружим, что нить лампы опять будет слабо накаливаться.

Все эти поставленные нами опыты свидетельствуют о следующем.

Катушка индуктивности оказывает постоянному току некоторое сопротивление, называемое, как известно, активным. Очевидно, что та же катушка, находясь в цепи переменного тока, оказывает переменному току, кроме активного, еще какое-то другое сопротивление.

Сопротивление, оказываемое переменному току катушкой индуктивности, называется индуктивным сопротивлением.

Происхождение индуктивного сопротивления может быть объяснено следующим образом.

В предыдущем параграфе мы остановились на вопросе о том, как изменится ток во время замыкания цепи постоянного тока, не обладающей индуктивностью, но в которой имеется емкость. Что же можно сказать о токе при замыкании цепи, в которой нет емкости, а есть катушка индуктивности?

Представим себе, что катушка индуктивности подключена к полюсам источника постоянного тока.

При замыкании такой цепи и появлении в ней тока в катушке возникает э. д. с. самоиндукции (которой в линейных участках цепи можно пренебречь); направление этой э. д. с. по закону Ленца противоположно приложенному к катушке напряжению, создаваемому генератором.

В связи с этим ток в цепи достигнет значения, определяемого законом Ома, не мгновенно, а в течение некоторого, хотя и очень малого, промежуток времени. Это изменение силы тока по времени графически может быть изображено так, как показано на рис. 39.

Постепенное увеличение постоянного тока в цепи с катушкой индуктивности можно наблюдать из следующем опыте. Соберем установку по схеме рис. 40. E — источник постоянного тока (батарея аккумуляторов вольт на 10), A — амперметр, L — катушка индуктивности (катушка от разборного школьного трансформатора (с надписью „220 в“), надетая на замкнутый сердечник из мягкой стали, K — рубильник. При замыкании цепи обнаруживается, что стрелка амперметра довольно медленно отклоняется от нуля, что свидетельствует о медленном нарастании тока. Подберем реостат

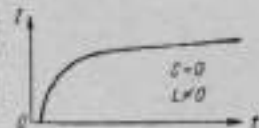


Рис. 39. График тока в катушке индуктивности, подключенной к источнику постоянного тока.

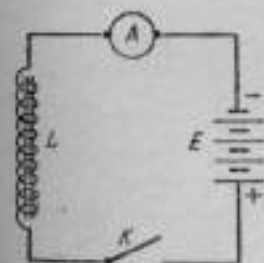


Рис. 40. Установка для наблюдения постепенного нарастания тока в катушке индуктивности.

Рис. 40. Установка для наблюдения постепенного нарастания тока в катушке индуктивности.

с таким же активным сопротивлением, как у катушки индуктивности. Для этого, исключив в цепь (см. рис. 40) вместо катушки индуктивности реостат с движком и передвигая движок, добьемся, чтобы ток в цепи с реостатом был такой же, как и при катушке индуктивности. Теперь при замыкании цепи источника постоянного тока с реостатом нарастание тока происходит несравненно быстрее.

Таким образом, влияние катушки индуктивности в цепи постоянного тока сказывается только в течение того промежутка времени, пока ток в цепи при замыкании ее нарастает от нуля до значения, определяемого законом Ома. Иначе обстоит дело, когда катушка индуктивности включена в цепь переменного тока.

И в этом случае при замыкании цепи и появлении в ней тока в катушке индуктивности возникает э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока. Но в связи с тем, что направление переменного тока изменяется большое число раз в каждую секунду, с момента первого появления тока в цепи (при замыкании цепи) до момента первого изменения направления тока пройдет такой малый промежуток времени, что ток в цепи не успеет достигнуть значения, определяемого законом Ома. Очевидно, что ток не достигнет этого значения не только при первом появлении тока (при замыкании цепи), но и в каждую половину каждого последующего полупериода, в течение которой переменный ток возрастает от нуля, т. е. во все последующее время. Поэтому величина переменного тока в цепи с катушкой индуктивности будет меньше при том же напряжении, чем в случае тока постоянного, при котором э. д. с. самоиндукции возникает только в момент замыкания цепи.

Сопоставим изменения тока в цепи с катушкой индуктивности с изменениями напряжения на концах ее. Пусть катушка индуктивности подключена к полюсам генератора переменного тока (рис. 41). Допустим, что активное сопротивление соединительных проводов и провода катушки настолько мало, что им можно пренебречь. Тогда в цепи имеется только индуктивное сопротивление. Напряжение на полюсах генератора, а также и напряжение на катушке, концы которой подключены к полюсам генератора, изменяются синусоидально. Переменный ток в цепи изменяется тоже синусоидально. Построим график тока в цепи катушки индуктивности и график напряже-

ния на ней на одной и той же прямоугольной системе координат. Такой график изображен на рис. 42. На этом графике, кроме синусоиды тока в катушке индуктивности (I) и синусоиды напряжения на катушке (U), пунктиром показана синусоида э. д. с. самоиндукции (E_s), возникающей в катушке.

Синусоида тока на этом графике показана сдвинутой относительно напряжения на катушке на 90° , что обусловлено следующими обстоятельствами. Если цепь переменного тока обладает только активным сопротивлением, то изменения тока в ней происходят одновременно с изменениями напряжения в цепи. В этом случае синусоиды тока и напряжения совпадают по фазе, угол сдвига фаз равен нулю. При наличии в цепи только индуктивного сопротивления положение дела изменяется: возникающая в катушке э. д. с. самоиндукции противодействует напряжению на катушке, создаваемому источником тока. По этой причине ток в цепи нарастает медленнее, чем при отсутствии индуктивности.

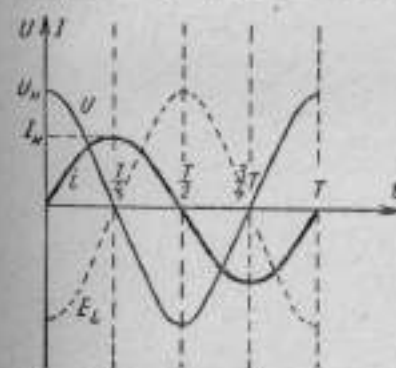


Рис. 42. График тока и напряжения для цепи с индуктивностью.

и во все последующее время. Проследим по графику на рис. 42 за изменениями тока, напряжения и э. д. с. самоиндукции в катушке. Для того чтобы разобраться в графике, прежде всего вспомним следующее. Величина э. д. с. самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения тока, вызвавшего явление самоиндукции. Следовательно,

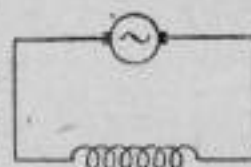


Рис. 41. Индуктивность в цепи переменного тока.

В результате более подробного исследования этого вопроса установлено, что ток достигает максимального значения только к концу первой четверти периода, т. е. к тому моменту времени, когда напряжение уже успеет упасть до нуля. В итоге ток отстает от напряжения по фазе на 90° . Этот сдвиг фаз сохраняется

э. д. с. самоиндукции будет наибольшей тогда, когда будет наибольшей скорость изменения тока в катушке, а она, в свою очередь, будет наибольшей, когда значение тока проходит через нуль. Э. д. с. самоиндукции будет равна нулю, когда скорость изменения тока окажется равной нулю. А это имеет место тогда, когда значение тока переходит через максимум. Что же касается направления э. д. с. самоиндукции, то оно определяется законом Ленца. А именно, при возрастании тока, вызванного явлением самоиндукции (в данном случае — при возрастании тока в катушке), э. д. с. самоиндукции направлена противоположно току, а при убывании тока направление э. д. с. совпадает с направлением тока. Теперь перейдем к графику на рис. 42.

В начале первой четверти периода к катушке приложено максимального значения напряжение, созданное генератором. В катушке возникает синусоидальный переменный ток, возрастающий от нуля. Скорость изменения его максимальна. Возникает максимального значения э. д. с. самоиндукции, по абсолютному значению равная напряжению на катушке, но по направлению противоположная току, а значит, и вызванному ток напряжению. Дальше, в течение первой четверти периода возникший в катушке ток нарастает сначала быстро, а потом все медленнее и медленнее, так как напряжение на катушке уменьшается с возрастающей скоростью. В связи с уменьшением нарастания тока уменьшается и э. д. с. самоиндукции. В конце первой четверти ток максимален, а скорость его изменения равна нулю. Э. д. с. самоиндукции и напряжение равны нулю (см. рис. 42).

С момента появления тока в катушке возникает магнитное поле, энергия которого возрастает по мере увеличения тока. Электрическая энергия, поступающая от генератора, запасается в виде энергии магнитного поля катушки.

В течение второй четверти периода ток уменьшается, скорость изменения его увеличивается. Э. д. с. самоиндукции, изменив свое направление на противоположное (направление э. д. с. теперь совпадает с направлением тока), возрастает, поддерживая ток. В связи с уменьшением тока напряженность магнитного поля падает. Энергия магнитного поля переходит в электрическую. В течение второй четверти периода катушка отдает генератору

энергию, полученную в течение первой четверти периода. Теперь (во второй четверти периода) напряжение на полюсах генератора и на катушке возрастает, будучи по направлению противоположным э. д. с. самоиндукции и току. (То обстоятельство, что напряжение на полюсах генератора и на катушке в течение второй четверти периода противоположно току, не должно нас смущать. В самом деле, в течение первой четверти катушка получает энергию от генератора. Причиной, вызвавшей ток в катушке, является напряжение на ней, созданное генератором, а э. д. с. самоиндукции играет роль противодействия. Поэтому направление напряжения и тока совпадают, а направление э. д. с. противоположно им. В течение второй четверти положение дел меняется. Теперь катушка отдает энергию генератору. Причиной, поддерживающей ток, является э. д. с. самоиндукции, а напряжение на катушке играет роль противодействия. Понятно, почему теперь совпадают по направлению э. д. с. самоиндукции и ток, а направление напряжения противоположно им.) К концу второй четверти периода ток падает до нуля (скорость изменения самая большая), э. д. с. самоиндукции и напряжение максимальны и противоположны по направлению (см. график, рис. 42).

В течение третьей четверти катушка вновь получает электрическую энергию от генератора, накапливая ее в виде энергии магнитного поля. В этот промежуток времени ток, изменив свое направление на противоположное (теперь оно совпадает с направлением напряжения), увеличивается. Энергия магнитного поля возрастает. Напряжение, так же как и противодействующая ему э. д. с. самоиндукции, уменьшается. К концу третьей четверти ток максимален, а напряжение и э. д. с. самоиндукции равны нулю (см. график, рис. 42).

В течение четвертой четверти катушка возвращает генератору энергию, запасенную в предыдущую четверть периода.

Ток, сохраняя прежнее направление, уменьшается (с возрастающей скоростью изменения). Энергия магнитного поля тоже уменьшается, переходя в энергию тока. Э. д. с. самоиндукции, поддерживающая ток, имеет то же направление и растет. Напряжение противоположно току и э. д. с. увеличивается. К концу четвертой четверти ток равен нулю, а напряжение и э. д. с. самоиндукции

максимальны и противоположны по направлению (см. график, рис. 42).

Дальше рассмотренный нами процесс повторяется сначала.

На графике, изображенном на рис. 42, видно, что в цепи с индуктивностью между током и напряжением имеется сдвиг фаз. Угол сдвига фаз равен 90° ($\frac{\pi}{2}$ радиан),

но здесь напряжение опережает ток на 90° , в то время как в цепи с емкостью напряжение отставало от тока на 90° . Следовательно, в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения на 90° (по времени — на четверть периода). Отставание тока от напряжения обусловлено влиянием э. д. с. самоиндукции.

На рис. 43 изображена векторная диаграмма для цепи, имеющей только индуктивное сопротивление. На ней тоже, кроме вектора тока (I) и вектора напряжения (U), пунктиром показан вектор э. д. с. самоиндукции. Он по абсолютной величине равен вектору напряжения, а по направлению противоположен ему. Напряжение на катушке и э. д. с. самоиндукции в ней изменяются синусоидально, причем в каждый момент времени они равны по абсолютному значению, но противоположны по направлению.

Из приведенных выше применительно к графику на рис. 42 рассуждений вытекает, что *индуктивное сопротивление обусловлено возникновением в катушке электродвижущей силы самоиндукции.*

Из тех же рассуждений видно, что *индуктивное сопротивление потерь энергии не вызывает.*

Остановимся еще раз на вопросе о том, почему это так происходит, отбросив все остальные соображения, связанные с процессом тока в катушке индуктивности.

Когда в цепи с индуктивностью в течение первой четверти периода происходит увеличение переменного тока от нуля до максимального значения, то в катушке возникает э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока. Но э. д. с. самоиндукции возникает потому, что возникает магнитное поле, обладающее энергией. На создание магнитного

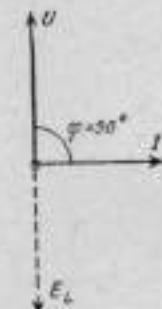


Рис. 43. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с индуктивностью.

поля расходуется энергия тока, которая таким образом запасается в форме энергии магнитного поля.

В течение второй четверти периода, когда происходит уменьшение тока от максимума до нуля, напряженность магнитного поля уменьшается. Опять возникает э. д. с. самоиндукции, но уже не препятствующая току, а поддерживающая его. Запасенная в магнитном поле энергия превращается в энергию тока, возвращается снова в цепь (генератору). Магнитное поле исчезает.

В течение третьей четверти ток, изменив свое направление на противоположное, вновь увеличивается от нуля до максимального значения. Опять появляется магнитное поле (противоположного направления по сравнению с направлением поля в первой четверти) и возникает э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока. Энергия магнитного поля растет за счет электрической энергии. И наконец, в течение четвертой четверти периода ток уменьшается, уменьшается и напряженность магнитного поля. Возникающая э. д. с. самоиндукции поддерживает ток, запасенная в магнитном поле энергия переходит в электрическую и снова возвращается генератору.

Так как генератор получает во вторую и четвертую четверти периода энергии столько же, сколько он отдает за первую и третью четверти периода, то потерь энергии не происходит. (Еще раз напомним, что мы берем такой идеальный случай, когда активного сопротивления вовсе нет.)

В связи с этим *индуктивное сопротивление относится к виду реактивных сопротивлений.*

Познакомившись с емкостным и индуктивным сопротивлением, сопоставим их друг с другом. Как было указано в § 10 (стр. 69), влияние емкости в цепи переменного тока аналогично проводимости, а действие индуктивности аналогично сопротивлению (стр. 81). Уже по этому можно судить, что действия емкости и индуктивности в цепи переменного тока противоположны. Это обстоятельство подтверждается и многими другими соображениями.

В самом деле, в момент замыкания цепи источника постоянного тока, обладающей только емкостным сопротивлением (рис. 32), ток максимален, а затем, по мере того как обкладки конденсатора заряжаются, ток уменьшается. Иное происходит в цепи источника постоянного

тока, имеющей только индуктивное сопротивление (рис. 39). В момент замыкания такой цепи ток сначала равен нулю, а потом уже возрастает до известного значения. В такой же мере противоположны действия емкости и индуктивности в цепи переменного тока (соответственно рис. 35 и 42).

В начальный момент времени в цепи, обладающей только емкостью (рис. 35), ток максимален, а в цепи, обладающей только индуктивностью (рис. 42), он равен нулю. Далее в первом случае ток уменьшается от максимального значения, падая до нуля к концу первой четверти периода. Во втором случае ток за это же время возрастает до максимального значения. Затем, в течение второй четверти периода, ток в первой цепи, изменив свое направление на противоположное, возрастает от нуля до максимума. Ток во второй цепи за ту же вторую четверть периода уменьшается от максимума до нуля, и т. д.

Все сказанное находится в соответствии с тем, что в цепи, имеющей только емкостное сопротивление, ток опережает напряжение на 90° (см. стр. 71), а в цепи, имеющей только индуктивное сопротивление, ток отстает от напряжения на 90° .

Противоположность действий емкости и индуктивности в цепи переменного тока особенно отчетливо обнаруживается в явлении резонанса напряжений и токов, кратко описанном в конце настоящего параграфа.

Перейдем к вопросу о том, от чего и как зависит индуктивное сопротивление проводников.

Индуктивное сопротивление обусловлено явлением самоиндукции. Величина э.д.с. самоиндукции зависит от размеров и формы проводника и от магнитной проницаемости среды, в которой он находится.

Так, при частоте переменного тока в 50 гц э.д.с. самоиндукции, возникающая в линейном проводнике, невелика. При той же частоте переменного тока э.д.с., возникающая в том же проводнике, согнутом в форме соленоида (катушки), много больше. Если внутрь такой катушки вставить сердечник из ферромагнитного вещества (например, из мягкой стали), то э.д.с. самоиндукции в этом случае возрастет во много раз. Таким образом, величина э.д.с. самоиндукции, возникающей в различных проводниках (при одной и той же частоте переменного тока), различна. В связи с этим явление самоиндукции в

различных проводниках характеризуется особой величиной, называемой индуктивностью или коэффициентом самоиндукции данного проводника.

Физический смысл этой величины может быть установлен следующим образом.

Величина э.д.с. индукции, как известно, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника. Эта зависимость выражается формулой

$$E = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

где E — э.д.с. индукции, $\Delta \Phi$ — изменение магнитного потока, охватываемого контуром проводника, Δt — время, в течение которого это изменение произошло, а k — коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от выбора единиц для измерения величин, входящих в эту формулу. Величина э.д.с. самоиндукции зависит от этих же факторов. В случае явления самоиндукции речь идет об изменении магнитного потока, принадлежащего данному проводнику. Поэтому оказывается, что скорость изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника, прямо пропорциональна скорости изменения тока в этом проводнике. Тогда указанная формула принимает вид

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

т. е. э.д.с. самоиндукции в каком-либо проводнике оказывается прямо пропорциональной скорости изменения тока в этом проводнике. (Например, если за 2 секунды ток возрос от 1 до 9 а, то скорость изменения тока равна 4 а/сек.)

Коэффициент пропорциональности L в этой формуле имеет не только математический, но и физический смысл. Физическая величина L получила название *индуктивности проводника или коэффициента самоиндукции его*.

Положив все величины в правой части этого равенства, кроме L , равными единице, получим, что *индуктивность проводника численно равна э.д.с. самоиндукции, возникающей в этом проводнике при изменении тока в нем на единицу тока за единицу времени*. Таким образом, индуктивность характеризует величину э.д.с.

самоиндукции, возникающей в данном проводнике в зависимости от скорости изменения тока в нем.

Как уже указывалось, индуктивность различных проводников различна. Для измерения индуктивности вводится единица индуктивности.

Практическая единица индуктивности — генри (обозначается русскими буквами *гн* или латинской *H*).

Генри — это индуктивность такого проводника, в котором при изменении тока на 1 а в секунду возникает в д.с. самоиндукции в 1 в.

$$1 \text{ генри} = 1 \frac{\text{вольт}}{\text{ампер}} \cdot \text{сек.}$$

Следовательно, если в каком-либо проводнике при изменении тока в нем на 1 а в секунду возникнет в д.с. самоиндукции, допустим, в 3 в, то индуктивность такого проводника окажется равной 3 гн.

Единица, в 1000 раз меньшая генри, называется миллигенри (*мгн* или *mH*), а в миллион раз меньшая — микрогенри (*мкгн* или μH).

$$1 \text{ генри} = 10^3 \text{ мH} = 10^6 \mu H.$$

Как уже указывалось, в д.с. самоиндукции, возникающая в проводнике при изменении тока в нем, зависит от размеров проводника, его формы и от магнитной проницаемости среды, в которой он находится. Но величина в д.с. самоиндукции, возникающей при изменении тока на 1 а в 1 сек., определяет индуктивность проводника. Следовательно и индуктивность проводника зависит от этих же причин.

Проводник, свернутый в соленоид (намотанный на катушку), обладает, при прочих равных условиях, большей индуктивностью, чем линейный. Объясняется это тем, что в этом случае происходит большее изменение магнитного потока вследствие того, что каждый данный виток пронизывается магнитным потоком не только „своим собственным“, но и потоками соседних витков. При бифилярной намотке (проводником, предварительно согнутым по длине вдвое) в обеих половинах проводника идет ток одной и той же величины, но в противоположных направлениях. Противоположны по направлению и магнитные потоки по всей длине этих половинок проводников. Индуктивность та-

кого проводника равна нулю. К бифилярной обмотке прибегают при изготовлении эталонов сопротивления.

При такой намотке эталон будет оказывать и постоянному, и переменному току одинаковое сопротивление, равное активному сопротивлению проводника. При намотке небифилярной эталон оказывал бы постоянному току только активное сопротивление, а переменному — и активное, и индуктивное. Полное сопротивление эталона во втором случае оказалось бы больше, чем в первом.

Если внутри соленоида ввести стальной сердечник, то магнитный поток будет усилен, а значит, изменение магнитного потока, охватываемого контуром проводника, при прочих равных условиях, станет больше. Среди многочисленных сортов стали есть такие, у которых магнитная проницаемость особенно велика (так называемая мягкая сталь). Именно такие сорта стали и применяются в данном случае. Так как магнитная проницаемость мягкой стали очень велика, то индуктивность такого соленоида увеличивается во много раз.

Для увеличения индуктивности проводника его наматывают на катушку, внутрь которой вкладывают ферромагнитный сердечник. Такие катушки называют катушками самоиндукции или катушками индуктивности.

Катушки индуктивности обладают большой индуктивностью и потому оказывают переменному току большое индуктивное сопротивление.

Вложение стального сердечника, вложенного внутрь катушки индуктивности, на индуктивность катушки, а следовательно, и на ее индуктивное сопротивление переменному току можно выявить следующим опытом.

Воспользуемся установкой для одного из опытов, описанных в начале параграфа: катушка от разборного трансформатора, надетая на замкнутый сердечник (стянутый болтом), последовательно с ней — лампа накаливания на 127 в (ватт на 40), рубильник. Эту цепь подключим к сети городского переменного тока. Замкнем цепь. Нить лампы еле светит. Очевидно, ток в цепи небольшой, недостаточный для нормального накаливания нити.

Свинтив барашек с болта, стягивающего две половины сердечника трансформатора, и вынув самый болт, начнем смещать одну половину сердечника относительно другой, медленно сдвигая одну половину сердечника с другой до полного их разъединения (снять одну „половину“ сер-

самоиндукции, возникающей в данном проводнике в зависимости от скорости изменения тока в нем.

Как уже указывалось, индуктивность различных проводников различна. Для измерения индуктивности вводится единица индуктивности.

Практическая единица индуктивности — генри (обозначается русскими буквами *гн* или латинской *H*).

Генри — это индуктивность такого проводника, в котором при изменении тока на 1 а в секунду возникает в д.с. самоиндукция в 1 в.

$$1 \text{ генри} = 1 \frac{\text{вольт}}{\text{ампер}} \cdot \text{сек.}$$

Следовательно, если в каком-либо проводнике при изменении тока в нем на 1 а в секунду возникает в д.с. самоиндукция, допустим, в 3 в, то индуктивность такого проводника окажется равной 3 гн.

Единица, в 1000 раз меньшая генри, называется миллигенри (*мгн* или *mH*), а в миллион раз меньшая — микрогенри (*мкгн* или μH).

$$1 \text{ генри} = 10^3 \text{ мн} = 10^6 \mu H.$$

Как уже указывалось, в д.с. самоиндукция, возникающая в проводнике при изменении тока в нем, зависит от размеров проводника, его формы и от магнитной проницаемости среды, в которой он находится. Но величина в д.с. самоиндукции, возникающей при изменении тока на 1 а в 1 сек., определяет индуктивность проводника. Следовательно и индуктивность проводника зависит от этих же причин.

Проводник, свернутый в соленоид (намотанный на катушку), обладает, при прочих равных условиях, большей индуктивностью, чем линейный. Объясняется это тем, что в этом случае происходят большие изменения магнитного потока вследствие того, что каждый данный виток пронизывается магнитным потоком не только „своим собственным“, но и потоками соседних витков. При бифилярной намотке (проводником, предварительно согнутым по длине вдвое) в обеих половинах проводника идет ток одной и той же величины, но в противоположных направлениях. Противоположны по направлению и магнитные потоки по всей длине этих половинок проводника. Индуктивность та-

кого проводника равна нулю. К бифилярной обмотке прилегают при изготовлении эталонов сопротивления.

При такой намотке эталон будет оказывать и постоянному, и переменному току одинаковое сопротивление, равное активному сопротивлению проводника. При намотке небифилярной эталон оказывал бы постоянному току только активное сопротивление, а переменному — и активное, и индуктивное. Полное сопротивление эталона во втором случае оказалось бы больше, чем в первом.

Если внутрь соленоида ввести стальной сердечник, то магнитный поток будет усилен, а значит, изменение магнитного потока, охватываемого контуром проводника, при прочих равных условиях, станет больше. Среди многочисленных сортов стали есть такие, у которых магнитная проницаемость особенно велика (так называемая мягкая сталь). Именно такие сорта стали и применяются в данном случае. Так как магнитная проницаемость мягкой стали очень велика, то индуктивность такого соленоида увеличивается во много раз.

Для увеличения индуктивности проводника его наматывают на катушку, внутрь которой вкладывают ферромагнитный сердечник. Такие катушки называют катушками самоиндукции или катушками индуктивности.

Катушки индуктивности обладают большой индуктивностью и потому оказывают переменному току большое индуктивное сопротивление.

Влияние стального сердечника, вложенного внутрь катушки индуктивности, на индуктивность катушки, а следовательно, и на ее индуктивное сопротивление переменному току можно выявить следующим опытом.

Вспользуемся установкой для одного из опытов, описанных в начале параграфа: катушка от разборного трансформатора, надетая на замкнутый сердечник (свинутый болт), последовательно с ней — лампа накаливания на 127 в (ватт на 40), рубильник. Эту цепь подключим к сети городского переменного тока. Замкнем цепь. Нить лампы еле светится. Очевидно, ток в цепи небольшой, недостаточный для нормального накаливания нити.

Свинтив барашек с болта, стягивающего две половины сердечника трансформатора, и вынув самый болт, начнем смещать одну половину сердечника относительно другой, медленно сдвигая одну половину сердечника с другой до полного их разъединения (снять одну „половину сер-

дечника с другой подниманием вверх трудно, вследствие сильного магнитного притяжения, да этого делать и не нужно). Видим, что лампа во время этой операции начинает гореть все более и более ярко. Наиболее ярко она горит при разведенных половинках сердечника. (Полезно обратить внимание на гудение сердечника, вызываемое перемагничиванием его.^{*} Заменяя катушку трансформатора другой (с надписью „220 вольт“) и снова собрав сердечник, увидим, что нить лампы вовсе не будет накаливаться.

Смещая одну половину железного сердечника относительно другой, мы уменьшаем сечение сердечника. Магнитный поток, до этого замкнутый сердечником (для простоты рассуждений допустим, что так называемая магнитная утечка равна нулю), теперь частично идет в воздух. Магнитный поток, проходивший внутри катушки, уменьшается. Вследствие этого уменьшается индуктивность катушки и ее индуктивное сопротивление. Ток в цепи увеличивается.

Лампа горит ярче. Уменьшение магнитного потока внутри катушки становится еще большим при полностью разведенных половинках сердечника. Индуктивность катушки и ее индуктивное сопротивление уменьшаются в еще большей степени. Ток в цепи соответственно возрастает, лампа горит еще ярче.

Сменив одну катушку другой с большим числом витков, мы увеличили индуктивность, а значит, и индуктивное сопротивление в цепи. Поэтому в последнем варианте опыта нить лампы совсем не накаливается.

Индуктивность катушки тем больше, чем больше ее диаметр, чем меньше ее длина и чем больше число витков в ней. (Индуктивность катушки, при прочих равных условиях, пропорциональна квадрату числа витков в ней.)

Из последнего опыта вытекает, что индуктивное сопротивление проводника зависит от его индуктивности, причем с увеличением индуктивности индуктивное сопротивление увеличивается.

Оказывается, что индуктивное сопротивление проводника зависит и от частоты переменного тока, проходящего по ним, так же возрастающая с увеличением частоты переменного тока.

^{*} Это связано с изменением длины сердечника при его намагничивании (магнитоупругость).

Индуктивное сопротивление (обозначается буквой x_L) измеряется в омах и вычисляется по формуле

$$x_L = \omega L,$$

где x_L — индуктивное сопротивление (в омах), ω — круговая частота, равная $2\pi f$ (f — частота переменного тока в герцах), L — индуктивность цепи (в генри).

Формуле индуктивного сопротивления может быть придан и такой вид:

$$x_L = 2\pi fL.$$

Отсюда видно, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально индуктивности и частоте переменного тока.

Выше, сравнивая графики рис. 39 и 32, мы пришли к выводу, что действия индуктивности и емкости в цепи противоположны. Этот вывод подтверждается и тем обстоятельством, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока и емкости, а индуктивное — прямо пропорционально индуктивности и частоте тока.

Закон Ома применим и для цепи с индуктивным сопротивлением.

Если в цепи имеется только индуктивное сопротивление (настолько мало активное, что им можно практически пренебречь), то сила тока в цепи (в амперах) может быть вычислена по формуле

$$I = \frac{U}{x_L},$$

или

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi fL},$$

где I — действующее значение переменного тока (в амперах), U — действующее значение напряжения, x_L — индуктивное сопротивление (в омах), f — частота тока (в герцах), а L — индуктивность (в генри).

Подсчитаем индуктивное сопротивление, оказываемое катушкой с индуктивностью в 1 гн, переменному току с частотой 50 гц. (В радиотехнике применяют катушки с индуктивностью от нескольких микрогенри до десятков и даже сотен генри.)

$$x_L = \omega L = 2\pi fL,$$

$$x_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1 = 314 \text{ ом.}$$

Если такую катушку включить в цепь переменного тока с напряжением в 127 в, то по ней пойдет ток:

$$I = \frac{u}{x_L} = \frac{127}{314} \approx 0,4 \text{ а.}$$

Произведенный подсчет показывает, что катушка с индуктивностью в 1 мГн оказывает току с частотой в 50 Гц довольно большое индуктивное сопротивление — 314 Ом. Активное сопротивление ее, зависящее от длины провода, его поперечного сечения и материала ($R = \frac{\rho l}{S}$), значительно меньше. Поэтому на практике приближенно считают, что катушка индуктивности обладает только одним индуктивным сопротивлением.

Подсчитаем индуктивное сопротивление той же катушки высокочастотному переменному току, например, с частотой 10⁶ герц.

$$x_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 = 6,28 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 6,28 \text{ МОм.}$$

Как видим, сопротивление той же катушки резко возросло. Таким образом, одна и та же катушка оказывает разное индуктивное сопротивление токам разной частоты.

В случае переменного тока высокой частоты даже проводник, согнутый в виде дуги, а не намотанный на катушку с сердечником, обладает большим индуктивным сопротивлением. Сопротивление переменному току цепи, в которой имеется активное и индуктивное сопротивление, вычисляется по формуле

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2},$$

где z — полное сопротивление (в омах), R — активное сопротивление (в омах), а x_L — индуктивное сопротивление (в омах). Так как

$$x_L = \omega L,$$

то, подставив, получим

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \text{ или } z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Формула закона Ома в применении к цепи, состоящей из активного и индуктивного сопротивления, имеет следующий вид:

$$I = \frac{u}{z},$$

или

$$I = \frac{u}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

где I и u соответственно действующие значения тока (в амперах) и напряжения (в вольтах).

Теперь представим себе цепь, состоящую из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности. Общее реактивное сопротивление такой цепи, казалось бы, должно равняться сумме индуктивного сопротивления катушки x_L и емкостного сопротивления конденсатора x_C . Выше несколько раз было подчеркнуто, что действие этих сопротивлений в цепи противоположно. Поэтому, одно из этих сопротивлений (емкостное сопротивление) берется со знаком минус. В связи с этим общее сопротивление рассматриваемой цепи выражается формулой

$$x_{\text{общ}} = x_L - x_C,$$

где

$$x_L = \omega L, \text{ а } x_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Формула закона Ома для такой цепи принимает следующий вид:

$$I = \frac{u}{x_{\text{общ}}} = \frac{u}{x_L - x_C}.$$

Если цепь, кроме индуктивного и емкостного сопротивления, имеет еще и активное сопротивление, то общее сопротивление такой цепи вычисляется по формуле

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2},$$

где R — общее активное сопротивление цепи, а $x_L - x_C$ — общее реактивное сопротивление цепи.

Формула закона Ома для такой цепи принимает следующий вид:

$$I = \frac{u}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}}.$$

Противоположность действий в цепи индуктивного и емкостного сопротивления ярко проявляется в явлении резонанса напряжений (при последовательном соединении индуктивности и емкости, рис. 44) и резонанса токов (при па-

параллельном соединении индуктивности и емкости, рис. 45). Суть этого явления, в самых общих чертах, сводится к следующему. Для осуществления резонанса напряжений (или токов) нужно, чтобы индуктивное и емкостное сопротивления в цепи были равны, т. е. $x_L = x_C$, или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. Из формулы общего сопротивления цепи, имеющей активное, индуктивное и емкостное сопротивления $z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}$, видно, что в этом случае индуктивное и емкостное сопротивления погасит друг друга и в цепи останется только активное сопротивление соединительных проводов и провода катушки, которое может быть очень небольшим. В связи с этим в конденсаторе и катушке индуктивности, соединенных по-

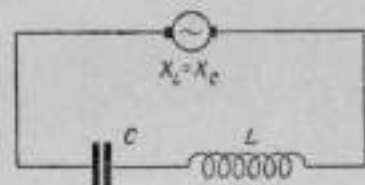


Рис. 44. Колебательный контур с последовательно соединенными емкостью и индуктивностью (резонанс напряжений).

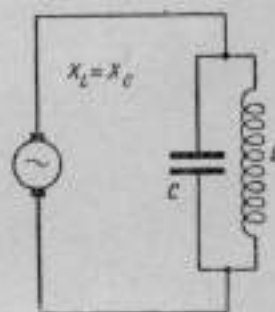


Рис. 45. Колебательный контур с параллельно соединенными емкостью и индуктивностью (резонанс токов).

следовательно (см. рис. 44), будет иметь место переменный ток, действующее значение которого будет наибольшим, а действующие напряжения на катушке и на конденсаторе окажутся равными и имеющими максимально большие значения. Они могут во много раз превышать напряжение на внешней цепи генератора, так как катушка и конденсатор обмениваются энергией между собой. При том же условии ($x_L = x_C$) при параллельном соединении конденсатора и катушки (рис. 45) в этих параллельных ветвях возникнут равные токи наибольшей величины, при небольшом токе в неразветвленной части цепи (резонанс токов). В обоих случаях катушка и конденсатор, получив при замыкании цепи энергию от генератора, дальше обмениваются ею только между собой, генератор же вос-

полняет убыль энергии, обусловленной наличием в цепи активного сопротивления.

Как указывалось в § 3, в случае переменного тока мы имеем дело с периодическими изменениями (колебаниями) величины тока. Поэтому цепь, состоящая из генератора и последовательно или параллельно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, называется *колебательным контуром*. При условии, что $x_L = x_C$, контур оказывается настроенным в резонанс.

Цепи, изображенные на рис. 44 и 45, являются колебательными контурами. Для настройки контура в резонанс нужно изменить емкость или индуктивность контура (или то и другое одновременно).

Колебательные контуры получили широчайшее распространение в радиотехнике.

Очень эффектный опыт, обнаруживающий резонанс напряжений в цепи, питаемой от осветительной сети переменным током частотой в 50 гц, можно наблюдать на следующей установке. Батарея конденсаторов (в 4—6 микрофард) соединяется последовательно с лампой накаливания (вatt на 40) и с катушкой переменной индуктивности, в качестве которой может быть использован школьный разборный трансформатор. Надев на сердечник трансформатора катушку с самым большим числом витков, накладываем половинки сердечника друг на друга, не стигивая их болтом, чтобы в последующем можно было, смещая одну половинку сердечника относительно другой, изменять величину индуктивности катушки. Цепь подключаем к городскому переменному току с частотой в 50 гц, а затем смещением одной половины сердечника трансформатора относительно другой плавно изменяем индуктивность катушки. Лампа начинает гореть все более и более ярко, и наконец, при некотором положении смещаемой нами половины сердечника наступает резонанс напряжений и лампа вспыхивает сильным белым светом.

Объяснение этому явлению может быть дано следующее.

Как уже указывалось, полное сопротивление цепи, имеющей активное, емкостное и индуктивное сопротивления, выражается формулой

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2},$$

где R — активное сопротивление цепи. В эту формулу индуктивное и емкостное сопротивления входят в виде разности. Поэтому при равенстве их общее сопротивление цепи уменьшится, став равным только активному сопротивлению. Ток в цепи резко возрастет — наступит резонанс напряжений. Он проявится в том, что на обкладках конденсатора и на концах катушки индуктивности возникнут значительные напряжения, превосходящие приложенное внешнее напряжение.

Известно, что можно заставить колебаться с большой амплитудой тяжелый груз, подвешенный на тросе, легкими толчками при подтягивании нитки, привязанной к тросу, если эти слабые толчки будут происходить в такт с колебаниями груза.

Итак, резонанс напряжений проявляется в том, что полное сопротивление контура, оказываясь равным только активному сопротивлению контура, становится минимальным, а сила тока — максимальной.

В описанном выше опыте, сдвигая одну половину сердечника трансформатора относительно другой, мы изменяли индуктивность катушки и тем самым добивались того, что индуктивное сопротивление становилось равным емкостному. В итоге — сопротивление контура оказывалось минимальным, ток возрастал и лампа начинала гореть очень ярко.

Можно показать, что резонанс напряжений, в значительной степени, при которых переменный ток встретит в цепи только активное сопротивление (а если оно будет мало, то сила тока резко возрастет), наступит тогда, когда период тока в данной цепи окажется равным

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

В самом деле, как уже указывалось, явление резонанса наступает, если

$$X_L - X_C = 0, \text{ или } X_L = X_C.$$

Тогда

$$\omega L = \frac{1}{\omega C},$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC},$$

но

$$f = \frac{1}{T}.$$

Имеем:

$$\frac{2\pi L}{T} = \frac{1}{2\pi C}$$

$$T^2 = 4\pi^2 LC$$

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

Но по этой же формуле определяется период собственных колебаний контура. Отсюда видно, что резонанс наступает в том случае, если период подведенного к контуру переменного напряжения совпадает с периодом собственных колебаний контура.

Описанный опыт резонанса напряжений интересно сопоставить с опытами (см. § 10 и 11), поставленными с целью выявить роль индуктивности и емкости в цепи переменного тока.

При включении последовательно с лампой емкости или индуктивности лампа горела менее ярко, чем без них. Здесь же она горит чрезвычайно ярко. Это наглядно подтверждает, что действия емкости и самоиндукции противоположны и «гасят» друг друга.

Резонанс напряжений применяется в радиотехнике для получения в контурах максимального напряжения и максимального тока.

Методические указания

Основная цель, преследуемая изложением материала § 11, — создать у учащихся правильное представление об индуктивном сопротивлении.

Невозможно понять «механизм» возникновения индуктивного сопротивления, если не учесть влияния катушки индуктивности на режим тока в цепи. Поэтому: 1) изучению явления самоиндукции должно быть уделено достаточное внимание и 2) должна быть достаточно основательно рассмотрена цепь тока с катушкой индуктивности. В соответствии с программой по физике для средней школы, ознакомление учащихся с этими вопросами может быть осуществлено в следующей последовательности.

Явление самоиндукции рассматривается в связи с темой «Электромагнитная индукция».

Так как знания в области самоиндукции непосредственно нужны для создания представления об индуктивном

сопротивления, то остановимся схематично на плане изучения явления самоиндукции.

Рассказываем учащимся о том, что э. д. с. индукции может быть возбуждена в проводнике с током вследствие изменения его собственного магнитного поля, а не поля „постороннего“ для данного проводника. Устанавливаем, что возбуждение э. д. с. индукции в проводнике с током, вызываемое изменением его собственного магнитного поля, называется самоиндукцией, а возникающая

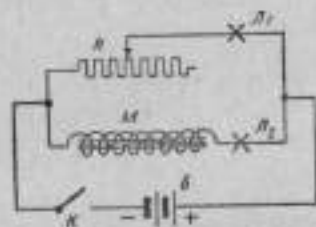


Рис. 46. Схема установки для демонстрации возбуждения э. д. с. самоиндукции при замыкании цепи.



Рис. 47. Схема установки для демонстрации возбуждения э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи.

в этом случае э. д. с. называется электродвижущей силой самоиндукции. Приходим к заключению, что э. д. с. самоиндукции возникает в любой цепи постоянного тока при замыкании и размыкании цепи, при всяком изменении тока в ней.

В соответствии с законом Ленца, э. д. с. самоиндукции при замыкании цепи противодействует э. д. с. источника тока, а при размыкании цепи направление э. д. с. самоиндукции совпадает с э. д. с. генератора. Вследствие этого при замыкании цепи ток нарастает от нуля до некоторого своего значения не мгновенно, а в течение некоторого, хотя и небольшого, промежутка времени. Точно так же при размыкании цепи ток падает до нуля не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени. Далее проверяем опытным путем справедливость выдвинутых положений: демонстрируем известные опыты возбуждения э. д. с. самоиндукции при замыкании и размыкании цепи. Схемы установок для этих демонстраций приведены на рис. 46 и 47.

В качестве катушки индуктивности M используем катушку школьного разборного трансформатора с сердечником.

L_1 и L_2 — лампы от карманного фонаря, L_3 — лампа такая же или неоновая, например, „сигнальная“, с потенциалом зажигания порядка 80 в, B — батарея аккумуляторов на 4 в. Замыкая цепь установки по рис. 46, обнаруживаем, что лампа L_2 загорается позже лампы L_1 . (До опыта при замкнутой цепи надо подобрать в реостате R такое сопротивление, при котором нить лампы L_1 накалится так же ярко, как и нить лампы L_2 .) Объяснение: в катушке M при замыкании цепи возникает э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока. Демонстрируя возбуждение э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи, полезно обратить внимание учащихся на следующие обстоятельства. В цепь (рис. 47) включена батарея аккумуляторов на 4 в. Вспышка неоновой лампы при размыкании цепи свидетельствует о том, что при размыкании цепи возникает э. д. с. самоиндукции порядка 80 в. (Именно по этой причине, если в установке (рис. 47) применятся лампочка от карманного фонаря, она часто перегорает.)

Из поставленных опытов вытекает, что при замыкании цепи или при увеличении тока в цепи э. д. с. самоиндукции противоположна направлению, а при размыкании или при уменьшении тока в цепи э. д. с. самоиндукции по направлению совпадает с приложенным напряжением. Индикаторами э. д. с. самоиндукции в обоих случаях служат лампы.

В методическом отношении ценно поставить опыт в таком варианте, в котором наблюдалось бы направление э. д. с. самоиндукции при замыкании и размыкании цепи. Схема установки, нужной для этой цели, показана на рис. 48, где AB — реохорд с движком, M — катушка индуктивности, такая же, как в предыдущих опытах, R — магазин сопро-

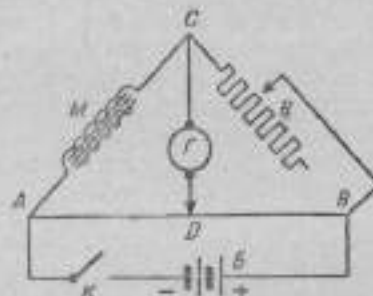


Рис. 48. Схема установки для демонстрации возбуждения э. д. с. самоиндукции при замыкании и размыкании цепи.

тилений, G — школьный универсальный гальванометр с нулем посредине шкалы, K — рубильник, B — батарея аккумуляторов на 4 в. До начала демонстрации подбираем такое сопротивление в магазине R , чтобы при замкнутой цепи в мостике CD тока не было. Демонстрацию можно вести в следующей последовательности.

Замыкаем цепь рубильником K . Стрелка гальванометра отклоняется в ту или иную сторону и затем возвращается к нулю. Очевидно, при установившемся токе в параллельных ветвях ACB и ADB потенциал в точках C и D одинаков; тока в мостике CD нет. При замыкании цепи, т. е. при появлении в цепи, а значит и в катушке M , тока, в последней возникла э. д. с. самоиндукции, существовавшая в течение всего времени нарастания тока от нуля до некоторого постоянного значения. В течение этого промежутка времени потенциалы в точках C и D были различны, по мостiku CD шел ток. Затем размыкаем цепь. Стрелка гальванометра отклоняется, но уже в сторону, противоположную той, в какую она отклонилась при замыкании цепи, и затем снова возвращается к нулю. Очевидно, что при размыкании цепи в катушке M снова возникла э. д. с. самоиндукции, существовавшая в течение того промежутка времени, пока ток изменялся от своего первоначального значения до нуля; потенциал точек C и D был различен, и по мостiku CD снова шел ток. Но теперь уже ток в мостике CD идет в противоположном направлении, что свидетельствует о том, что направление э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи противоположно направлению ее при замыкании цепи.

Анализируя поставленные опыты, надо сказать учащимся о том, что э. д. с. самоиндукции возникает во всех участках цепи: и в линейных проводниках, и в резисторе, и в катушке, но результаты опытов свидетельствуют о том, что в катушке возникает э. д. с. самоиндукции наибольшей величины. (Магнитный поток катушки во много раз больше потока, создаваемого линейными проводниками.)

В заключение рассказываем учащимся о причинах образования искры при размыкании цепи и об образовании дуги при размыкании цепи тока большей мощности, а также о способах, предупреждающих образование дуги (в частности, о масляных выключателях).

Таков объем сведений о явлении самоиндукции, которыми должны располагать учащиеся. К уроку, на котором будет рассматриваться индуктивное сопротивление, следует задать учащимся повторить этот материал дома. Тогда учащиеся будут подготовлены к усвоению нового материала.

В начале § 11 описана серия опытов, обнаруживающих проявление в цепи индуктивного сопротивления. При недостатке времени можно ограничиться последним из этой серии опытов: катушка индуктивности, соединенная последовательно с лампой накаливания, подключается к осветительной сети (см. стр. 80).

В этом случае следует особенно тщательно проанализировать результаты опыта, установив, что активное сопротивление провода катушки в данном случае не играет решающей роли.

Для осознанного восприятия учащимися значения э. д. с. самоиндукции в возникновении индуктивного сопротивления очень ценна демонстрация постепенного, а не мгновенного возрастания тока в цепи источника постоянного тока с индуктивностью (по схеме рис. 40). При этом очень важно для дальнейшего сопоставить график тока заряда конденсатора от источника постоянного тока (см. рис. 32) с графиком тока в катушке индуктивности, соединенной с источником переменного тока (см. рис. 39). Можно использовать установку, изображенную на рис. 40, не только для того, чтобы демонстрировать возбуждение э. д. с. самоиндукции при замыкании цепи, но и для возбуждения э. д. с. самоиндукции при размыкании этой цепи. С этой целью следует параллельно катушке индуктивности подключить неоновую лампу, например, типа МН-3. Потенциал зажигания ее выше 50 в. При замкнутой цепи неоновая лампа не светится, так как напряжение на катушке, а значит и на лампе, равно напряжению на полюсах батареи аккумуляторов, т. е. примерно 10 в, что меньше потенциалы зажигания лампы. При размыкании цепи лампа вспыхивает. Значит, она получила в это время напряжение выше 50 в. Ясно, что источником такого напряжения не могла служить батарея на 10 в. Очевидно, вспыхивание лампы обусловлено возникшей при размыкании цепи э. д. с. самоиндукции, превышающей по величине потенциал зажигания лампы. В такой постановке опыт чрезвычайно эффектен и убедителен. Ясно, что при

уменьшении тока в катушке не вследствие размыкания цепи, а по какой-либо другой причине тоже должна возникнуть э. д. с. самоиндукции. Таким образом, достаточно наглядно будет обнаружено возбуждение э. д. с. самоиндукции как при увеличении тока (при замыкании цепи), так и при уменьшении тока (размыкании цепи). Правильному представлению об индуктивном сопротивлении может помочь также следующий эффектный опыт.

Когда в установке по схеме рис. 46 замыкается цепь, то лампочка L_1 загорается, но позднее лампочки L_1 . Если же очень часто замыкать и размыкать эту цепь ключом, то лампочка L_2 вовсе не горит. Замыкание и размыкание цепи тока в этом опыте аналогично увеличению и уменьшению тока. Отсюда естественный переход к индуктивному сопротивлению, оказываемому катушкой переменному току (см. стр. 82).

График (и векторная диаграмма) тока и напряжения в цепи переменного тока с индуктивностью и сдвиг фаз между ними выходят за пределы программы и могут быть опущены из материала, подлежащего обязательному изложению на уроке. Но эти вопросы должны быть предельно ясны для учителя, и, кроме того, их крайне желательно использовать в работе с наиболее сильными учащимися и во внеклассных занятиях. Нам представляется, что анализ упомянутого графика — единственный путь к созданию достаточно полного и верного представления об индуктивном сопротивлении и к установлению того, что индуктивное сопротивление не вызывает потерь энергии. При этом необходимо учесть, что процесс тока в катушке индуктивности нельзя рассматривать в отрыве от превращения энергии тока в энергию магнитного поля и наоборот (как это, к сожалению, часто делается). Основной «камень преткновения» для учащихся (попутно заметим — не только средней школы) — это противоположные направления напряжения и тока во вторую и четвертую четверти периода. С точки зрения учащихся получается нелогичность: напряжение вызывает ток, противоположный по своему направлению. Это затруднение отпадает, если учесть, что в указанные четверти периода ток поддерживается на напряжении со стороны генератора, а э. д. с. самоиндукции, появляющейся в связи с постепенным исчезновением магнитного поля. Значит, этот процесс есть процесс перехода энергии магнитного

поля в энергию тока. В первую и третью четверти периода имеет место обратный процесс — превращение энергии тока в энергию магнитного поля.

Другое, не менее распространенное затруднение обусловлено тем, что напряжение и э. д. с. самоиндукции в рассматриваемой нами цепи всегда равны по абсолютной величине и противоположны по направлению. Нам кажется возможным и допустимым рассматривать напряжение и э. д. с. самоиндукции как «действие» и «противодействие». Все дело только в том, что в связи с указанными выше превращениями энергии напряжение и э. д. с. самоиндукции через каждую четверть периода меняются своими ролями: в первую четверть периода напряжение — «действие», а э. д. с. самоиндукции — «противодействие»; во вторую четверть периода э. д. с. самоиндукции — «действие», а напряжение — «противодействие» и т. д. Но и при таком подходе к равенству между напряжением на катушке индуктивности и э. д. с. самоиндукции в ней может возникнуть следующий вопрос: за счет чего в такой цепи может возникнуть и поддерживаться ток? Дело в том, что рассматриваемый пример и график на рис. 42, иллюстрирующий его, имеют в виду идеальный случай, когда в цепи имеется только индуктивное сопротивление, а реактивное полностью отсутствует. В этих условиях активное сопротивление цепи окажется равным нулю, а следовательно, и действующее напряжение может быть равным нулю. В реальной цепи, помимо индуктивного сопротивления, всегда имеет место той или иной величины активное сопротивление, и э. д. с. самоиндукции в такой цепи соответственно меньше приложенного напряжения.

Указанное затруднение, если его не предотвратить, встретится в дальнейшем, а именно при изучении процесса трансформации тока.

Многие затруднения и недоумения отпадут, если при рассмотрении переменного тока в катушке индуктивности должным образом учесть, что скорость изменения тока наибольшая, когда его значение переходит через нуль, и эта скорость равна нулю, когда ток проходит через свое максимальное (амплитудное) значение.

Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока с индуктивностью полезно продемонстрировать на приборах, рекомендуемых М. А. Ушаковым. (Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955.)

Влияние емкости и индуктивности на режим тока с помощью этих приборов может быть выявлено очень наглядно и убедительно.

Несмотря на то, что график тока и напряжения в цепи с индуктивностью на уроке может не рассматриваться (если точно следовать программе), необходимо все же достаточно убедительно показать учащимся, почему индуктивное сопротивление не вызывает потерь энергии. Поэтому в § 11 после довольно подробного анализа графика тока и напряжения приведены (на стр. 86—87) в более общем виде соображения, связанные с превращением энергии в катушке, объясняющие, почему индуктивное сопротивление не сопровождается потерями энергии. При этом мы показываем еще раз, что индуктивное сопротивление обусловлено появлением в катушке э. д. с. самоиндукции.

Понятие об индуктивности (коэффициенте самоиндукции) как о физической величине должно быть у учащихся.

В целях повторения этого вопроса может быть использована соответствующая часть § 11, в которой нужные сведения приведены в некоторую систему. На уроке же дальше следует поставить демонстрацию, описанную на стр. 91—92. Этот опыт убедительно показывает влияние сердечника на величину индуктивности катушки и вскрывает зависимость величины индуктивного сопротивления от величины индуктивности. Индикатором величины тока в описанной установке служит лампа накаливания. Разумеется, она может быть заменена амперметром, или же последовательно с катушкой и лампой может быть включен и амперметр.

В школьных условиях демонстрировать зависимость индуктивного сопротивления от частоты тока затруднительно, но рассказать об этой зависимости учащимся следует.

В итоге, на уроке должно быть установлено, что такое индуктивное сопротивление (стр. 80), каково его происхождение (стр. 81—82), почему наличие его в цепи не вызывает потерь энергии (стр. 86—87) и что оно возрастает с увеличением индуктивности и частоты тока.

Этим исчерпывается минимум материала из § 11, подлежащего изучению на уроке.

Действующей программой по физике для средней

школы не предусмотрено ознакомление учащихся с формулами емкостного и индуктивного сопротивления. Введение их позволяло бы дать учащимся формулу общего сопротивления цепи, имеющей активное, емкостное и индуктивное сопротивления, и ознакомить учащихся с самими общими представлениями об электрическом резонансе.

Краткое рассмотрение этих вопросов дало бы возможность лучше подготовить учащихся к осознанному усвоению основ радиотехники (в теме „Электромагнитные колебания и волны“) и соответствовало бы целым, последующим политехническим обучением. Назревшая необходимость в освещении указанных вопросов подтверждается следующим обстоятельством. Учебник физики для X класса¹ рассматривает резонанс напряжений в цепи переменного тока, имеющей активное, емкостное и индуктивное сопротивления. И это правильно, но для осмысленного восприятия этого явления нужны знания, о которых шла речь выше. Полезно сказать учащимся, что в формулу общего сопротивления цепи индуктивное и емкостное сопротивления входят как разность и для того, чтобы предупредить их о возможной ошибке. Почти несомненно (хотя мы не раз подчеркивали, что действия емкости и индуктивности в цепи противоположны), что учащиеся, имея в виду последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности, будут считать, что их общее сопротивление равно сумме сопротивлений. По всем этим причинам желательно (факультативно, во время внеклассных занятий) дать учащимся формулы емкостного, индуктивного и общего сопротивления цепи и сказать об условиях, при которых возникает резонанс напряжений и токов.

В этих целях может быть использован материал, помещенный в конце § 11.

¹ См. А. В. Перышкин. Курс физики. Часть третья. Учебник, 1955, стр. 202.

ГЛАВА II

ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 12. Получение трехфазного тока

Переменный ток, возникающий в витке, равномерно вращающемся в магнитном поле, получил название однофазного переменного тока.

Генераторы однофазного переменного тока, краткое описание которых дано в § 5, применяются довольно редко.

В производстве электроэнергии широкое распространение получили генераторы, представляющие собою систему (совокупность) из нескольких цепей переменного тока, получивших название многофазных систем.

Рассмотрим некоторые из многофазных систем. Известно, что в витке, равномерно вращающемся в однородном магнитном поле, возникает синусоидальная э. д. с., а если виток замкнут на внешней цепи, то — и синусоидальный переменный ток. Мгновенное значение э. д. с. и тока в витке выражается формулами

$$E = E_m \cdot \sin \alpha, \text{ или } E = E_m \cdot \sin \omega t$$

$$I = I_m \cdot \sin \alpha, \text{ или } I = I_m \cdot \sin \omega t.$$

В магнитном поле можно вращать не один, а несколько витков, не связанных друг с другом.

Представим себе (рис. 49) стальной цилиндр, на боковой поверхности которого в пазах расположены три одинаковые обмотки, лежащие вдоль цилиндра, параллельно его оси. Обмотки не соединены одна с другой и сдвинуты относительно друг друга на угол в 120° . Цилиндр равномерно вращается, например, против часовой стрелки, в магнитном поле, созданным полюсами N и S магнита.

На рис. 49 дан схематический чертеж такой установки. Буквами H_1 , H_2 и H_3 обозначены начала обмо-

ток, а K_1 , K_2 и K_3 — концы соответствующих обмоток. Практически генератор выполняется так, что в каждой обмотке возникает синусоидальная э. д. с., а если обмотки замкнуты, то в них возникает синусоидальный переменный ток.

Частота, период и амплитуда переменной э. д. с. во всех трех обмотках одинаковы, но сдвинуты по фазе на 120° , т. е. на $\frac{2}{3}\pi$ радиан. Это значит, что максимальные значения (а также и нулевые значения) э. д. с. во второй обмотке запаздывают на $\frac{1}{3}$ периода по сравнению с первой, а в третьей обмотке — на $\frac{2}{3}$ периода по сравнению со второй.



Рис. 49. Трехфазная система переменного тока.

Запаздывание происходит по следующей причине.

Период э. д. с. равен времени одного оборота ротора (цилиндра). На угол в 120° (составляющий $\frac{1}{3}$ от угла одного поворота в 360°) ротор повернется за $\frac{1}{3}$ периода. Значит, запаздывание максимальных (и нулевых) значений э. д. с. в каждой последующей обмотке по сравнению с предыдущей будет равно $\frac{1}{3}$ периода.

Система (совокупность) из нескольких цепей переменного тока, в которой возникают э. д. с. одной и той же частоты, но сдвинутые по фазе, называется многофазной системой.

Мы познакомимся с системой, состоящей из трех электрических цепей.

Система, состоящая из трех электрических цепей переменного тока одной частоты, э. д. с. которых сдвинуты по фазе на 120° (по времени на $\frac{1}{3}$ периода), называется *трехфазной системой*.

Рассмотренная нами трехфазная система представляет собою совокупность трех однофазных переменных токов, сдвинутых по фазе, но имеющих одинаковый период и частоту.

Совокупность трех синусоидальных переменных токов одинаковой частоты, э. д. с. которых сдвинуты по фазе на 120° (по времени на $\frac{1}{3}$ периода), называется трехфазным током.

Таким образом, трехфазный ток представляет собою совокупность трех однофазных токов, сдвинутых по фазе.

Если обмотки цилиндра (ротора) рассматриваемого нами прибора совершенно одинаковы, то, принимая во внимание, что скорость вращения всех трех обмоток ротора одинакова и что они вращаются в одном и том же магнитном поле, надо прийти к заключению, что амплитуда колебаний э. д. с. во всех трех обмотках будет одинаковой.

Такую систему называют *симметричной системой*.

Во всем последующем изложении мы будем иметь в виду только симметричные системы.

Прибор, схематично изображенный на рис. 49, можно рассматривать как принципиальную модель генератора трехфазного тока.

Осуществим упрощенную модель генератора трехфазного тока на опыте.

Возьмем три катушки от школьного разборного трансформатора (с надписью „220 вольт“), каждую со стальным сердечником. Положим их на стол так, чтобы оси катушек были сдвинуты относительно друг друга на угол в 120° (рис. 50). В центре поставим острей от магнитной стрелки с надетым на него стремечком, в которое вложены два прямолинейных магнита, расположенных так, что их одноименные полюсы направлены в одну и ту же сторону. (Берем два магнита, а не один для того, чтобы получить магнитное поле возможно большей напряженности.) Каждую из катушек соединим с демонстрационным гальванометром (магнито-электрической системы). Чтобы удобнее было сопоставлять отклонения стрелок гальванометров, расположим гальванометры „лесенкой“, так чтобы шкалы гальванометров находились одна над другой.

Собрав эту установку, произведем опыт в следующей последовательности.

Отметив положение на столе катушек II и III, отодвинем пока их вместе с их гальванометрами в сторону, оставив на месте катушку I и магниты. Приведем рукой магниты в равномерное вращение (небыстрое). Стрелка гальванометра, соединенного с катушкой I, периодически отклоняется то в одну, то в другую сторону, обнаруживая тем самым возникающий в катушке ток, изменяющийся и по величине, и по направлению. Когда магнит в процессе вращения расположится так, что продольная ось магнита (два магнита в нашей установке играют роль

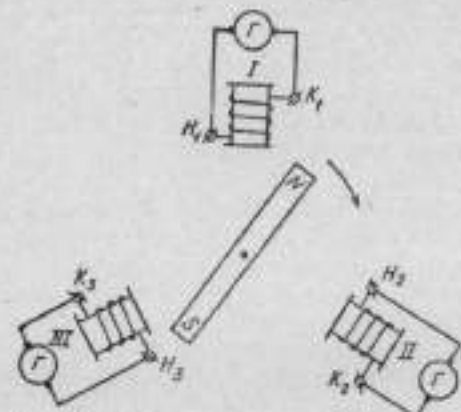


Рис. 50. Схема установки для демонстрации трехфазного тока.

одного, более „сильного“) совпадет с осью катушки (рис. 51), то магнитный поток, охватываемый контуром катушки, максимален. (На рис. 51 показаны пунктиром две магнитные линии.) Но скорость изменения магнитного потока, охватываемого контуром катушки, в этот момент времени равна нулю. (Вспомним, что такое же соотношение имеет место между величиной магнитного потока, охватываемого контуром витка, вращающегося в магнитном поле, и скоростью изменения этого потока, см. рис. 1.)

Э. д. с. индукции в катушке в этот момент времени тоже равна нулю, но при дальнейшем вращении магнита (в нашем примере — по часовой стрелке) она будет возрастать. Э. д. с. мы приписываем направление, совпадающее с направлением тока. Направление же тока

в катушке может быть установлено на основе следующих соображений. От конца катушки, обращенного в сторону движущегося магнита, удалится северный полюс его. В соответствии с законом Ленца в катушке возникает индукционный ток такого направления, что на конце катушки, обращенном в сторону магнита, возникает южный полюс, противодействующий удалению северного полюса магнита. Если взглянуть на катушку с торца, обращенного в сторону магнита, то индукционный ток в катушке покажется идущим по часовой стрелке. Таково же направление в. д. с. индукции.

При вращении магнита он за время, равное четверти периода своего вращения, повернется на угол 90° , и его ось окажется перпендикулярной к оси катушки (рис. 52). В этот момент магнитный поток, охватываемый контуром катушки, равен нулю, так как магнитные линии поля магнита „скользят“ вдоль

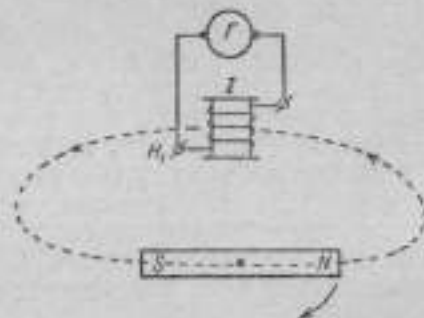


Рис. 52. Магнитный поток, охватываемый контуром катушки, равен нулю.

витков катушки. (На рис. 52 показана пунктиром одна магнитная линия.) Скорость же изменения этого магнит-

ного потока наибольшая. Э. д. с. индукции, сохраняя то же направление, возрастет до максимума.

При дальнейшем вращении магнита магнитный поток, охватываемый контуром катушки, возрастает, а скорость изменения его уменьшается. Э. д. с. индукции тоже уменьшается. Направление ее остается прежним. К концу катушки, обращенному в сторону магнита, теперь приближается южный полюс магнита, поэтому на указанном конце катушки по-прежнему остается южный полюс. (Полюс катушки остается южным также и потому, что от него удаляется северный полюс магнита. Но решающее значение имеет приближающийся к катушке южный полюс магнита, так как он ближе к катушке.) При повороте магнита на второе 90° (а всего на 180°) ось магнита опять совпадет с осью катушки, но теперь против конца ее, обращенного к магниту, находится южный полюс магнита. В этот момент времени магнитный поток, охватываемый контуром катушки, максимален, а скорость его изменения и э. д. с. индукции равны нулю.

В течение третьей четверти поворота магнита поток, охватываемый катушкой, уменьшается, скорость изменения этого потока и э. д. с. индукции увеличатся. Но при переходе через нуль э. д. с. изменила свое направление на противоположное. От конца катушки, обращенного в сторону магнита, уходит южный полюс. На указанном конце катушки образуется теперь северный полюс. Направление индукционного тока в катушке изменилось на противоположное. Произошло это потому, что изменилось направление э. д. с.

Когда к концу третьей четверти периода вращения магнита ось его окажется перпендикулярной оси катушки, магнитный поток в катушке равен нулю, а скорость изменения его и э. д. с. индукции станут максимальными.

В течение четвертой четверти поток в катушке растет, скорость изменения его становится меньше. Э. д. с. индукции уменьшится, но направление ее остается прежним. На конце катушки, обращенном к магниту, по-прежнему остается северный полюс, так как к этому концу катушки приближается северный полюс магнита.

В конце четвертой четверти периода вращения магнита ось его совпадает с осью катушки, против нее находится опять северный полюс магнита. Магнит вернулся

в исходное положение. В этот момент поток в катушке максимален, скорость изменения его равна нулю. Э. д. с. индукции тоже равна нулю.

Дальше описанный процесс повторяется сначала.

Оказывается, что изменения э. д. с. и тока в катушке происходят не строго синусоидально. В катушке возникает переменный ток, период и частота которого соответственно равны периоду и частоте вращения магнита.

Теперь поставим на место катушки II и III с их гальванометрами и приведем магнит во вращение, по возможности равномерное (см. рис. 50).

Ясно, что в каждой из катушек возникает переменный ток, но максимальные (и нулевые) значения его в катушке II запаздывают на $\frac{1}{3}$ периода по сравнению с I, а в катушке III — на $\frac{2}{3}$ периода по сравнению со II. Иначе говоря, э. д. с. токов сдвинуты по фазе на угол в 120° . Значит, в описанной установке имеет место трехфазный переменный ток, а сама установка может быть рассматриваема как упрощенная модель генератора трехфазного тока. Каждую катушку в этом случае называют обмоткой статора. Статор в некоторых случаях представляет собою станину, на выступах которой надеты обмотки, смещенные на 120° относительно друг друга. Выступы являются сердечниками обмоток, причем эти сердечники соединены друг с другом телом статора. Ротором может служить вращающийся электромагнит, питаемый током от источника постоянного тока. На рис. 53 показан схематический чертеж модели такого генератора трехфазного тока.

На валу, на который насажен электромагнит, имеются кольца, соединенные с концами обмотки электромагнита. К кольцам прижимаются щетки, соединенные с полюсами источника постоянного тока. Описанный выше опыт может быть проведен и с помощью такой модели генератора. На рис. 53 показаны гальванометры, присоединенные к каждой обмотке генератора.

Пронаблюдав, на сколько делений отклоняется стрелка каждого гальванометра, можно убедиться в равенстве максимальных значений э. д. с. в каждой обмотке. Подсчитав число полных колебаний стрелок гальванометров за один и тот же промежуток времени, можно установить равенство периодов и частоты тока в обмотках. И наконец, закрыв одну половину шкалы „лесенки“ галь-

ванометров бумагой,¹ можно обнаружить разность фаз токов.

В опыте, который мы наблюдали, катушки были неподвижны, а магнит вращался по часовой стрелке. Несомненно, что результат будет тем же, если магнит будет неподвижным, а обмотки (их можно было бы смонтировать на стальном обруче) будут вращаться против

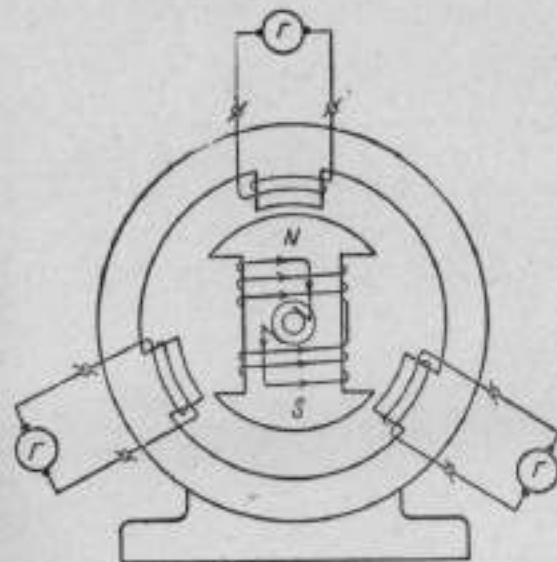


Рис. 53. Схематический чертеж модели генератора трехфазного тока.

часовой стрелки. При этом вторая катушка будет отставать от первой на угол в 120° , а третья — на угол 240° .

В установке, которой мы пользовались, мы имели дело с переменным несинусоидальным током. Вернемся в наших рассуждениях к генератору трехфазного тока, принципиальный чертеж которого дан на рис. 49. Такой генератор конструктивно выполняется так, что э. д. с. индукции в каждой его обмотке прямо пропорциональна синусу угла поворота обмотки (или синусу угла пово-

¹ В этом случае легче обнаруживается, в каком гальванометре стрелка левее нуля шкалы, а в каком правее.

рота магнита, если вращается магнит, а обмотки неподвижны).

Зная закон, по которому изменяется э. д. с. в катушке в зависимости от угла ее поворота в магнитном поле, можно вычислять мгновенные значения э. д. с. для любых моментов времени во всех трех обмотках.

Вычислим мгновенные значения э. д. с. в каждой из трех обмоток в конце каждой четверти периода, выразив мгновенные значения э. д. с. через максимальное значение ее.

За начальный момент отсчета времени возьмем момент, когда угол поворота первой обмотки равен нулю градусов. (Обмотка проходит через нейтральную плоскость.) Тогда э. д. с. E_1 в первой обмотке может быть вычислена по формуле

$$E_1 = E_m \cdot \sin \omega t,$$

но угол поворота ωt равен нулю, тогда

$$E_1 = 0.$$

В этот момент времени э. д. с. E_2 во второй обмотке

$$E_2 = E_m \cdot \sin (\omega t - 120^\circ),$$

или

$$E_2 = E_m \cdot \sin (-120^\circ).$$

$$\sin (-120^\circ) = -\sin 120^\circ = -\sin 60^\circ = -0,87.$$

Отсюда

$$E_2 = -0,87 E_m.$$

Знак минус указывает на направление э. д. с., — оно отрицательно. При графическом изображении э. д. с. величина ее во второй обмотке должна быть отложена под осью абсцисс.

В тот же момент времени э. д. с. E_3 в третьей обмотке

$$E_3 = E_m \cdot \sin (\omega t - 240^\circ),$$

или

$$E_3 = E_m \cdot \sin (-240^\circ).$$

$$\begin{aligned} \sin (-240^\circ) &= -\sin 240^\circ = \\ &= -\sin (180^\circ + 60^\circ) = \sin 60^\circ = 0,87. \end{aligned}$$

Отсюда

$$E_3 = 0,87 E_m.$$

Знак плюс указывает, что в рассматриваемый нами начальный момент времени э. д. с. в третьей обмотке по абсолютному значению равна э. д. с. во второй обмотке, но по направлению противоположна (положительна).

К концу первой четверти периода угол поворота первой обмотки равен 90° . Для этого момента времени

$$E_1 = E_m \cdot \sin 90^\circ = E_m.$$

В тот же момент времени э. д. с. во второй обмотке

$$\begin{aligned} E_2 &= E_m \cdot \sin (90^\circ - 120^\circ), \\ \sin (90^\circ - 120^\circ) &= \sin (-30^\circ) = -0,5, \\ E_2 &= -0,5 E_m. \end{aligned}$$

Для того же момента времени угол поворота третьей обмотки меньше, чем первой, на 240° . Поэтому

$$\begin{aligned} E_3 &= E_m \cdot \sin (90^\circ - 240^\circ), \\ \sin (90^\circ - 240^\circ) &= \sin (-150^\circ) = \\ &= -\sin (180^\circ - 30^\circ) = -\sin 30^\circ = -0,5. \end{aligned}$$

Отсюда

$$E_3 = -0,5 E_m.$$

В итоге — в конце первой четверти периода э. д. с. в первой обмотке максимальна и положительна, а во второй и в третьей обмотках (в каждой) равна половине максимальной и отрицательна, т. е. противоположна направлению э. д. с. в первой обмотке.

В конце второй четверти:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_m \cdot \sin 180^\circ = 0, \\ E_2 &= E_m \cdot \sin (180^\circ - 120^\circ), \\ \sin (180^\circ - 120^\circ) &= \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87, \\ E_2 &= 0,87 E_m, \\ E_3 &= E_m \cdot \sin (180^\circ - 240^\circ), \\ \sin (180^\circ - 240^\circ) &= \sin (-60^\circ) = -0,87, \\ E_3 &= -0,87 E_m. \end{aligned}$$

В конце третьей четверти:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_m \cdot \sin 270^\circ = -E_m, \\ E_2 &= E_m \cdot \sin (270^\circ - 120^\circ) = 0,5 E_m, \\ E_3 &= E_m \cdot \sin (270^\circ - 240^\circ) = 0,5 E_m. \end{aligned}$$

В конце четвертой четверти периода:

$$E_1 = E_m \cdot \sin 360^\circ = 0.$$

$$E_2 = E_m \cdot \sin (360^\circ - 120^\circ) = -0,87 E_m.$$

$$E_3 = E_m \cdot \sin (360^\circ - 240^\circ) = 0,87 E_m.$$

Сведем полученные данные в следующую таблицу:

t	ωt	$\omega t - 120^\circ$	$\omega t - 240^\circ$	E_1	E_2	E_3
0	0	-120°	-240°	0	$-0,87 E_m$	$0,87 E_m$
$1/6 T$	90°	-30°	-150°	E_m	$-0,5 E_m$	$-0,5 E_m$
$1/3 T$	180°	60°	-60°	0	$0,87 E_m$	$-0,87 E_m$
$1/2 T$	270°	150°	30°	$-E_m$	$0,5 E_m$	$0,5 E_m$
T	360°	240°	120°	0	$-0,87 E_m$	$0,87 E_m$

Попутно заметим и учтем для дальнейшего, что *каждую обмотку статора* (т. е. каждую отдельную цепь трехфазной системы) *вместе с нагрузочной цепью сокращенно называют фазой*. (Разумеется, нельзя путать фазу — обмотку статора, с фазой — физической величиной, характеризующей колебания.)

Анализируя данные таблицы, можно прийти к следующим выводам.

1. В каждой обмотке э. д. с. колеблется от $+E_m$ до $-E_m$, проходя через нуль и при этом меняя свое направление на противоположное. (В графиках для э. д. с. во второй и третьей обмотках $+E_m$ и $-E_m$ отсутствуют. Это обусловлено тем, что в этих обмотках э. д. с. достигает максимального значения в другие моменты времени, а не в те, какие взяты в таблице.)

2. Обнаруживается определенная взаимосвязь между направлениями э. д. с. А именно — одно из трех направлений э. д. с. противоположно двум другим, а если один из э. д. с. равен нулю, то две другие противоположны друг другу (см. таблицу). Эта взаимосвязь между направ-

лениями э. д. с. существует в любые моменты времени, а не только в те, какие указаны в таблице.

3. Алгебраическая сумма э. д. с. равна нулю. Так, в начальный момент времени (см. таблицу)

$$\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 = 0 + (-0,87 E_m) + 0,87 E_m = 0.$$

В конце первой четверти периода $\Sigma E = E_1 + E_2 + E_3 = E_m + (-0,5 E_m) + (-0,5 E_m) = 0$ и т. д. Оказывается, что алгебраическая сумма э. д. с. равна нулю для любых моментов времени, а не только для тех, какие взяты в таблице. Если сопротивления каждой обмотки вместе с сопротивлениями приемников энергии одинаковы (как говорят, если нагрузки на фазы одинаковы), то тогда мгновенные значения токов в фазах, выраженные через максимальное значение токов, будут такими же, как и мгновенные значения э. д. с. Следовательно, выводы, сделанные нами в результате анализа таблицы значений э. д. с., должны быть распространены и на токи в обмотках. А именно: 1) ток в каждой из трех цепей изменяется от I_m до $-I_m$ и, проходя через нуль, меняет свое направление, 2) одно из трех направлений тока в любые моменты времени противоположно двум другим, 3) алгебраическая сумма токов в трех цепях в любые моменты времени равна нулю.

В дальнейшем мы увидим, как эти ценные свойства трехфазной системы нашли практическое применение в соединениях обмоток генераторов и в использовании даваемого им трехфазного тока.

Можно начертить график каждой из переменных э. д. с., возникающих в обмотках генератора. Все три синусоиды чертит обычно на одной и той же прямоугольной системе координат. График э. д. с. трехфазной системы дан на рис. 54.

Проанализируем этот график.

На нем видно, что э. д. с. в каждой обмотке изменяется от E_m до $-E_m$, проходя через нуль и при этом меняя свое направление на противоположное.

Максимальные (и нулевые) значения э. д. с. во второй обмотке отстают по времени от максимальных (и нулевых) значений э. д. с. в первой обмотке на $1/6$ периода, а в третьей на $1/3$ периода по сравнению со второй. Иными словами — угол сдвига фаз равен 120° .

Одно из трех направлений э. д. с. в любой момент времени противоположно двум другим. Например, в конце

$\frac{1}{12}$ периода э. д. с. в первой и второй обмотках положительна, а в третьей — отрицательна.

Алгебраическая сумма э. д. с. в трех обмотках в любой момент времени равна нулю. Например, в конце $\frac{1}{12}$ периода (как это видно на графике) э. д. с. в первой обмотке равна $0,5 E_m$, во второй тоже $0,5 E_m$, а в третьей $-E_m$.

Если обмотки генератора соединены с какими-либо приемниками энергии (в нашем опыте приемниками энер-

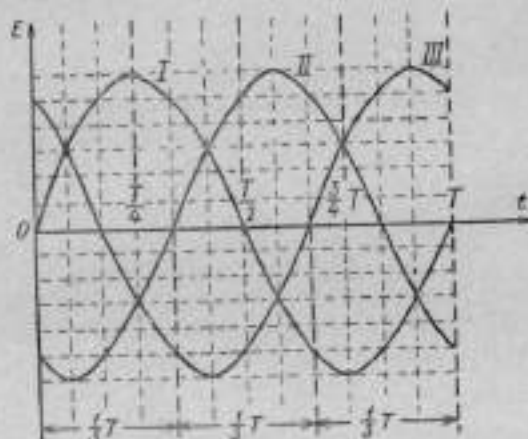


Рис. 54. График э. д. с. генератора трехфазного тока.

гии являлись гальванометры), то в цепи каждой из обмоток будет переменный ток. Можно начертить график каждого из этих трех токов тоже на одной и той же прямоугольной системе координат. Если сопротивления всех трех цепей одинаковы, то график трехфазного тока имеет совершенно такой же вид, как и график э. д. с. на рис. 54. Все то, что было сказано о свойствах э. д. с. генератора трехфазного тока, полностью относится и к трехфазному току: 1) токи сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° , 2) одно из направлений токов в любые моменты времени противоположно двум другим, 3) алгебраическая сумма токов в трех обмотках в любые моменты времени равна нулю.

На рис. 55 дана векторная диаграмма э. д. с. генератора трехфазного тока. Из нее также видно, что э. д. с.

сдвинута по фазе на 120° и что алгебраическая сумма э. д. с. в любой момент времени равна нулю. Как известно, геометрическая сумма равных векторов, сходящихся в одной точке и расположенных под углом 120° друг к другу, равна нулю. На рис. 56 изображено геометрическое сложение векторов э. д. с. Вектор $E_{1,2}$ (диагональ

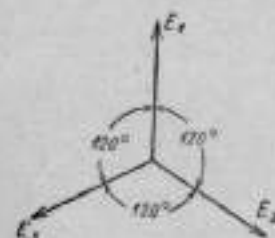


Рис. 55. Векторная диаграмма э. д. с. генератора трехфазного тока.

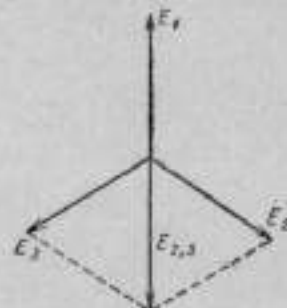


Рис. 56. Геометрическое сложение векторов э. д. с. трехфазной системы.

параллелограмма, построенного на векторах E_2 и E_3) является геометрической суммой векторов E_2 и E_3 . Но вектор $E_{1,2}$ равен по абсолютной величине, но противоположен по направлению вектору E_1 . Значит, геометрическая сумма этих трех векторов равна нулю.

Если сопротивления всех трех цепей генератора одинаковы, то векторная диаграмма трехфазного тока выглядит совершенно так же, как векторная диаграмма э. д. с. на рис. 55, а геометрическое сложение токов — как на рис. 56.

Методические указания

Знакомы учащихся с трехфазным током, мы вынуждены отойти от понятия о многофазных системах, рассматривая трехфазную как частный ее случай. Помимо этого, целесообразно создать у учащихся самые общие представления о симметричных системах. Может возникнуть вопрос: а нужно ли все это? Не проще ли сразу начинать с общего понятия о трехфазном токе? Нам представляется такая точка зрения ошибочной. Излагая учащимся основы науки, мы вместе с тем должны обеспечить правильную научную базу в этих основах, обеспе-

чить у учащихся достаточно широкий кругозор. Нельзя, например, не упомянуть о симметричных системах, ибо все последующее учение о трехфазном токе исходит из этого условия. Поэтому нецелесообразно отказываться от той небольшой пропедевтики, какая имеется в начале данного параграфа.

Второе, что требует некоторых пояснений и что касается не только § 12, но и многих других, — это мера использования соответствующей терминологии. Дело в том, что при изучении основ трехфазного тока мы пользуемся многими новыми для учащихся терминами, которые они вынуждены запоминать, заучивать. Известно, что каждая наука (не только физика) широко пользуется своим, присущим ей, «языком» (в смысле терминологии). Нельзя усвоить науку, не овладев ее «языком». Этой трудности нельзя избежать и учащимся средней школы. Отсюда — нельзя упрощать язык физики настолько, чтобы он стал недопустимо скудным и бедным, примитивным. Разумеется, недопустима и другая крайность — излишнее упрощение своеобразия языка науки, обилие терминов и специальных оборотов, без которых можно обойтись.

И наконец, третье, о чем следует сказать — определение. Известно, какое значение имеют определения и не только в физике. Определения вносят четкость, ясность в изучаемый материал; они способствуют приведению знаний в некоторую систему. Знания в системе легче, более осознанно и более твердо усваиваются учащимися. Поэтому и определениям в настоящей книге уделено соответствующее внимание. Особенно велико их значение в учении о трехфазном токе.

Применительно к принципиальной схеме генератора трехфазного тока (см. рис. 49), отираясь от которой мы создаем у учащихся первоначальные представления о трехфазном токе, учителю полезно иметь в виду следующее.

Полусным наконечникам придается такая форма, при которой магнитная индукция B на поверхности стального цилиндра (якоря) изменяется по синусоиде. Эти подробности учащимся мы не сообщаем (см. методические указания к § 1 и 5). В данном случае мы исходим из того, что учащимся уже известно, что в каждой из трех обмоток равномерно вращающегося якоря, изображенного на рис. 49, будет возбуждаться синусоидально изменяющаяся э. д. с.

Начать ознакомление учащихся с трехфазным током проще всего на действующей модели генератора трехфазного тока. В § 12 описана наиболее примитивная модель на тот случай, если в школе не найдется более совершенного прибора. Описанная установка основным требованиям удовлетворяет. Основное ее достоинство — простота и легкость сборки. Существенный недостаток состоит в том, что собирается она на демонстрационном столе, в горизонтальной плоскости. При малейшей возможности следует смонтировать катушки на вертикальном щите. Катушки можно наклеить на крючки, вбитые в щит. Магнит в этом случае должен вращаться на горизонтальной оси.

Катушки следует брать с сердечниками. Без них э. д. с. индукции будет очень малой.

Катушки лучше класть на стол (при сборке на столе), а не ставить вертикально, т. е. располагать так, чтобы ось катушки совпадала с осью магнита, когда полюс его проходит перед торцом катушки. Такое же взаимное положение катушек и магнита (как на рис. 50—52) желательно осуществить и при монтаже установки на вертикальном щите. В этом случае легче объяснить учащимся процесс изменения э. д. с. в каждой катушке по величине и по направлению. Кроме того, такое расположение катушек мы используем и в дальнейшем, при рассмотрении вращающегося магнитного поля (§ 19). При установке катушек важно учесть, что они должны быть так взаимно расположены, чтобы витки катушек казались намотанными в одну сторону, если смотреть на каждую катушку со стороны торца, обращенного к магниту. С выполнением этих условий сделай рис. 50. Проверить, правильно ли определены начало и конец обмотки на катушках, можно с помощью гальванометра. Для этого следует двигать один и тот же полюс магнита в одну и ту же сторону перед торцом каждой катушки. Стрелка гальванометра должна отклониться в одну и ту же сторону.

При наличии времени крайне желательно последовательно проследить за процессом возникновения и изменения э. д. с. в катушке. Для взаимного расположения катушек и магнита, указанного в § 12 и на рис. 50—53, характерно следующее.

При удалении северного полюса магнита от катушки в ней возбуждается э. д. с. такого же направления, как

и при приближении к этой катушке южного магнитного полюса. И наоборот, удаление южного магнитного полюса от катушки эквивалентно в этом отношении приближению к катушке северного магнитного полюса. Из изложенного вытекает, что при удалении северного полюса от катушки, в ней возникает э. д. с. одного направления, а при приближении северного же полюса к этой же катушке направление э. д. с. в ней противоположно первоначальному.

Катушки можно располагать в модели генератора и иначе, а именно так, как это показано на рис. 57.

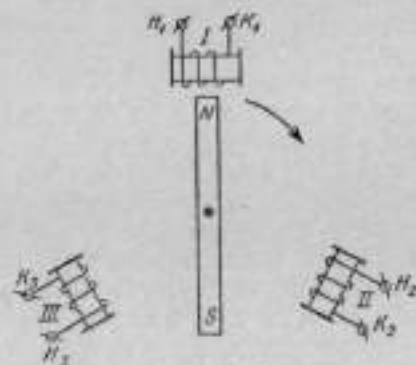


Рис. 57. Схематический чертеж модели генератора трехфазного тока.

Но при этом важно учесть, что описание процесса изменения э. д. с. будет существенно отличаться от того, какое приведено выше. Для второго из указанных положений катушек характерно следующее.

Во-первых, когда полюс индуктора расположен против середины катушки, магнитный поток в катушке равен нулю (магнитные линии „скользят“ вдоль витков катушки), скорость изменения его самая большая, э. д. с. максимальна. Когда же ось магнита окажется параллельной оси катушки (магнит из положения, указанного на рис. 57, повернется на угол в 90°), то магнитный поток в катушке будет максимальным, скорость изменения его равна нулю и э. д. с. равна нулю. Во-вторых, при приближении к данной обмотке какого-либо полюса индуктора и при удалении от нее того же полюса в обмотке возникает э. д. с. одного и того же направления, но и при прибли-

жении полюса к обмотке э. д. с. в ней увеличивается, а при удалении — уменьшается.

Например, пусть северный полюс магнита приближается слева к I катушке (рис. 57). Тогда, в соответствии с законом Ленца, на левом конце этой катушки появится северный полюс, противодействующий приближению северного полюса индуктора. (Заметим, что на правом конце катушки будет южный полюс.) Э. д. с. при этом будет возрастать и станет максимальной, когда магнит будет проходить через положение, указанное на рис. 57. При дальнейшем движении магнита северный полюс его теперь будет удаляться от I катушки. В соответствии с тем же законом Ленца, на правом конце катушки должен быть южный полюс, противодействующий удалению северного полюса индуктора. (На левом конце катушки северный полюс.) Как видим, полярность катушки не изменилась. Значит, направление э. д. с. осталось прежним, но по абсолютному значению э. д. с. уменьшается. Когда магнит из положения, указанного на рис. 57, повернется на угол в 90° , то э. д. с. в I катушке станет равной нулю. При дальнейшем вращении магнита к левому концу I катушки теперь будет приближаться южный полюс индуктора. Следовательно, на левом конце катушки появится южный полюс, т. е. направление э. д. с. при переходе через нуль изменится на противоположное, а по абсолютному значению э. д. с. возрастает. Нетрудно проследить за изменением э. д. с. и дальше.

Таким образом, взаимное положение обмоток статора и индуктора должно быть соответствующим образом учтено. Это существенно еще и потому, что конструкции самодельных моделей генераторов трехфазного тока может быть весьма различной.

Возможно изготовление модели генератора в соответствии с рис. 53. Статор — довольно толстый стальной обруч диаметром 300—350 мм. Катушки могут быть использованы от разборного трансформатора или самодельные. Провод для них №1 диаметром порядка 0,5 мм, витков — 200—250. Сердечники могут быть собраны из трансформаторной листовой стали (или из прокатанной жести). Катушки крепятся к обручу вместе с сердечниками.

Нетрудно изготовить модель генератора с расположением катушек, как это указано на рис. 57. Статор в этом случае — тоже стальной обруч (диаметр 300—350 мм,

ширина 50—60 мм, толщина 4—5 мм). Обруч сплошной или собранный из полос прокатанной жести. Катушки (длина порядка 100 мм) мотаются на картонные каркасы. Провод для катушек ПЭ диаметром около 0,5 мм, число витков 200—250. Сердечники катушек набираются из трансформаторной листовой стали или из прокатанной жести. Катушки или крепятся к обручу с внутренней его стороны (для этой цели нужно один из листов сердечника катушки делать длиннее остальных и с помощью его крепить катушку к обручу, например, заклепками), или надеваются на обруч (перед его сборкой). Можно наматывать катушки прямо на обруч, как это указано на рис. 58.

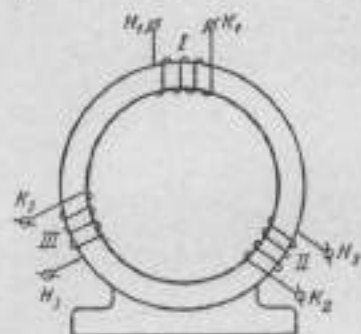


Рис. 58. Схематический чертеж одного из вариантов статора модели генератора трехфазного тока.

Проверить правильность определения начала и конца обмоток можно так, как об этом было сказано выше (с помощью гальванометра и магнита). Статор следует закрепить на устойчивом вертикальном щите. К концам тонкого провода обмотки катушек нужно припаять отрезки более толстого провода и подвести их к клеммам, расположенным на одном краю щита (это удобнее для

последующих подключений к клеммам). Около клемм полезно четко написать буквы H_1, K_1 и т. д. Провода на катушках, идущие от катушек к клеммам, следует окрасить в разные цвета. Провода от начала и конца катушек к клеммам следует вести по лицевой стороне щита. Тогда последующие опыты с генератором (например, различные способы соединения обмоток его) будут достаточно наглядны.

Во всех перечисленных выше моделях генераторов в качестве ротора (индуктора) может быть использован или постоянный линейный магнит, или самодельный электромагнит. В первом случае магнит должен быть наглухо насажен на вал, проходящий через втулку в щите. На конце вала, находящемся с тыльной стороны щита, нужна рукоятка, с помощью которой можно вращать ротор.

При изготовлении самодельного электромагнита могут быть использованы (для обмотки его) катушки из набора по электромагнетизму. Наиболее удачная форма электромагнита, указанная на рис. 53, но магнит может быть и без полюсных наконечников. Нужно следить за тем, чтобы обмотка на одной половине сердечника электромагнита служила продолжением обмотки на другой его половине, как это видно на рис. 53. Проще в изготовлении линейный электромагнит без полюсных наконечников. Обмотка его состоит из двух катушек, надетых одна на одну половину сердечника, другая — на вторую половину. Катушки могут быть самодельные. Мотаются они на картонных каркасах. Провод ПЭ диаметром 0,5 мм—0,8 мм. Витков в каждой катушке порядка 350—400. Для укрепления контактных колец из вала ротора нужно наглухо насадить круглую деревянную болванку, на которой закрепить два кольца. Наиболее просто можно получить вполне доброкачественные кольца, отпилив их поковкой от затрона для охотничьего ружья. Наиболее капризная деталь генератора — щетки. Обычно их рекомендуют делать двойными: склепанными из двух полосок — стальной и медной. Стальная — снаружи, медная — прижимается к кольцу. Если ротором служит электромагнит, а не постоянный магнит, как в данном случае, то для вала его, проходящего во втулке, вделанной в вертикальный щит, необходимо предусмотреть стойки, поддерживающие вал. Щетки крепятся к этим стойкам. От щеток по лицевой стороне щита идут провода к двум клеммам на краю щита, противоположном тому краю, на котором смонтированы клеммы, соединенные с обмотками генератора. Источники тока для питания обмотки ротора — батареи аккумуляторов. Ток — порядка 2—4 а.¹

Общий недостаток перечисленных генераторов — их малая мощность. Индикатором тока в обмотках этих генераторов могут служить только гальванометры. Возможно изготовление более мощного генератора, приводимого во вращение электрическим моторчиком. В этом случае приемниками энергии могут служить низковольтные лампочки накаливания. В качестве статора для такого

¹ Указания, нужные для изготовления моделей генераторов нескольких иной конструкции, можно найти в книге: М. А. Ушаков, Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955.

генератора может быть использован статор от асинхронного электродвигателя трехфазного тока. Ротор — самодельный электромагнит. Останавливаться здесь на вопросе об изготовлении подобного генератора нет возможности, так как указания в этом случае должны быть достаточно подробными.

Независимо от типа употребляемой модели генератора, при первом ознакомлении учащихся с трехфазным током целесообразно взять в качестве индикаторов тока гальванометры, установленные „лесенкой“. При таком их положении значительно легче и удобнее сопоставлять колебания стрелок. Сдвиг фаз легче всего обнаруживается, если одну половину шкалы каждого гальванометра закрыть (у всех одну и ту же половину — правую или левую). Так как гальванометры не расположены в одной вертикальной плоскости, а несколько смещены друг за другом, то сделать это одним листом бумаги не удастся. Лучше вырезать три листа бумаги длиной в половину шкалы, а ширины такой, чтобы этот лист вошел в щель между стеклом, закрывающим шкалу, и загибам жесткого кожуха гальванометра. Листки бумаги могут быть вставлены или вынуты очень быстро.

Упрощенная модель генератора, описанная в § 12, строго говоря, дает не вполне синусоидальный ток. Но так как школьные гальванометры не реагируют на очень слабые токи, то фактически результаты опыта не оказываются искаженными.

Не следует спешить с переходом к вычерчиванию графика трехфазного тока. В методическом отношении целесообразно сначала рассмотреть таблицу мгновенных значений э. д. с. и токов для некоторых моментов времени (см. табл. на стр. 118). По отношению к этой части урока остановимся на следующих соображениях.

За недостатком времени не следует на уроке вычислять мгновенные значения э. д. с. для всех пяти горизонтальных граф указанной таблицы. Она должна быть подготовлена заранее. (Как и всякая другая, эта таблица должна быть достаточно большой, четко выполненной, хорошо видной всем учащимся.) На уроке же достаточно на примере одного-двух вычислений показать учащимся, как эти вычисления могут быть выполнены.

Существенно предусмотреть возникающее обычно недоумение учащихся, вызванное отсутствием максимальной

э. д. с. в графах значений э. д. с. для второй и третьей обмоток.

Мгновенные значения э. д. с. (и токов), вычисленные и занесенные в таблицу, при наличии времени могут быть легко проиллюстрированы с помощью схематических чертежей, изображающих взаимное положение обмоток и индуктора. Так, для начала наших отсчетов (первая горизонтальная строка в таблице) пригоден чертеж, подобный изображенному на рис. 50. Только в этом случае он может быть еще более схематичным: могут быть изображены только остовы катушек, обмотки и присоединенные к ним гальванометры могут быть опущены. Ось магнита для этого момента времени ($t=0$) должна совпадать с осью I катушки. Опираясь на чертеж, можно объяснить, почему э. д. с. в I катушке равна нулю, почему во II катушке она одного направления (от торца этой катушки *удаляется* южный полюс), а в III — противоположного (к торцу этой катушки южный полюс *приближается*). Обосновать чертежом, почему э. д. с. в этот момент времени во II и III катушках равна $0,87 E_m$, трудно, но почему она одинакова (по абсолютному значению) в обеих катушках — ясно: южный полюс индуктора находится между торцами катушек, посредине. Для следующего момента времени ($t = \frac{1}{4} T$, вторая горизонтальная строка) нужно сделать

подобный же чертеж, но магнит на нем показать расположенным под углом в 90° к положению на предыдущем чертеже, в результате вращения магнита по часовой стрелке. Пользуясь чертежом легко проследить, как и почему э. д. с. в первой обмотке возрастает от нуля до максимума, во второй обмотке изменяется от $-0,87 E_m$ до $-E_m$, а затем до $-0,5 E_m$ и в третьей — от $0,87 E_m$ падает до нуля и дальше до $-0,5 E_m$.

Таким же образом можно проиллюстрировать изменения э. д. с. к концу второй, третьей и четвертой четвертей периода. Рассуждения совершенно аналогичны тем, какие приведены на стр. 111—113 по отношению к одной катушке, здесь же их надо применить ко всем трем катушкам одновременно.

Такое относительно подробное рассмотрение процесса генерирования трехфазного тока связано с применением довольно большого круга знаний, уже имеющих у

учащихся: явление электромагнитной индукции, закон Ленца, определение направления индукционного тока. Оно очень поучительно и полезно. К сожалению, для этой работы на уроке времени не хватает, поэтому ею целесообразно заняться факультативно с учащимися, наиболее интересующимися физикой.

Особое внимание учащихся должно быть обращено на выводы, сделанные в связи с анализом таблицы (стр. 118—119), так как они очень важны для дальнейшего.

Утверждение, что алгебраическая сумма токов в обмотках генератора равна нулю, вызывает, как правило, недоумение у учащихся. У них создается впечатление, что генератор не дает тока. Упускается из вида, что речь идет о токах в различных отдельных цепях. Если бы алгебраическая сумма сил токов, идущих в одной и той же цепи, была равна нулю, то тогда это действительно значило бы, что суммарный ток равен тоже нулю.

Вычисляя мгновенные значения э. д. с., мы считали, что обмотки вращаются в магнитном поле против часовой стрелки и так, что первая обмотка опережает вторую на 120° , а вторая на столько же опережает третью. Отсюда — угол поворота второй обмотки всегда *меньше* угла поворота первой обмотки на 120° , а угол поворота третьей обмотки *меньше*, чем первой, на 240° . Иногда считают, что третья обмотка опережает вторую, а вторая — первую. В этом случае угол поворота второй обмотки *больше*, чем у первой на 120° , а угол поворота третьей обмотки на 240° *больше*, чем первой.

Разумеется, с точки зрения принципиальной оба приема одинаково равноправны. Однако практически вторым из них лучше не пользоваться. Дело в том, что нормальным направлением вращения обмоток в магнитном поле условно считается движение их против часовой стрелки, а если обмотки неподвижны, а вращается поле, то нормальным направлением его вращения считается направление по часовой стрелке. В этом случае при условии, что обмотки нумеруются по часовой стрелке, опережающей всегда будет первая обмотка и угол поворота второй и третьей обмоток всегда будет меньше угла поворота первой. Все расчеты и вычерчивание графиков и диаграмм обычно производится с учетом этих условий. В частности, таким образом чертятся векторные диаграммы, графики э. д. с. трехфазной системы, трехфазного тока. Данные, име-

ющиеся в таблице мгновенных значений э. д. с. в § 12, получены с соблюдением этих условий. Поэтому таблица полностью соответствует графику трехфазного тока, который несколько позже мы дадим учащимся. Если мгновенные значения э. д. с. (и тока) вычислять для таблицы, считая, что опережающей является третья обмотка, то мгновенные значения э. д. с. (и тока) по абсолютному значению будут такими же, но знак их в трех случаях будет обратным (для моментов времени $t=0$, $t=\frac{2}{4}T$ и $t=\frac{4}{4}T$). В итоге данные о величине и направлении э. д. с.

и тока в такой таблице не совпадут с данными графика э. д. с. и тока, если он нормально построен.

Достаточное внимание должно быть уделено графику трехфазного тока. Учащиеся должны уметь чертить его. Поэтому график нужно вычертить во время урока на классной доске, научив и учащихся делать его. Работа на уроке в этом отношении может идти двумя путями.

1. Внимание учащихся фиксируется на доске, на которой учитель делает чертеж. Ученики пока не чертят. Выполнение чертежа сопровождается достаточно подробными объяснениями учителя тех соображений, которыми он при этом руководствуется, и указаниями на технику изготовления чертежа. После этого учащиеся чертят график в своих тетрадах, руководствуясь указаниями, сделанными учителем.

2. Ученики делают чертеж в своих тетрадах одновременно с преподавателем, выполняющим его на классной доске последовательными этапами. Элементы чертежа в тетрадах учащихся появляются в такой же последовательности. Каждый из этих путей дает возможность привить учащимся нужные графические навыки.

Отрезок оси абсцисс, изображающий в некотором масштабе промежуток времени, равный периоду э. д. с. (тока), делит на 12 равных частей. Тогда удобно будет брать отрезки, соответствующие четвертям и третям периода.

Вопрос о том, на сколько частей разделить отрезок на оси ординат, изображающий амплитудное значение э. д. с. (тока), менее важен. Удобно разделить его на 10 частей; но если деления окажутся очень мелкими, или, наоборот, масштаб будет очень крупным, можно взять

ное число частей, как это сделано, например, на рис. 54. Через точки деления на осях проводим тонкие пунктирные линии, параллельные осям. Такая „сетка“ может быть заранее нанесена на классную доску, но при наличии известных навыков она может быть сделана очень быстро „от руки“ тут же на уроке.

В „сетке“ полезно выделить (шириной) линии, отсекающие на оси абсцисс одну, две, три и четыре четверти периода и одну, две и три трети периода. Далее чертим сначала синусоиду э. д. с. (тока) в первой обмотке, наметим предварительно точки, соответствующие нулевым и положительному, и отрицательному максимальным значениям э. д. с. (две точки). Эта синусоида начинается из точки 0. Синусоиду э. д. с. (тока) во второй обмотке начинаем от точки на оси абсцисс, соответствующей концу первой трети периода. После этого достраиваем эту вторую синусоиду влево до оси ординат (см. рис. 54). В таком же порядке проводим третью синусоиду, начав ее от точки, соответствующей концу второй трети периода, достроив ее потом влево. При построении графика (до проведения каждой синусоиды) полезно, кроме точек, соответствующих максимальным и нулевым значениям э. д. с., пометить вспомогательные точки, соответствующие $0,5 E_m$ и $-0,5 E_m$, т. е. точки, в которых происходит пересечение синусоид (см. рис. 54). Кривые проводим мелкими разноцветными.

Можно чертить график, получая данные, нужные для его построения, с помощью прибора, описанного в неоднократно упоминавшейся нами книжке М. А. Ушакова.¹ Вычертив график, полезно сопоставить его с данными ранее составленной таблицы мгновенных значений э. д. с. (тока) для некоторых моментов времени и не забыть еще раз повторить применительно к графику выводы, какие были сделаны в результате анализа таблицы. Кропотливая работа с чертежом обеспечит понимание учащимися графика и поможет им овладеть нужными навыками.

Сделав график на доске, можно „продемонстрировать“ его с помощью трех „синусоид“, согнутых из толстой проволоки, окрашенной в разные цвета. „Синусоиды“

¹ М. А. Ушаков. Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955, стр. 35.

подвешиваются на тонкие гвоздики, вбитые в классную доску. Заранее же может быть подготовлена на доске и „сетка“ для этого „вещественного“ графика.

Проволочные „синусоиды“, а также картонные или фанерные шаблоны могут быть с успехом использованы во многих случаях, когда не преследуются цели привития учащимся навыков, а нужно быстро получить на доске тот или иной график.

Векторную диаграмму э. д. с. и тока трехфазной системы на уроке можно не давать.

§ 13. Соединение обмоток генератора звездой. Четырехпроводная трехфазная система

В предыдущем параграфе мы рассмотрели устройство и принцип действия генератора трехфазного тока. Как же можно передать от него ток к приемникам энергии? Рассмотрим, какими путями решается эта задача.

Каждая обмотка генератора является самостоятельным

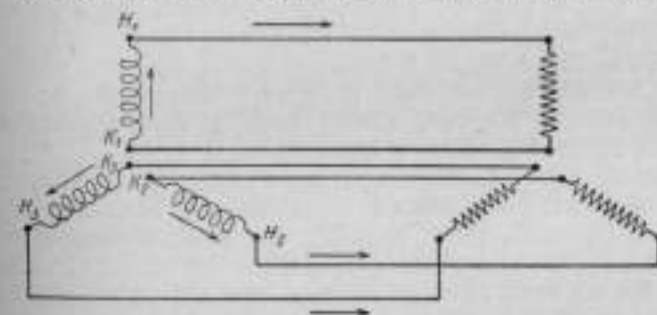


Рис. 59. Несвязанная шестипроводная трехфазная система.

источником однофазного переменного тока. За положительное направление э. д. с. в обмотках генератора условно принимается направление от конца обмотки к ее началу.

Очевидно, что к каждой обмотке могут быть подключены те или иные приемники энергии. Схема подобного соединения обмоток генератора с приемниками энергии дана на рис. 59. (На схеме указано условное положительное направление тока.) Обмотки генератора, как это уже вам известно, смещены относительно друг друга на угол в 120° . Поэтому расположение их, указанное слева на рис. 59, оправдано. Что же касается взаимного располо-

жения приемников энергии, каждый из них изображен на рис. 59 условным значком, принятым для обозначения сопротивления, указанного на рисунке; при этом следует учесть, что это сделано чисто условно, для удобства. Приборы, получающие ток, могут быть расположены как угодно.

Как видим, для передачи электрической энергии от генератора к приемникам энергии в этом случае нужно шесть проводов.

Такая совокупность электрических цепей получила название *несвязанной шестипроводной трехфазной системы*.¹

Эта система эквивалентна трем генераторам однофазного тока и не дает по сравнению с ними экономии в подводящих ток проводах. Поэтому практического применения несвязанная трехфазная система не получила.

Оказалось возможным уменьшить количество проводов, соединяющих генератор с потребителями тока, и тем самым добиться существенной экономии металла.

На схеме рис. 59 видно, что средние три провода, идущие рядом, могут быть заменены одним проводом. С этой целью следует соединить концы обмоток генератора в один общий узел и от него вести один провод к приемникам энергии; концы проводов от приемников можно тоже соединить в один узел.

Подтвердим справедливость наших предположений опытом. Соединим концы обмоток модели генератора вместе. Подобным же образом соединим в общий узел концы коротких проводников, идущих от одной из клемм каждого из трех гальванометров. Эти два узла соединим одним проводом. Начала обмоток генератора соединим проводами со вторыми клеммами каждого из гальванометров. Схема такого соединения показана на рис. 60. (На схеме указано условное положительное направление тока.) Приведем во вращение ротор генератора. Стрелки гальванометров колеблются так же, как и в случае шестипроводной системы (рис. 59).

Такая система называется *четырепроводной трехфазной системой*.

¹ Такую систему мы осуществляли, ставя опыт с моделью генератора трехфазного тока (см. рис. 59), присоединив к обмоткам его гальванометры, которые назывались приемниками энергии.

Соединение обмоток генератора, при котором концы их соединены в общий узел, называется *соединением звездой*.

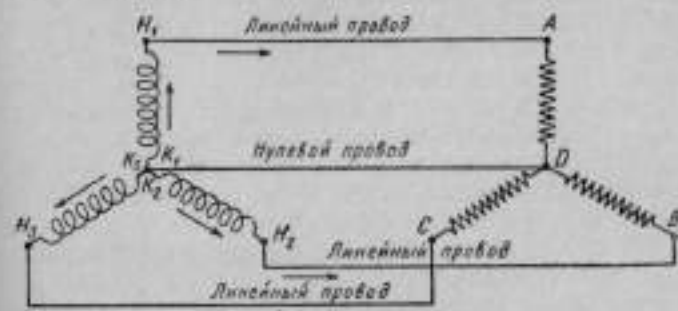


Рис. 60. Схема соединения обмоток генератора и приемников энергии звездой. (Четырепроводная трехфазная система.)

Общий узел, в который соединяются концы обмоток генератора, называется *нулевой точкой или нейтральной точкой генератора*.

Провода, присоединенные к началам обмоток генератора, называются *линейными проводами*.

Провод, присоединенный к нулевой точке, называется *нулевым или нейтральным проводом*.

Методические указания

Демонстрацию несвязанной шестипроводной системы и соединения обмоток генератора звездой (четырепроводной системы) можно осуществить с помощью любой модели генератора, в частности, с описанной в § 12 (см. рис. 50). В последнем случае в целях большей наглядности можно прибегнуть к такому приему. На вертикальном фанерном щите (размерами примерно 500 × 500 мм) краской разного цвета изображаются обмотки генератора так, как это сделано на левой стороне рис. 59. В точки H_1 , K_1 , H_2 , K_2 , H_3 , K_3 в щит ввинчиваются клеммы, к которым можно подключаться с тыльной и лицевой стороны щита. Провода от обмоток генератора присоединяются к соответствующим клеммам с тыльной стороны щита. Генератор и щит ставятся на одном конце демон-

страционного стола, на другом конце ставится второй вертикальный щит такого же размера, как и первый. На нем краской тех же цветов изображаются приемники энергии (сопротивления), как на правой стороне рис. 59. В этот щит ввинчено тоже шесть клемм. Рядом со вторым щитом ставится три гальванометра („лесенкой“), соединенные с соответствующими клеммами с тыльной стороны щита. Левый и правый щит соединяются друг с другом цветными проводами так, как это указано на рис. 59. Щиты раздвигаются так, что соединительные провода оказываются натянутыми. Вращаем ротор генератора. В приемниках энергии (в гальванометрах) обнаруживается ток. На классной доске чертится схема шестипроводной системы.

Дальше, от шестипроводной системы переходим к четырехпроводной. Снимаем три средних провода, объединяем три центральные клеммы на левом щите в один узел, то же самое делаем с центральными клеммами на правом щите и соединяем оба узла одним проводом. Вращаем ротор генератора. Стрелки гальванометров опять приходят в движение. На классной доске чертим схему четырехпроводной системы.

Щиты могут быть использованы в ряде опытов и в дальнейшем.

Существует точка зрения, состоящая в том, что не следует на схемах располагать приемники энергии так, как это указано, например, на рис. 59 и 60. Основание к тому — несоответствие схемы фактическому взаимоположению приемников энергии. Оно может вызвать у учащихся неверные представления. Нам представляется возможным, имея в виду удобства, которые обеспечиваются указанными схемами, не отказываться от них. Но при этом следует 1) четко сказать учащимся об условности такого приема и 2) показать учащимся, как на практике чертятся схемы включения приемников энергии звездой (см. § 15) и треугольником (см. § 17).

В тексте § 13 указано, что за положительное направление э. д. с. в обмотке генератора условно принимается направление от конца обмотки к ее началу. Необходимо обратить особое внимание учащихся на условность этого приема, так как в действительности э. д. с. в обмотках генератора изменяется как по абсолютному значению, так и по направлению. На рис. 59, 60, а также

на некоторых последующих указано условное положительное направление э. д. с. и тока.

Далеко не все учащиеся достаточно хорошо понимают экономическое значение уменьшения количества проводов, соединяющих генератор с приемниками энергии. Замена шести проводов четырьмя некоторым учащимся кажется

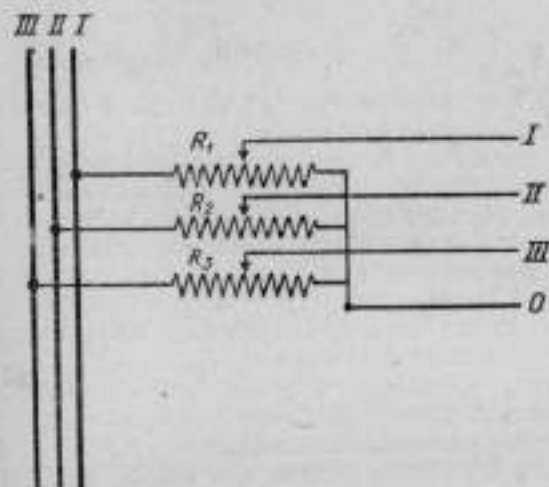


Рис. 61. Схема получения нулевого провода в трехфазной сети.

малоэффективной в экономическом отношении. Сославшись на размеры электрической сети, покрывающей нашу необъятную страну, надо вскрыть ошибочность такой точки зрения.

В изложении вопроса о способах соединения обмоток генератора и приемников энергии не следует спешить с упразднением нулевого провода. Четырехпроводная система не менее, а более широко применяется, чем трехпроводная.

Если подведенная в кабинет физики трехфазная сеть не имеет нулевого провода, то его можно получить, воспользовавшись тремя одинаковыми реостатами, включенными так, как это показано на рис. 61. Одни концы реостатов R_1 , R_2 и R_3 подсоединены к сети, а другие концы соединены в узел, от которого идет нулевой провод. Линейные провода к приемникам энергии идут от

движков-реостатов. Одновременным передвижением движков всех трех реостатов можно изменять линейное напряжение, подаваемое на нагрузку, от нуля до линейного напряжения сети.¹ Это обстоятельство учителю физики полезно учесть, так как дает возможность использовать для опытов в качестве приемников энергии и низковольтные лампочки и соответствующие вольтметры.

§ 14. Фазные и линейные напряжения

В системе трехфазного тока различают фазные и линейные напряжения и токи.

Напряжение между каждым линейным проводом и нулем называется фазным напряжением.

Напряжение между любым линейным проводом и нулем есть напряжение между началом и концом обмотки — фазы. Поэтому оно и получило такое название. Фазное напряжение обозначается U_{ϕ} .

Напряжение между линейными проводами называется линейным напряжением.

На рис. 60 видно, что линейное напряжение есть напряжение между началами двух обмоток — фаз. Линейное напряжение обозначается $U_{\text{л}}$.

По рис. 60 можно судить, что при соединении обмоток генератора звездой линейное напряжение больше фазного. В самом деле, фазное напряжение есть напряжение на одной обмотке генератора, а линейное напряжение есть разность потенциалов между потенциалом начала одной обмотки и потенциалом начала другой обмотки, причем концы этих обмоток соединены вместе. Какова же величина линейного напряжения по сравнению с фазным? Возьмем, например, первую и вторую обмотки генератора (см. рис. 60). Конец первой обмотки соединен не с началом, а с концом второй обмотки. Такое соединение обмоток генератора, являющихся источниками переменного тока, аналогично соединению одноименными полюсами источников постоянного тока (про такое соединение говорят, что источники тока соединены навстречу друг другу). Поэтому линейное напряжение равно разности напряжений на каждой из двух обмоток (т. е. разности

фазных напряжений). О какой же разности идет здесь речь? Необходимо учесть, что 1) напряжения на обеих обмотках не постоянны, а непрерывно (синусоидально) изменяются и 2) что эти напряжения сдвинуты по фазе на 120° . В связи с этим имеется в виду *разность мгновенных значений фазных напряжений*, во-первых, и разность их не арифметическая, а геометрическая. При этом мгновенные значения линейного напряжения непрерывно синусоидально изменяются, так же как и значения фазных напряжений (между ними имеется сдвиг фаз, равный 30°), и имеют одинаковую частоту. Следовательно, мгновенное значение линейного напряжения равно геометрической разности мгновенных значений фазных напряжений. Сказанное справедливо не только для мгновенных значений линейного и фазных напряжений, но и для действующего значения этих напряжений.

В итоге — *действующие значения линейных напряжений равны геометрической разности действующих значений фазных напряжений.*

Таким образом, между линейным и фазным напряжениями существует известное соотношение. Из анализа векторной диаграммы напряжений при соединении обмоток генератора звездой, а также из данных опыта вытекает, что действующее значение линейного напряжения в $\sqrt{3}$ (т. е. в 1,73) раз больше действующего значения фазного напряжения. (При этом линейное напряжение опережает фазное на 30° .)

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi} \quad U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}},$$

или

$$U_{\text{л}} = 1,73 U_{\phi} \quad U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{1,73}.$$

Зная соотношение между линейным и фазным напряжениями, всегда можно найти одно из них, если известно другое.

Решим два примера.

1) Фазное напряжение 127 в. Каково линейное напряжение?

$$U_{\text{л}} = 1,73 \cdot U_{\phi} = 1,73 \cdot 127 = 220 \text{ в.}$$

2) Фазное напряжение 220 в. Каково линейное напряжение?

$$U_{\text{л}} = 1,73 \cdot U_{\phi} = 1,73 \cdot 220 \approx 380 \text{ в.}$$

¹ См. М. А. Ушаков. Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1955.

Соответственно фазным и линейным напряжениям, различают фазные и линейные токи. Токи в обмотках генератора (или в одной из фаз приемников энергии) называются фазными. Токи в линейных проводах называются линейными. При соединении звездой и при равномерной нагрузке фаз фазные токи, будучи равными между собой, равны и токам линейным: $I_A = I_\Phi$. Ток в нулевом проводе меньше, чем в линейных.

Методические указания

Мы не знаем, как можно достаточно строго установить соотношение между линейным и фазным напряжением ($U_L = \sqrt{3} U_\Phi$), не прибегая к векторной диаграмме напряжений при соединении обмоток генератора звездой. Заниматься же на уроке разбором векторной диаграммы нет возможности. Совершенно ничего не сказать о том, как находится соотношение между U_A и U_Φ тоже нехорошо. Поэтому в § 14 кратко даны общие соображения, по которым находится это соотношение. При желании преподаватель может воспользоваться этими соображениями. Если же они кажутся малоубедительными, то остается один путь: сказать учащимся, что соотношение между фазным и линейным напряжением установлено в результате опыта.

Вопрос о линейных и фазных токах на уроке можно не касаться.

§ 15. Соединение приемников энергии звездой

Мы рассмотрели один из способов соединения обмоток генератора — соединение звездой.

Различным образом возможно и соединение приемников энергии. Одно из соединений — соединение звездой, показанное на рис. 60. На нем видно, что каждый приемник энергии (или группа приемников, изображенных на чертеже условным символическим изображением сопротивления) включен между нулевым проводом и одним из линейных.

Способ изображения соединения приемников энергии звездой, использованный на рис. 60, обычно применяют в учебных схемах. В практической деятельности схему соединения приемников энергии звездой (при четырехпроводной трехфазной системе) чертят так, как это показано

на рис. 62. Левая группа ламп включена между нулевым проводом и первым линейным, средняя группа ламп — между нулевым проводом и вторым линейным, и правая группа ламп — между нулевым проводом и третьим линейным.

Все группы приемников находятся под напряжением, равным фазному напряжению.

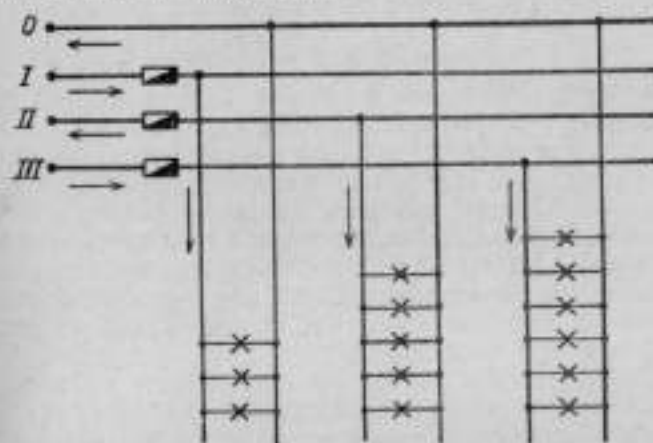


Рис. 62. Схема соединения приемников энергии звездой при четырехпроводной трехфазной системе.

Нулевой провод имеет большое значение. Благодаря ему напряжение на фазах приемников сохраняется постоянным и равным напряжению на соответствующих фазах генератора. Это условие сохраняется и в том случае, если нагрузка фаз изменится. Поэтому приемники энергии все время находятся под одним и тем же напряжением. Если нагрузка фаз неодинакова, а нулевой провод в силу каких-либо причин окажется оборванным, то напряжения на фазах приемников станут различными. На фазе с меньшим сопротивлением напряжение уменьшится, на других увеличится по сравнению с нормальным. Режим работы приемников энергии изменится. Поэтому в нулевой провод не ставят ни предохранителей, ни выключателей.

Из рис. 60 видно, что ток в линейных проводах такой же, как и в соответствующих фазах генератора и приемников. Ток в нулевом проводе меньше, чем в линейных.

Четырехпроводную систему применяют в осветительной сети, т. е. для подводки тока в жилые дома. В здание вводятся четыре провода: нулевой и три линейных. От ввода по одной части комнат ведут нулевой провод и первый линейный, по другой части комнат — нулевой и второй линейный, а по третьей части комнат — нулевой и третий линейный. К каждой паре проводов подключаются нужные приемники энергии: лампы, плитки и др.

Методические указания

В городских школах в кабинет физики должны быть подведены три линейных провода и нулевой. Следует показать эту подводку учащимся (можно протянуть от нее четыре провода над демонстрационным столом) и с помощью вольтметра измерить фазные и линейные напряжения. (Для городской осветительной сети соответственно 127 и 220 в.) В случае отсутствия пригодного вольтметра в качестве индикатора напряжения можно воспользоваться лампой накаливания на 220 в. О напряжении судим по степени накала нити лампы.

Очень полезен демонстрационный щит, на котором смонтированы лампы накаливания, соединенные звездой. Щит монтируется по схеме рис. 62 с такими к нему добавлениями. На концах проводов $0, I, II, III$ ставятся клеммы для подключения щита к осветительной сети (см. левую часть рис. 69). В каждом из проводов ставится рубильник. В каждой фазе приемников в одном проводе ставится рубильник, а в другом устраивается разрыв, в котором монтируются два гнезда (или две клеммы). Для замыкания и размыкания цепей тока лучше на щите монтировать рубильники, а не выключатели, так как при наличии рубильников ясно видно, замкнута ли цепь или разомкнута. К гнездам или клеммам присоединяется амперметр, когда нужно измерить ток в фазе. В другое время разрыв закорачивается куском провода. Такой же разрыв с гнездами или с клеммами устраивается и в нулевом проводе до первой фазы приемников (см. левую часть рис. 69). В каждой фазе приемников достаточно двух ламп. К щиту нужен набор ламп по 40 и 60 вт на напряжение 127 и 220 в.

Щит используется вами и в дальнейшем, а сейчас, в связи с § 15, учащимся может быть показано следующее: 1) измеряем вольтметром фазные напряжения (между клем-

мами $0-I, 0-II, 0-III$) и линейные (между клеммами $I-II, II-III, I-III$); 2) демонстрируем постоянство напряжения при разных нагрузках фаз, изменяя число ламп в разных фазах и беря лампы разной мощности; 3) сохраняя разную нагрузку фаз, отключаем нулевой провод и наблюдаем нарушение режима ламп и 4) при разной нагрузке фаз измеряем ток в фазах и в нулевом проводе (в последнем он меньше).

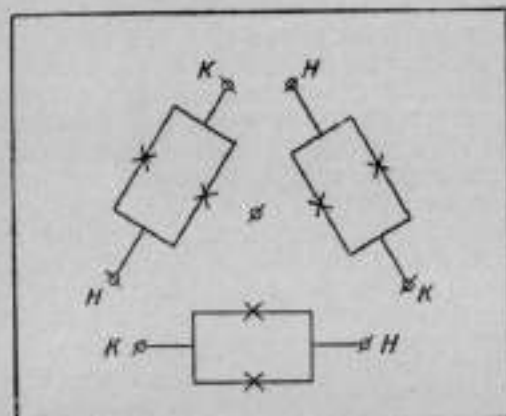


Рис. 63. Схема щита для демонстрации соединения приемников энергии звездой и треугольником.

На данном уроке пока не следует демонстрировать, что при равной нагрузке фаз ток в нулевом проводе равен нулю. К этому вопросу целесообразно перейти немного позже.

Вместо описанного щита можно изготовить другой, пригодный для соединения ламп звездой и треугольником (рис. 63). Соединив три клеммы, обозначенные буквой K , с центральной клеммой, получаем соединение ламп звездой. Центральная клемма щита подключается к нулевому проводу осветительной сети, а клеммы, помеченные буквой H , — к линейным проводам. Далее ставим те же демонстрации, что и с предыдущим щитом, включая в необходимых случаях в соответствующую цепь амперметр.

Разумеется, и в этом щите могут быть предусмотрены выключатели и гнезда для амперметра.

§ 16. Трехпроводная трехфазная система при соединении обмоток генератора звездой

В несвязанной трехфазной системе генератор соединен с приемниками энергии шестью проводами, в четырехпроводной, при соединении обмоток генератора звездой, — четырьмя проводами. Нельзя ли добиться еще большей экономии проводов? Оказывается, что в известных условиях можно.

Выше (в § 12) было установлено, что в трехфазной системе алгебраическая сумма э. д. с. в трех фазах в любой момент времени равна нулю. При одинаковой нагрузке фаз алгебраическая сумма токов в трех фазах в любой момент времени тоже равна нулю. Это положение было установлено нами дважды: в результате анализа таблицы мгновенных значений э. д. с. (и токов) и в результате анализа графика трехфазного тока. К тому же выводу приводит и векторные диаграммы э. д. с. и токов в четырехпроводной системе.

И наконец, можно доказать справедливость этого положения математическим путем, найдя алгебраическую сумму токов по всем трех фазам для любого момента времени.

Ток в каждой из фаз, как мы знаем, может быть выражен следующим образом.

$$I_1 = I_a \cdot \sin \alpha.$$

$$I_2 = I_a \cdot \sin (\alpha - 120^\circ).$$

$$I_3 = I_a \cdot \sin (\alpha - 240^\circ).$$

Сложим ток во второй и третьей фазах, а потом прибавим ток в первой фазе.

$$\begin{aligned} I_2 + I_3 &= I_a \cdot \sin (\alpha - 120^\circ) + I_a \cdot \sin (\alpha - 240^\circ) = \\ &= I_a [\sin (\alpha - 120^\circ) + \sin (\alpha - 240^\circ)] = \\ &= I_a \cdot 2 \sin \frac{\alpha - 120^\circ + \alpha - 240^\circ}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - 120^\circ - \alpha + 240^\circ}{2} = \\ &= I_a \cdot 2 \sin (\alpha - 180^\circ) \cdot \cos 60^\circ = I_a \cdot 2 (-\sin \alpha) \frac{1}{2} = \\ &= -I_a \cdot \sin \alpha. \end{aligned}$$

К сумме токов в двух фазах добавим ток в первой фазе.

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_a (\sin \alpha - \sin \alpha) = 0.$$

Как видим, алгебраическая сумма токов равна нулю.

Убедимся в справедливости сделанного вывода на опыте.

Соединим обмотки упрощенной модели генератора, которой мы уже пользовались (см. § 12), и приемники энергии (гальванометры) звездой так, как это показано на рис. 60. Приведем во вращение ротор (магнит) модели. Все три гальванометра обнаруживают ток. Прекратим вращение магнита, включим в нулевой провод гальванометр (такой же, как и три остальных) и вновь приведем во вращение магнит.

Гальванометры — приемники энергии снова обнаружат



Рис. 64. Схема соединения обмоток генератора и приемников энергии звездой при трехпроводной системе.

ток, в нулевом же проводе тока нет (стрелка гальванометра на нуле).

Таким образом, если при равной нагрузке фаз в нулевом проводе тока нет, то очевидно, что в этом случае нулевой провод может быть изъят. Так количество проводов, соединяющих генератор с приемниками энергии, может быть уменьшено еще на один. Эту систему называют трехпроводной системой трехфазного тока при соединении обмоток генератора звездой (рис. 64).

Когда же применяют четырехпроводную и когда трехпроводную систему?

Вспомним, что для четырехпроводной системы характерно следующее.

1. Если нагрузка фаз не одинакова, то ток в нулевом проводе не равен нулю.

2. Благодаря нулевому проводу, напряжения на приемниках остаются постоянными при любых нагрузках фаз.

Отсюда вытекает, что четырехпроводную систему необходимо применять тогда, когда нагрузка фаз приемников меняется. Такие условия имеют место в осветительной сети. (Количество включенных ламп накаливания, электрических плиток, утюгов, радиоприемников и других бытовых приборов изменяется.) Поэтому четырехпроводную систему употребляют в осветительной сети.

Трехпроводную систему можно применить в случае равномерной нагрузки фаз приемников энергии. Такие условия имеют место в случае питания током электродвигателей трехфазного тока. Как мы дальше увидим, электродвигатели трехфазного тока имеют три обмотки одинакового сопротивления. Эти обмотки могут быть соединены звездой¹ и подключены к трем проводам, идущим от генератора. (С этой целью одни концы обмоток двигателя соединяются в общий узел, а другие три конца подключаются к линейным проводам.) Ясно, что нагрузка фаз приемников в этом случае будет одинаковой.

Поэтому трехпроводную систему употребляют в силовых установках — для подвода тока к электродвигателям трехфазного тока.

Методические указания

За недостатком времени математическое доказательство того, что алгебраическая сумма токов в трех фазах в любой момент времени равна нулю, на уроке может полностью не приводиться. Достаточно, написав на классной доске формулы

$$I_1 = I_n \cdot \sin \alpha,$$

$$I_2 = I_n \cdot \sin (\alpha - 120^\circ),$$

$$I_3 = I_n \cdot \sin (\alpha - 240^\circ),$$

сказать учащимся, что, разлагая синусы разности и заменив аргументы, можно доказать, что $I_1 + I_2 + I_3 = 0$. Математические выкладки можно предложить учащимся произвести дома.

Если желательно показать учащимся, как производится подобного рода расчеты, то можно остановиться на частном

¹ Обмотки двигателя могут быть соединены и иначе — треугольником, о чем идет речь в § 17.

случае, когда угол поворота первой обмотки $\alpha = 90^\circ$. Тогда:

$$\Sigma I = I_1 + I_2 + I_3 = I_n \cdot \sin 90^\circ + I_n \cdot \sin (-30^\circ) + I_n \cdot \sin (-150^\circ) = I_n - 0,5I_n - 0,5I_n = 0.$$

Разумеется, как расчеты, приведенные в тексте § 16, так и только что сделанные, могут вестись из предположения, что опережающей является третья обмотка, а углы поворота, следовательно, будут равны α , $\alpha + 120^\circ$ и $\alpha + 240^\circ$. Результат будет тот же, а именно $\Sigma I = 0$, но по причинам, указанным выше (см. указания к § 12), лучше от этого варианта отказаться.

Опытное подтверждение того, что ток в нулевом проводе равен нулю, осуществляем с помощью любой действующей модели генератора. Помимо этого, желательно такую же демонстрацию поставить с одним из щитов (по рис. 62 или 63), описанных в указаниях к предыдущему параграфу. С этой целью ввинчиваем в щит лампы одинакового сопротивления, подключаем щит к четырехпроводной осветительной сети и в нулевой провод включаем амперметр (для переменного тока). Обнаруживаем, что лампы горят, а тока в нулевом проводе нет.

Вопрос о том, когда применяется четырехпроводная система, а когда трехпроводная, принадлежит к числу таких, которые особенно ярко иллюстрируют связь физики с техникой. Поэтому он заслуживает особого внимания и должен быть достаточно четко разобран на уроке. Времени на это уходит очень немного, так как теоретическая база, нужная для понимания сути дела, у учащихся уже создана. Остается только очень кратко сказать учащимся о том, что при включении в сеть электродвигателя сопротивление фаз приемника энергии (в данном случае — электродвигателя) оказывается одинаковым. Дальше, при изучении устройства и принципа действия асинхронного электродвигателя, это обстоятельство будет соответствующим образом подтверждено.

Теоретические рассуждения по поводу того, какую систему когда следует применить, можно еще раз проиллюстрировать с помощью одного из щитов, описанных в методических указаниях к предыдущему параграфу. Опыт можно вести в следующем порядке. В каждую фазу приемников энергии на щите ввинчиваем по одной лампе одинакового сопротивления. Нулевой провод включен.

Подъем на щит ток. Лампы горят нормально. Вывинтим две любые лампы, третья горит нормально.

Ввинтим снова три лампы. Изменим нагрузку в одной из фаз, ввинтив параллельно имеющейся лампе еще одну. Режим других ламп не изменится.

Далее, оставив в каждой фазе опять по одной лампе одинакового сопротивления, выключим нулевой провод. Лампы горят нормально. Изменяем нагрузку в одной из фаз (ввинтив параллельно имеющейся лампе еще одну). Накал ламп в этой фазе уменьшается (сопротивление этой фазы становится меньше), а накал двух других ламп увеличивается. Происходит перераспределение напряжений.

Опыт показывает, что учащиеся неизменно интересуют вопросы о величине и направлении тока в линейных проводах и о том, как замыкается цепь тока, идущего через каждый из приемников энергии при соединении их звездой. Рассмотрение этих вопросов связано с большими трудностями, вытекающими из того, что в данном случае мы имеем дело с током переменным, а не постоянным. Так как указанные вопросы, как правило, вызывают большой интерес у учащихся и так как они имеют большое практическое значение, посмотрим, каким образом можно помочь учащимся понять хотя бы в общих чертах суть дела.

Прежде всего: что можно сказать о направлении тока в линейных проводах? Выше (см. § 13 и методические указания к нему) было указано, что положительное направление *э. д. с.* в обмотках генератора устанавливается чисто условно. Трехфазный переменный ток подводится к приемникам энергии и отводится от них к генератору по всем трем проводам. Ток в каждом проводе изменяется синусоидально, следовательно, непрерывно изменяется по величине и дважды за период по направлению. При переходе тока через нулевое значение тока в проводе нет. Так как токи сдвинуты по фазе на 120° , то мгновенные значения их в трех проводах по времени не совпадают. Поясним эту мысль по схеме рис. 65. На правой части рисунка схематично показаны обмотки генератора трехфазного тока, левее изображены синусоиды тока в каждом из трех проводов, по которым подается ток к потребителям энергии. Как видно из графика в начальный момент времени, ток в *I* проводе равен нулю, в этот же момент времени во *II* проводе он отрицателен (имеет одно

какое-то направление), а в *III* — положителен (противоположного направления). В следующий момент времени, при угле поворота обмоток генератора в магнитном поле на 60° , ток в *I* проводе положителен, во *II* — отрицателен, а в *III* равен нулю. При повороте обмоток еще на 60° ток в *I* проводе положительный, во *II* — равен нулю, а в *III* — отрицательный, и т. д. Таким образом можно по графику проследить за тем, как изменяется мгновенное

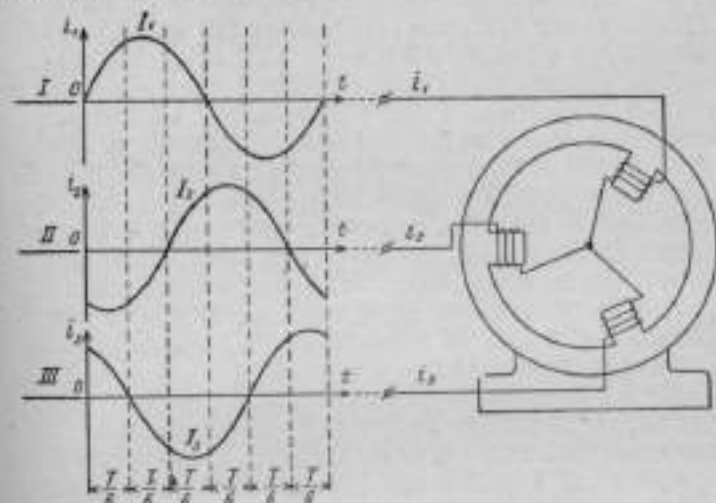


Рис. 65. Схема для определения направления тока в линейных проводах трехпроводной системы.

значение тока в проводке не только по направлению, но и по величине.

Во взятые нами моменты времени в одном из проводов ток равен нулю, а в двух других равен по абсолютному значению, но противоположен по направлению. Если взять другие моменты времени (например, наступающие через угол поворота на 30°), — ток будет одновременно во всех трех проводах, но если в одном проводе он имеет одно какое-то направление, — в каждом из двух других он будет вдвое меньше и противоположен по направлению.

Как замыкается цепь тока, идущего через каждый из приемников энергии, соединенных звездой, удобно проследить по схеме рис. 66. Выводы, к которым мы придем,

будем проверять на опыте, пользуясь щитом по схеме рис. 62 или 63. Винтиком в каждую фазу приемников тока из щита по одной одинакового сопротивления лампе на 127 в. Ток, идущий от первой обмотки (K_1H_1), может идти в лампу AD по пути H_1ADK_1 , от второй обмотки — в лампу BD по пути H_2BDK_2 , от третьей обмотки — в лампу CD по пути H_3CDK_3 . Для проверки выключим лампу AD . Две остальные продолжают нормально гореть. То же самое происходит, если выключить лампу DB или CD . Выключим две лампы (например, DB и CD), — третья продолжает нормально гореть.

Если нулевой провод отсутствует (трехпроводная система), то цепь тока, идущего через лампу AD (см. рис. 64), замыкается через ветви DB и DC ; цепь тока, идущего через лампу BD , замыкается через ветви DC и DA , а цепь тока, идущего через лампу CD , замыкается через ветви DB и DA . Отключим из щита нулевой провод. Выключим лампу DB . Две остальные горят, но менее ярко. То же самое произойдет, если выключить какую-либо другую из трех ламп. Если выключить две лампы, например, DB и DC , то цепь лампы AD окажется разомкнутой, лампа не горит.

Держа по-прежнему нулевой провод отключенным от генератора, вывинтим лампу AD и **закоротим** ветвь AD (короткое замыкание в первой фазе). Две других лампы окажутся под напряжением 220 в. каждая. Действительно, лампы очень ярко горят.

Вывинтим лампу AD (обрыв первой фазы). Обе оставшиеся лампы окажутся под напряжением 220 в. В этом случае напряжение в 220 в. придется на обе лампы, соединенные последовательно. Нити ламп кажутся меньше нормального. (Ток в каждой лампе несколько меньше, чем при отсутствии разрыва в первой фазе.)

Так можно помочь учащимся разобраться в цепях тока в четырехпроводной и трехпроводной системах.

§ 17. Соединение обмоток генератора и приемников энергии треугольником

Рассматривая несвязанную шестипроводную систему, схема которой дана на рис. 59, мы обнаружили, что три провода, идущих рядом, могут быть заменены одним. Представим себе обмотки генератора, которые по-преж-

нему смещены относительно друг друга на 120° , расположенными так, как это показано на рис. 66. Если обмотки генератора не соединять друг с другом, а прямо подключать их к приемникам энергии, то получится несвязанная шестипроводная трехфазная система, аналогичная той, с какой мы уже встречались (см. рис. 59). Но на рис. 66 видно, что можно конец первой обмотки соединить с началом второй обмотки, конец второй — с началом

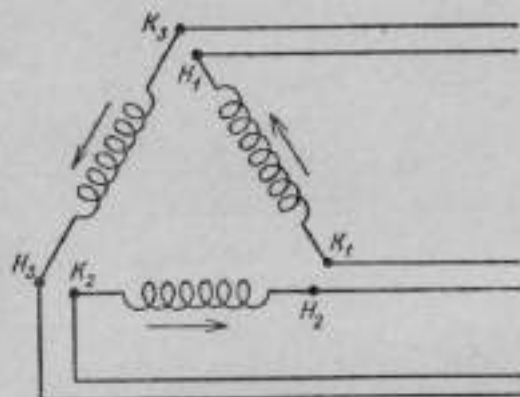


Рис. 66. Схема, поясняющая возможность соединения обмоток генератора треугольником.

третьей, а конец третьей обмотки с началом первой. От каждой из этих трех точек (называющихся началами обмоток) могут идти не два провода, а один. Таким образом от генератора пойдут три линейных провода к приемникам энергии. Такое соединение обмоток генератора называют **соединением треугольником**. Подобным же образом могут быть соединены между собой и приемники энергии. Схема соединения обмоток генератора и приемников энергии треугольником показана на рис. 67. (Стрелками указано условное положительное направление тока.)

Вспользуемся упрощенной моделью генератора трехфазного тока, описанной в § 12. Соединим катушки ее треугольником, так же как и приемники энергии — гальванометры. Приведем магнит генератора во вращение. Каждый из гальванометров обнаружит переменный ток.

При соединении обмоток генератора треугольником обмотки образуют замкнутый контур. Алгебраическая

сумма э. д. с. в контуре равна нулю. Это существенно, так как в противном случае и при работе генератора на холостом ходу в обмотках его возникла бы значительный ток, вызывающий нагрев генератора.

На рис. 67 видно, что каждая пара линейных проводов оказывается соединенной с началом и концом одной



Рис. 67. Схема соединения обмоток генератора и приемника энергии треугольником.

из фаз генератора. Поэтому при соединении обмоток генератора треугольником линейное напряжение является и фазным напряжением. Следовательно,

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$$

При соединении обмоток генератора звездой (§ 14) линейное напряжение больше фазного. Кроме того, в этом случае (при трехпроводной системе) при изменении нагрузки фаз, т. е. при изменении сопротивления приемников энергии, фазные напряжения изменяются.

В случае соединения обмоток генератора треугольником фазные напряжения не зависят от нагрузки фаз.

На рис. 67 видно, что при соединении приемников энергии треугольником от каждого линейного провода одновременно питаются током две фазы потребителей. Отсюда ясно, что линейный ток больше тока фазного. Теория и опыт показывают, что линейные токи больше фазных в $\sqrt{3}$ раз, т. е.,

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}$$

или

$$I_{\text{л}} = 1,73 I_{\text{ф}}$$

В связи с тем, что при соединении треугольником фазные напряжения не зависят от нагрузки фаз, соединение треугольником применяется как для осветительной сети, так и для силовой (т. е. для питания электродвигателей трехфазного тока).

При соединении приемников энергии треугольником (так же, как и при соединении звездой) взаимное расположение их может быть каким угодно. На рис. 67 видно,

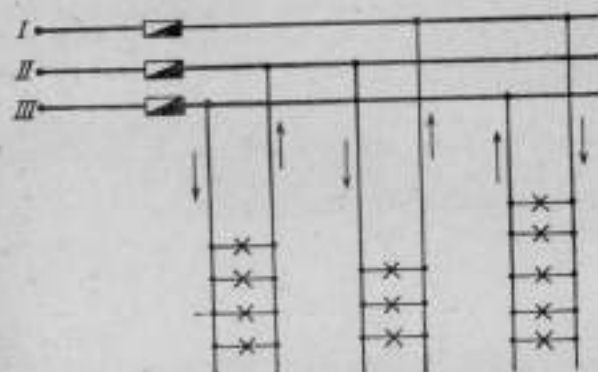


Рис. 68. Схема соединения приемников энергии треугольником.

что приемники энергии включены между первым и вторым линейным проводом, между вторым и третьим и между первым и третьим. Схема соединения приемников энергии треугольником изображается обычно так, как это показано на рис. 68.

Итак, мы познакомились со способами соединения обмоток генератора и приемников энергии. В случае соединения обмоток генератора звездой при трехпроводной системе и при соединении их треугольником к приемникам энергии идут три линейных провода. Приемники энергии могут быть подключены к линейным проводам звездой или треугольником.

У нас в Советском Союзе для сетей трехфазного переменного тока приняты стандартные линейные напряжения 127, 220 и 380 в. Напряжение 127 и 220 в применяется для осветительной сети, а напряжение 220 и 380 в для силовой сети (для питания электродвигателей, а также электрических печей, сварочных аппаратов). Указанные

стандартные линейные напряжения выбраны так, что каждое последующее из них больше предыдущего в $\sqrt{3}$ раз. Это обстоятельство имеет большое практическое значение, позволяя включать приемники энергии, рассчитанные на одно напряжение, в сеть с другим напряжением.

Так например, лампы накаливания, рассчитанные на напряжение 127 в, при включении их в сеть с линейным напряжением 127 в должны быть соединены треугольником, так как при таком соединении линейное напряжение равно фазному и лампы окажутся под нужным для них напряжением.

Однако те же лампы, рассчитанные на напряжение 127 в, могут быть включены в сеть с линейным напряжением 220 в, но в этом случае они должны быть соединены звездой. Так как при соединении звездой фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного (см. § 14), то

$$U_{\phi} = \frac{U_{\Sigma}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ в.}$$

Лампы опять окажутся под нужным напряжением.

Дальше мы увидим, что указанные линейные напряжения чрезвычайно удобны и для включения в сети с разным линейным напряжением электродвигателей трехфазного тока.

Заметим, что в только что рассмотренных нами трехпроводных системах напряжение между любой парой проводов одинаковое (127, 220 или 380 в). Соединение обмоток генератора звездой с нулевым проводом имеет то преимущество, что дает возможность легко получать два разных напряжения: 127 и 220 в или 222 и 380 в.

Методические указания

Демонстрацию соединения обмоток генератора и приемников энергии (гальванометров) треугольником можно поставить с помощью демонстрационных щитов, подобных тем, какими мы пользовались, показывая соединение звездой (см. Методические указания к § 13). Разумеется, на щите, к которому присоединяется генератор, должны быть изображены обмотки генератора, соединенные треугольником (см. левую часть рис. 67), так же как и со-

противления, изображенные на втором щите (см. правую часть рис. 67). И тут целесообразно для изображения обмоток генератора и приемников энергии использовать краску трех разных цветов.

Помимо этого, полезно продемонстрировать включение в осветительную сеть ламп накаливания, соединенных треугольником. Для этой цели нетрудно смонтировать вертикальный щит (удобно — из толстой фанеры) по схеме рис. 68 с такими к нему добавлениями. На концах проводов I, II, III поставить клеммы для подключения щита к осветительной сети. В каждом из линейных проводов поставить рубильник и, кроме того, сделать разрыв, присоединив концы проводов к гнездам или клеммам. К ним присоединяется амперметр, когда нужно измерить ток в линейном проводе. В другое время разрыв закорачивается. В каждой фазе приемников в одном проводе поставить рубильник, а в другом сделать разрыв, присоединив концы проводов к гнездам или к клеммам. К этим гнездам (или клеммам) присоединяется амперметр, когда нужно измерить ток в фазе. В другое время разрыв закорачивается. В каждой фазе приемников достаточно двух ламп. При фазном напряжении в осветительной сети 127 в (так называемое „городское“ напряжение) линейное напряжение будет 220 в. Поэтому к щиту нужны лампы на 220 в разной мощности.

Этот щит может быть объединен со щитом для демонстрации соединения приемников энергии звездой (см. Методические указания к § 15). Схема такого общего щита дана на рис. 69. Вместо этого щита может быть использован щит по схеме рис. 63.

Пользуясь каким-либо из указанных щитов, показываем учащимся, что фазное напряжение при соединении треугольником не зависит от нагрузки фаз. С этой целью, винтит, например, в правую часть щита, изображенного на рис. 69, три лампы одинаковой мощности (по одной в каждую фазу) и заминая соответствующие рубильники, измеряем вольтметром напряжение между проводом I и II, между II и III и между III и I. Затем в одну из фаз винчиваем вторую лампу. Снова измеряем напряжения. Они остаются прежними.

О соотношении между фазными и линейными токами на уроке можно не говорить. Если же разговор на эту тему возникает, то полезно учесть следующее.

Учащиеся, распространяя представление о цепях постоянного тока на цепь трехфазного переменного тока, склонны считать, что ток в линейном проводе равен сумме токов в тех двух фазах, с которыми соединен данный линейный провод (см. рис. 67). При этом упускается из виду, что в фазах приемников тока переменные и сдвинуты по фазе относительно друг друга. Ток в линейном проводе равен геометрической разности токов тех фаз, которые соединены с данным проводом (при равномерной нагрузке фаз). Пользуясь одним из упомянутых выше щитов, можно

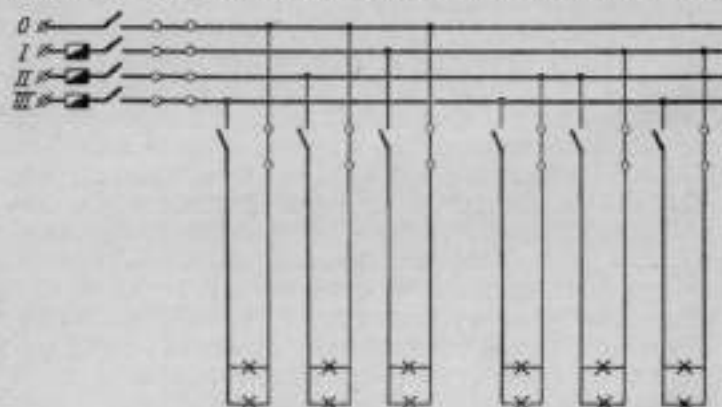


Рис. 69. Схема щита для демонстрации соединения приемников энергии звездой и треугольником.

показать учащимся, что линейные токи больше (по абсолютной величине) фазных токов. Для этого, ввинтив одинаковые лампы в правую часть щита, изображенного на рис. 69, и замкнув соответствующие рубильники, измерим ток в каждой фазе и в каждом линейном проводе. Подсчетом можно убедиться, что ток в каждом линейном проводе больше тока в каждой фазе приемников в $\sqrt{3}$ раз, т. е. в 1,73 раза.

И в этих случаях, так же как при соединении звездой, может возникнуть вопрос о том, как замыкается цепь тока, идущего через каждый приемник энергии (лампу). По этому поводу можно сказать следующее.

1. Каждая из фаз приемников соединена с одной из фаз генератора. Поэтому каждая лампа может гореть независимо от других. Проверим (удобен щит, изображен-

ный на рис. 63). Выключаем, например, лампу *AB* (см. рис. 67). Остальные горят нормально. То же самое имеет место, если вывинтить какую-либо другую лампу.

2. Выключаем провод *I* (перегорел предохранитель, обрыв провода первого сверху на рис. 67). Лампа *CB* (рис. 66) горит нормально, лампы *AB* и *AC* горят тускло. На рис. 67 (точно так же и на правой части рис. 69) достаточно отчетливо видно, что лампа *CB* находится под напряжением 220 в, под таким же напряжением находится лампы *AC* и *AB*, но они оказываются соединенными последовательно. Если выключить провод *II* (второй сверху на рис. 67), то лампа *AC* горит нормально, две других тускло. Выключен третий провод — нормально горит лампа *AB*, а две другие тускло.

3. Закорачивание одной из фаз вызовет обычные последствия короткого замыкания.

Заключительный материал § 17 небольшой по объему, но имеет большое практическое значение, поэтому его не следует обходить молчанием. Помимо того, вопросы о том, почему «городское» напряжение 127 в, а не 125 или 130, а «загородное» 220 в, неизбежно возникают у учащихся. На них необходимо дать краткие ответы. Приведенный в конце параграфа пример включения ламп, рассчитанных на 127 в, в осветительную сеть с различными напряжениями ценен в том же отношении.

Соединение обмоток генератора и приемников энергии звездой или треугольником в целях получения нужного напряжения очень хорошо иллюстрируется следующей демонстрацией. Воспользуемся какой-либо моделью генератора трехфазного тока, например, той простейшей, какую мы до сих пор имели в виду для демонстрации на уроках (см. рис. 50), и вспомогательными щитами с изображением обмоток генератора и приемников энергии (см. Методические указания к § 13 и 17). Соединим катушки генератора треугольником (и подсоединим их к соответствующим клеммам с тыльной стороны щита, на котором изображены обмотки генератора, соединенные треугольником). Точно так же поступим с гальванометром, играющим роль приемников энергии: тоже соединим их треугольником и подключаем к соответствующим клеммам (с тыльной стороны) щита, на котором изображены сопротивления, соединенные треугольником. Щиты ставим на некотором расстоянии один от другого и клеммы

их с лицевой стороны щитов соединяем проводами. Получаем соединение по схеме рис. 67. Демонстрацию ведем в следующей последовательности.

1. В модели генератора приводим во вращение магнит и замечаем амплитуду колебаний стрелок гальванометров.

2. Соединяем обмотки (катушки) генератора звездой. Заменяем прежний щит другим, на котором изображено соединение обмоток генератора звездой. Гальванометры оставляем соединенными треугольником. Заставляем вращаться магнит примерно с такой же скоростью, как в первом случае. Амплитуда колебаний стрелок гальванометров в этом случае больше.

3. Приемники энергии (гальванометры) соединяем тоже звездой. Прежний щит заменяем новым. (Получаем соединение по схеме рис. 64.) Приводим во вращение магнит (примерно с такой же скоростью). Амплитуда колебаний стрелок такая же, как в первом случае.

§ 18. Генератор трехфазного тока

В процессе изучения трехфазного тока мы ознакомились с принципом действия генератора трехфазного тока. Теперь очень кратко остановимся на устройстве его. В устройстве генератора трехфазного тока много общего с генератором однофазного переменного тока, рассмотренным нами в § 5. Основными частями генератора трехфазного тока (так же как и генератора однофазного переменного тока) являются: индуктор, создающий магнитное поле, и якорь, в обмотке которого индуцируется э. д. с. Подвижной частью генератора может быть или индуктор, или якорь. В генераторах трехфазного тока малой мощности неподвижной частью (статором) является индуктор. Он состоит из станины с некоторым числом полюсов (чаще всего с четырьмя полюсами), на которых укреплены обмотки возбуждения (см. рис. 18). Для питания постоянным током обмоток возбуждения (обмоток электромагнита) употребляют или небольшой генератор постоянного тока, якорь которого насажен на вал генератора трехфазного тока, или батарею аккумуляторов. В последнее время для питания обмоток возбуждения используют ток, даваемый самим генератором, предварительно выпрямив его с помощью полупроводникового

выпрямителя. Между полюсами статора вращается якорь. Он представляет собою цилиндр, набранный из изолированных друг от друга листов стали и укрепленный на валу генератора. В пазах якоря укладываются три обмотки. Обмотки якоря генераторов однофазного и трехфазного тока различаются между собой. В генераторе трехфазного тока обмотки в якорь так расположены одна относительно другой, что между э. д. с., возникающими в них, получается сдвиг фаз в 120° или по времени на $1/3$ периода. Обмотки (фазы) генератора соединяются звездой или треугольником. Начало обмоток и нулевая точка (при соединении звездой) или три узловые точки (при соединении треугольником) соединяются проводами соответственно с четырьмя или тремя изолированными кольцами, насаженными на вал генератора. Посредством щеток, прижимающихся к кольцам, обмотки генератора соединяются с внешней цепью. Поскольку на рис. 18 и 19 не указаны особенности обмотки якоря, эти рисунки можно рассматривать как схематические чертежи генератора трехфазного тока с вращающимся якорем.

Так же, как и генераторы однофазного тока, генераторы трехфазного тока в большинстве случаев строятся с неподвижным якорем и вращающимся индуктором. Цель та же: избежать вывода мощных токов посредством скользящего контакта (обгорание и выход из строя колец и щеток). По причинам, указанным выше, рис. 20 может рассматриваться как схематический чертеж генератора трехфазного тока с неподвижным якорем и вращающимся индуктором. Статор представляет собой станину (см. рис. 20), внутри которой укреплен цилиндрическая часть, набранная из изолированных друг от друга стальных листов, представляющая собою тело якоря. В пазах на внутренней поверхности этой части уложены обмотки (фазы) генератора, соответствующим образом расположенные относительно друг друга. Обмотки генератора соединяются звездой или треугольником и выводятся к зажимам щитка, укрепленного на наружной части статора.

Ротор генератора представляет собой вращающийся электромагнит. Обмотки возбуждения крепятся на полюсах ротора. Концы обмотки возбуждения пришиваются к двум изолированным кольцам, насаженным на вал

ротора. К щеткам, прижимающимся к кольцам, подводится ток от источника постоянного тока.

Если генератор имеет одну пару полюсов, то частота переменного тока равна числу оборотов ротора в 1 секунду, или $\frac{n}{60}$, где n — число оборотов в минуту. Если генератор имеет p пар полюсов, а ротор делает n оборотов в минуту, то частота тока

$$f = p \frac{n}{60},$$

а число оборотов ротора в минуту

$$n = \frac{60 f}{p}.$$

Как уже указывалось, генераторы, дающие переменный ток, частота которого пропорциональна частоте вращения ротора, называются синхронными.

Для приведения ротора генератора во вращение нужен тот или иной двигатель. В качестве последнего может быть использована паровая или водяная турбина. Генераторы трехфазного тока большой мощности устраиваются обычно так, что ротор их помещается непосредственно на валу паровой или водяной турбины. Генератор, ротор которого помещен на одном общем валу с паровой турбиной, называется *турбогенератором*. Генератор, ротор которого помещен на одном общем валу с гидротурбиной, называется *гидрогенератором*. На наших крупных гидростанциях (Волховская, Свирская, Днепровская, Куйбышевская и другие) установлены мощные гидрогенераторы. На ГЭС, снабжающих энергией отдельные города, обычно ставятся турбогенераторы.

Мощные гидрогенераторы — огромные, тяжелые машины, приводимые во вращение движущейся водой. Число оборотов турбогенераторов обычно 3000 об/мин., а гидрогенераторов — от нескольких десятков в минуту до нескольких сотен. Гидрогенераторы относятся к категории тихоходных машин. Для того чтобы выдержать стандартную частоту переменного тока в 50 Гц, роторы тихоходных генераторов имеют большое число пар полюсов. Так, например, днепровские генераторы (75 об/мин.) имеют 40 пар полюсов.

Двигатель, вращающий ротор генератора, совершает работу не только по преодолению неизбежных во всякой машине сопротивлений (в первую очередь — трения). В соответствии с законом Ленца, индуцируемый в обмотках статора генератора ток создает магнитное поле, препятствующее вращению магнитного поля ротора, а значит, и вращению самого ротора. При этом чем больше мощность потребляемого от генератора тока, тем больше ток, идущий по обмоткам генератора, и тем большую работу совершает двигатель, вращающий ротор генератора. Таким образом, в генераторе механическая энергия, доставляемая двигателем, превращается в энергию электрическую.

Методические указания

Изучение устройства генераторов трехфазного тока программой не предусмотрено. Поэтому настоящий параграф в учебный план темы не включен.

Однако было бы хорошо хотя бы очень кратко сказать учащимся об устройстве генераторов. На это нужно очень немного времени, так как в устройстве генератора трехфазного тока очень много общего с генератором однофазного переменного тока, который учащиеся уже изучали. Кроме того, рассматривая способы получения трехфазного тока, мы по необходимости уже познакомили учащихся с принципом действия такого генератора. Осталось добавить немного. И наконец, этот вопрос связан с электрификацией СССР, ознакомление учащихся с которой учтено программой. Очень небольшую часть времени, отводимого на изучение этой части темы, можно использовать для оформления в представлениях учащихся сведений об устройстве генераторов трехфазного тока.

В изложении устройства генератора трехфазного тока вряд ли есть основание исключать генератор с неподвижным индуктором и вращающимся якорем. Такого типа генераторы не являются вышедшей из обихода редкостью, и потому обойти их молчанием не следует.

Применительно к магнитному полю, создаваемому обмоткой возбуждения генератора трехфазного тока, остаются в силе замечания, содержащиеся в методических указаниях к § 12.

§ 19. Принцип действия асинхронного электродвигателя. Вращающееся магнитное поле

Опыт показывает, что генераторы трехфазного тока стоят дешевле генераторов однофазного тока такой же мощности. Помимо этого, трехфазный ток обладает ценнейшим свойством: создавать так называемое вращающееся магнитное поле. Использование вращающегося магнитного поля позволило создать очень простые по устройству, несложные и надежные в эксплуатации электродвигатели. К рассмотрению вопроса о том, что же это

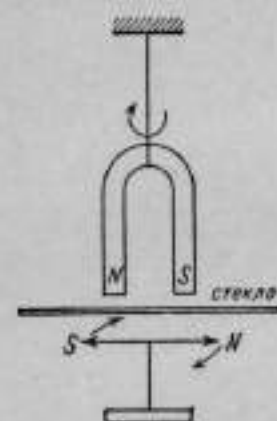


Рис. 70. Магнитная стрелка вращается синхронно с магнитом.

за вращающееся магнитное поле и как его применяют в электродвигателях, мы теперь и перейдем. В основе действия электродвигателей лежит взаимодействие токов. Токи взаимодействуют друг с другом посредством магнитных полей. Проведем несколько опытов, обнаруживающих взаимодействие магнитных полей.

1. Подвесим на нити постоянный подковообразный магнит, под ним расположим кусок листового стекла, а под стеклом магнитную стрелку (рис. 70). Придерживая магнитную стрелку рукой, повернем магнит вокруг вертикальной оси несколько раз, закрутив тем самым нить, на которой он подвешен.

Затем одновременно отпустим подковообразный магнит и магнитную стрелку. Магнит начнет вращаться. Вместе с ним вращается и его магнитное поле. Магнитное поле подковообразного магнита, взаимодействуя с магнитным полем магнитной стрелки, приведет последнюю во вращательное движение. При этом на глаз достаточно отчетливо видно, что скорость вращения магнита и стрелки одинакова.¹ Стекло между магнитом и стрелкой мы по-

¹ Вначале движение стрелки несколько отстает от движения магнита. Движение стрелки станет синхронным, когда сумма моментов всех преодолеваемых сопротивлений сделается равной моменту движущей силы.

местили для того, чтобы исключить предположение, что магнитная стрелка вращается потому, что она увлекается воздушным потоком, вызванным вращением магнита.

Мысль о том, что скорость вращения стрелки равна скорости вращения магнита, выразим словами: *магнитная стрелка вращается синхронно с магнитом*.

В этом опыте взаимодействие магнитной стрелки и подковообразного магнита осуществляется посредством магнитных полей двух постоянных магнитов: подковообразного магнита и магнитной стрелки.

Но можно иметь дело и с магнитными полями электрического тока.

2. Закрепим неподвижно виток (моток) проволоки, замкнутый на гальванометр. Поместим виток между полюсами постоянного подковообразного магнита, зажатого во штуклу так называемой центробежной машины так, что он может быть приведен ею во вращение (рис. 71). Начнем медленно вращать магнит. Вместе с ним будет вращаться и его магнитное поле. Гальванометр обнаружит изменяющийся по направлению ток (стрелка гальванометра отклоняется то в одну, то в другую сторону). Очевидно, вследствие вращения магнита магнитный поток, охватываемый контуром витка, изменяется. В витке возникает переменный э. д. с. Так как виток замкнут, то в нем появляется переменный ток. Собственно, наблюдаемый нами опыт есть знакомый уже нам опыт по возбуждению э. д. с. индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле. Здесь мы только заставили двигаться поле, а проводник (виток) закрепили неподвижно. Но заметим еще следующее: в витке возник индукционный ток, создающий свое магнитное поле. Причем, в соответствии с законом Ленца, индукционный ток в витке имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует движению магнита.

В этом случае тоже имеет место взаимодействие двух магнитных полей, но виток не приходит в движение, потому что он закреплен неподвижно.

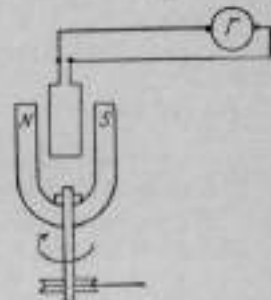


Рис. 71. Возбуждение э. д. с. в витке, находящемся во вращающемся магнитном поле.

3. Отключим гальванометр и подвесим тот же виток так, чтобы он мог легко поворачиваться. Снова приведем во вращение магнит. Мы видим, что теперь виток вращается вслед за вращающимся магнитом, а значит, и вслед за вращающимся магнитным полем. На глаз заметно, что частота вращения витка меньше частоты вращения магнита (поля). Как объяснить вращение витка?

Когда мы вращаем магнит, магнитный поток, охватываемый контуром витка, изменяется. В витке и в этом случае возникает индукционный ток, создающий магнитное поле, противодействующее вращению магнита. Противодействие со стороны витка, оказываемое магниту, не может остановить последний, так как магнит вращается под действием достаточно большой внешней силы. В итоге виток вынужден сам вращаться в том же направлении, в каком вращается магнит. Если мы представим себе, что скорость вращения витка станет равной скорости вращения магнита, то в этом случае виток оказался бы в состоянии покоя относительно поля. Тогда магнитный поток, охватываемый контуром витка, стал бы неизменным и индукционный ток в витке прекратился бы, а его магнитное поле исчезло бы. Виток должен был бы остановиться. Но как только скорость его вращения станет меньше скорости вращения магнита, вновь начнется изменение магнитного потока в контуре витка, появятся ток и поле и виток в результате взаимодействия полей будет продолжать вращаться. По этой причине скорость вращения витка не может достигнуть скорости вращения магнита. В итоге — *скорость вращения витка все время остается меньше скорости вращения магнитного поля*. Иными словами говоря, *виток вращается асинхронно с магнитным полем* (т. е. несинхронно, не вместе с вращающимся магнитным полем в смысле одинаковой скорости вращения, а несколько отставая по скорости от него).

4. Подвесим на нитях над тем же постоянным магнитом металлический диск, как показано на рис. 72. Диск должен быть из какого-либо немагнитного вещества, например, из алюминия или меди, чтобы исключить возможность намагничивания диска и взаимодействия его с магнитом по этой причине. Станем вращать магнит. Диск начинает вращаться в том же направлении. (На боковых нитях прикреплены кусочки цветной бумаги, чтобы

лучше было видно вращение диска.) В этом опыте диск тоже вращается асинхронно с магнитным полем. Причина, вызывающая вращение диска, та же, что и в предыдущем опыте. При вращении магнита магнитный поток, пронизывающий диск, изменяется. В металлическом диске возникают вихревые токи, магнитные поля которых противодействуют вращению магнита. В остальном объяснение этого явления совершенно подобно тому, какое только что дано по отношению к витку, вращающемуся вслед за магнитом.

В двух последних опытах виток проволоки и металлический диск вращались вследствие взаимодействия магнитных полей тока (в витке и в диске) с вращающимся полем постоянного магнита. Вращающееся поле мы получили в результате вращения магнита. Оказывается, что вращающееся магнитное поле можно получить также с помощью трехфазного тока. Убедиться в этом можно путем следующих рассуждений.

Представим себе три катушки, расположенные на стол так, что оси их расположены под углом 120° друг к другу (см. рис. 73). Соединим катушки звездой или треугольником и подключим их к сети трехфазного тока (соединение катушек на рис. 73 не показано). В каждую катушку поступает синусоидальный переменный ток, создающий переменное магнитное поле. Напряженность магнитного поля тока (при прочих равных условиях) пропорциональна величине тока. Величина же переменного тока изменяется во времени по синусоидальному закону и для любого момента времени может быть определена по формуле

$$I = I_m \cdot \sin \alpha,$$

или

$$I = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Очевидно, что напряженность магнитного поля переменного тока, так же как и ток, изменяется во времени по синусоидальному закону. А именно: возрастает от нуля до максимума, затем падает до нуля и дальше, изменяя

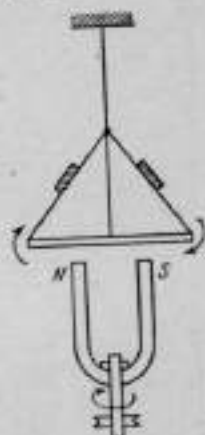


Рис. 72. Металлический диск вращается асинхронно с магнитом.

направление на противоположное, возрастает до максимума, а затем падает до нуля, и т. д. То есть напряженность магнитного поля переменного тока изменяется в пределах от $+H_m$ до $-H_m$ и при переходе через нуль меняет свое направление на противоположное. Следовательно, мгновенное значение напряженности магнитного

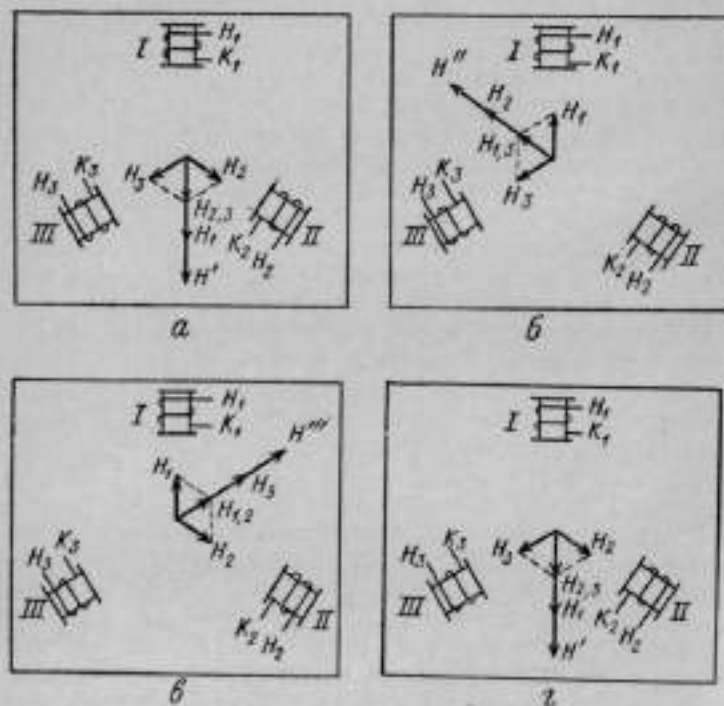


Рис. 73. Схема вращающегося магнитного поля трехфазного тока.

поля переменного тока может быть выражено следующей формулой: $H = H_m \cdot \sin \omega t$. Каждая из трех катушек, изображенных на рис. 73, создает свое переменное магнитное поле. Эти поля, накладываясь друг на друга, создают суммарное магнитное поле. Определим значения напряженности поля каждой катушки для одних и тех же моментов времени и найдем результирующую напряженность суммарного поля для тех же моментов времени.

Пусть в начальный момент времени наших рассуждений произведение ωt для тока в I катушке на рис. 73, а равно 90° . Тогда напряженность магнитного поля этой катушки в этот момент времени

$$H_1 = H_m \cdot \sin 90^\circ = H_m.$$

Следовательно, напряженность максимальна и положительна. Условимся за положительное направление напряженности магнитного поля той или иной катушки принимать направление *от катушки*, а за направление отрицательное — направление *в сторону катушки*. Выбрав (произвольно) масштаб, обозначим вектор напряженности H_1 , показав, что он направлен от I катушки (см. рис. 73, а).

Так как токи в катушках сдвинуты по фазе на угол в 120° , то напряженность магнитного поля II катушки в этот же момент времени

$$H_2 = H_m \cdot \sin (90^\circ - 120^\circ) = H_m \cdot \sin (-30^\circ) = -0,5H_m.$$

Как видим, напряженность этого поля составляет половину максимальной и отрицательна. Обозначим ее вектором (в том же масштабе), направив вектор в сторону катушки.

Напряженность поля III катушки в этот же момент времени

$$H_3 = H_m \cdot \sin (90^\circ - 240^\circ) = H_m \cdot \sin (-150^\circ) = -0,5H_m.$$

Напряженность поля III катушки по величине равна половине максимальной и направлена в сторону катушки. Нанесем и этот вектор напряженности на чертеж. Сложим (геометрически) векторы H_1 и H_2 . Так как угол между ними 120° и они по абсолютному значению равны между собой, то геометрическая сумма векторов H_1 и H_2 по абсолютному значению равна каждому из этих векторов и направлена вдоль вектора H_1 . Сложив векторы $H_{1,2}$ и H_3 , получим результирующий вектор H' общего поля трех катушек (см. рис. 73, а). Результирующий вектор H' суммарного поля в полтора раза больше максимальной напряженности H_1 и направлен по оси I катушки в противоположную от нее сторону.

Определим значения напряженности поля каждой катушки через промежуток времени, равный $1/3$ периода.

$$H_1 = H_m \cdot \sin 210^\circ = -0,5H_m.$$

$$H_2 = H_m \cdot \sin (210^\circ - 120^\circ) = H_m \cdot \sin 90^\circ = H_m.$$

$$H_3 = H_m \cdot \sin (210^\circ - 240^\circ) = H_m \cdot \sin (-30^\circ) = -0,5H_m.$$

Отложим в прежнем масштабе эти векторы напряженности, направляя положительный вектор H_1 от II катушки, а отрицательные векторы H_2 и H_3 в сторону соответствующих катушек (см. рис. 73, б). Сложим эти три вектора. Видим, что результирующий вектор H' суммарного поля по абсолютному значению остался той же величины (в полтора раза больше напряженности H_u , т. е. напряженности поля одной катушки), но к концу первой трети периода он повернулся на угол в 120° , так как теперь он направлен по оси II катушки (а оси катушек смещены относительно друг друга на 120°). Направлен вектор H' в сторону от II катушки.

Определим напряженность поля каждой катушки к концу второй трети периода.

$$\begin{aligned} H_1 &= H_u \cdot \sin 330^\circ = -0,5H_u \\ H_2 &= H_u \cdot \sin (330^\circ - 120^\circ) = H_u \cdot \sin 110^\circ = -0,5H_u \\ H_3 &= H_u \cdot \sin (330^\circ - 240^\circ) = H_u \cdot \sin 90^\circ = H_u \end{aligned}$$

Нанесем эти векторы на чертеж. Сложим их (рис. 73, в). Результирующий вектор H'' суммарного поля по абсолютному значению остался прежним, но направлен теперь по оси III катушки в сторону от нее. Следовательно, за вторую треть периода результирующий вектор повернулся еще на 120° .

В конце третьей трети периода напряженности поля каждой катушки будут следующие:

$$\begin{aligned} H_1 &= H_u \cdot \sin 450^\circ = H_u \\ H_2 &= H_u \cdot \sin (450^\circ - 120^\circ) = H_u \cdot \sin 330^\circ = -0,5H_u \\ H_3 &= H_u \cdot \sin (450^\circ - 240^\circ) = H_u \cdot \sin 210^\circ = -0,5H_u \end{aligned}$$

Сложим эти векторы (рис. 73, г). Видим, что результирующий вектор суммарного поля, оставшись прежним по абсолютному значению, повернулся за третью четверть периода еще на 120° , вернувшись в исходное положение.

Дальше этот процесс начинается сначала.

Итак, мы доказали, что результирующая напряженность суммарного поля во взятые нами моменты времени по абсолютному значению постоянна (равна полторному значению максимальной напряженности поля одной фазы) и за каждый период трехфазного тока поворачивается на угол в 360° .

Точно таким же образом можно вычислить напряженность суммарного поля и для других моментов времени.

Оказывается, что и в эти моменты времени она постоянна (равна полторному значению максимальной напряженности поля одной фазы) и за равные промежутки времени поворачивается на равные углы, а за промежуток времени, равный периоду, поворачивается на угол в 360° .

Приходим к чрезвычайно важному выводу:

В результате наложения трех одинаковых синусоидально изменяющихся магнитных полей, сдвинутых на 120° , образуется неизменное по величине и равномерно вращающееся магнитное поле.

Поле, созданное тремя катушками, является двухплоскостным вращающимся полем. Число оборотов его в секунду численно равно частоте переменного тока. Так, при частоте в 50 гц скорость вращения поля равна 50 об/сек, или 3000 об/мин. Увеличивая число катушек в 2, 3 и т. д. раз, получают так называемое многополюсное вращающееся поле, скорость вращения которого меньше (соответственно в 2, 3 и т. д. раз). Проверим наши теоретические выводы экспериментально.

1. Положим на стол три катушки (от разборного трансформатора) так, чтобы оси их были расположены под углом в 120° , т. е. как на рис. 73. Соединим катушки звездой и в каждую фазу включим по реостату и рубильнику, после чего подключимся к трехфазной осветительной сети. В центре магнитного поля (какое получится, когда в катушки будет подаен ток) поставим магнитную стрелку, которая может вращаться вокруг вертикальной оси. Замкнем рубильники. Магнитная стрелка придет в быстрое вращательное движение.

2. В центре поля катушек закрепим неподвижно моток проволоки, соединенной с гальванометром, как это было сделано в опыте по рис. 71. Замкнем рубильники. Гальванометр обнаруживает ток.

3. Отключим гальванометр, замкнем концы мотка проволоки и подвесим моток проволоки так, чтобы он мог поворачиваться вокруг вертикальной оси. При замыкании цепи тока в катушках моток проволоки вращается. Исследования показывают, что вращение асинхронно с магнитным полем — скорость вращения витка меньше скорости вращения магнитного поля трехфазного тока.

4. Подвесим в центре поля какой-либо металлический предмет, например, диск, использованный в опыте по рис. 72 (или металлический сосуд от калориметра). При замыкании

цепи тока диск вращается. Его вращение тоже асинхронно с магнитным полем.

Как видим, мы повторили опыты, описанные в начале настоящего параграфа, с той разницей, что в первом варианте опытов мы осуществили вращающееся магнитное поле, прибегнув к вращению постоянного магнита, а во втором варианте опытов использовали вращающееся поле трехфазного тока.

Объяснение явлений, наблюдаемых во втором варианте опытов, такое же, как и в первом.

Итак, вращающееся магнитное поле можно получить с помощью трехфазного тока.

Методические указания

Начало параграфа посвящено очень краткому вступлению, цель которого — сказать учащимся о том, почему мы переходим к рассмотрению вращающегося магнитного поля. Подобное вступление „оправдывает“ в глазах учащихся переход к новому вопросу, вызывает интерес, создает у них перспективу в предстоящей на уроке работе. Поэтому, нам кажется, отказываться от такого приема не следует. (Попытка сказать несколько фраз в плане введения осуществлена и в других параграфах.)

Первое знакомство учащихся с вращающимся магнитным полем предлагается осуществить, отталкиваясь от четырех опытов, описанных в начале данного параграфа. Цель демонстрации — показать, что для вращения (магнитной стрелки, витка проволоки, диска) можно иметь два взаимодействующих друг с другом магнитных поля, из которых одно движется. Вопрос же о том, какого „происхождения“ эти поля (оба ли созданы постоянными магнитами, или оба созданы токами, или одно — током, а другое — магнитом), не имеет принципиального значения. Мысль о взаимодействии полей в объяснении опытов должна быть достаточно подчеркнута.

„Механизм“ асинхронного вращения витка (опыт 3), диска (опыт 4) далеко не сразу воспринимается учащимися. Необходимо помочь им в этом отношении. Один из путей указан в тексте параграфа. Другой возможен такой. В витке (опыт 3), в диске (опыт 4) возникает индукционный ток. Как известно учащимся, на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует сила,

двигающая проводник. Но само поле непрерывно движется (вращается), а поэтому и движение проводника происходит непрерывно: проводник с током (виток, диск) также непрерывно вращается. Скорость же вращения витка (диска) не может достигнуть скорости вращения поля, так как в этом случае виток оказался бы в состоянии покоя относительно поля и в нем не было бы тока.

Ставя опыт с вращением магнитной стрелки (рис. 70), не следует сильно закручивать нить, на которой подвешен подковообразный магнит: нарушается синхронность вращения магнитной стрелки с магнитным полем магнита.

В опытах 2, 3, 4 магнит должен быть надежно закреплен в муфте центробежной машины и так, чтобы ось вращения проходила по возможности точно посередине промежутка между его двумя ветвями. Наиболее рационально просверлить в дуговой части магнита отверстие, в которое вставить стержень с винтовой нарезкой на конце, и стянуть магнит гайками. Другой конец стержня вставляется в муфту центробежной машины. Но сверлить сталь магнита трудно. Можно поступить иначе. В деревянном бруске размерами приблизительно $150 \times 50 \times 50$ мм посредине его длины сделать поперек бруска выемку глубиной около 30 мм, а шириной на 1—1,5 мм меньше ширины дуговой части магнита. Посредине бруска (в выемке) сверлится отверстие, в которое вставляется конец стержня с винтовой нарезкой. Брусок крепится к стержню гайками, а магнит дуговой своей частью сильным нажимом вгоняется в выемку в бруске. Такое крепление магнита оказывается достаточно надежным.

В крайнем случае можно надежно зажать дуговую часть магнита в „лапку“ от штатива, а противоположный конец стержня, на котором сидит „лапка“, вставить в муфту центробежной машины, предварительно подогнав с помощью напильника диаметр стержня к диаметру муфты. Недостаток такой конструкции состоит в том, что ось вращения магнита не проходит посредине промежутка между его ветвями. При вращении магнит „бьет“. Это осложняет постановку опытов 2 и 3. Виток должен быть очень небольшой ширины, чтобы он все время оставался между ветвями магнита при вращении последнего. Для постановки опыта 4 этот недостаток не имеет существенного значения.

При изготовлении витка (рамки) для опытов 2 и 3 следует согнуть провод не один, а 30—50 раз, как это обычно делается для демонстрации движения рамки с током в магнитном поле. Форма рамки, разумеется, не имеет значения. Это может быть просто моток изолированной проволоки.

Основным из описанных в этом параграфе опытов является классический опыт Араго — вращение подвешенного на нитях металлического диска, под которым вращается постоянный магнит (опыт 4). Предыдущие опыты последовательно подводят учащихся к этому последнему, заключительному опыту. В крайнем случае в целях экономии времени придется ограничиться только этой последней демонстрацией, обратив особое внимание на объяснение наблюдаемого явления. В этих целях полезно учесть сделанные здесь замечания применительно к остальным опытам, хотя они и не будут ставиться.

Возможность получить с помощью трехфазного тока вращающееся магнитное поле сначала доказана теоретически, а затем проверена на опыте. Разумеется, возможен и обратный порядок. Нам представляется, что для X класса предпочтителен первый путь.

Так как понятие о вращающемся магнитном поле является фундаментальным и отправным в установлении принципа работы электродвигателей, то ему должно быть уделено соответствующее внимание. Для усвоения понятия о вращающемся магнитном поле учащиеся имеют уже нужные знания. В целях экономии времени схема вращающегося магнитного поля трехфазного тока, данная на рис. 73, может быть приготовлена заранее (на классной доске, а лучше — в виде стенной таблицы; векторы могут быть сделаны цветными). На этом же чертеже могут быть написаны и выражения напряженностей полей катушек для отдельных моментов времени. Более или менее подробное объяснение того, как образуется суммарное поле катушек, потребуется только для начального момента в наших рассуждениях, т. е. применительно к части а рис. 73, а дальше на него можно только сослаться. Таким образом, сохраняя строгость и логичность в изложении сути дела, мы вместе с тем максимально экономим время.

При изложении вопроса о вращающемся магнитном поле существенно обратить особое внимание учащихся на два следующих обстоятельства. Результирующий век-

тор напряженности суммарного поля остается неизменным по абсолютному значению *все время*, а не только в те моменты времени, для которых мы его вычисляем. И второе — результирующий вектор напряженности поля в любые малые равные промежутки времени поворачивается на один и тот же угол, т. е. *вращается равномерно*.

Рассказывать учащимся на уроке о возможности получить многополюсное вращающееся поле нет необходимости.

Перед демонстрацией вращающегося магнитного поля трехфазного тока может быть поставлен следующий опыт. Три катушки от разборного трансформатора располагаются на столе так, как это показано на рис. 73. Катушки соединяются звездой. В центре ставится магнитная стрелка на вертикальной оси. Шраго,¹ к катушкам поочередно подается ток от батареи аккумуляторов. Максимумы напряженности магнитного поля катушек наступают тоже поочередно. Магнитная стрелка приходит во вращательное движение.

В тексте данного параграфа имеется в виду демонстрация вращающегося магнитного поля трехфазного тока на основе тех же опытов 1, 2, 3 и 4, какие ставились с вращающимся постоянным магнитом. Сравнение результатов одних и тех же опытов в том и другом варианте позволяет более убедительно прийти к заключению, что магнитное поле трехфазного тока вращается. К демонстрациям могут оказаться полезными следующие практические советы. Катушки лучше брать с примонтированными сердечниками, длина которых равна длине катушек. Если таких сердечников не найдется, то можно в каждую катушку вставить половину имеющегося разборного сердечника. Она Г-образной формы. Загнутый конец сердечника должен выходить из конца катушки, дальше расположенного от центра суммарного поля (см. рис. 73). Катушки следует класть на стол, а не ставить вертикально. Лучше соединить катушки звездой, а не треугольником (напряжение из каждую катушку в первом случае будет подано меньшее, чем во втором). Не следует пользоваться очень большим током. Вместо реостатов

¹ См. журнал „Физика в школе“, 1937, № 6.

могут быть использованы лампы накаливания (на 100—150 *вт*).

В опыте 1 сразу по включении тока полезно „помочь“ магнитной стрелке вращаться, раскрутив ее. (Если стрелка задержится, то она может размагнититься.)

В опыте 2 необходимо защитить гальванометр, подключив последовательно с ним дополнительное сопротивление или заменив гальванометр маловольтной лампочкой накаливания.

Если опыты 1, 2 и 3 в первом варианте (с вращающимся постоянным магнитом) не ставились, то целесообразно не прибегать к ним и во втором варианте, сохранив только опыт 4.

§ 20. Асинхронный электродвигатель трехфазного тока

Как было указано в предыдущем параграфе, работа асинхронных двигателей трехфазного тока основана на

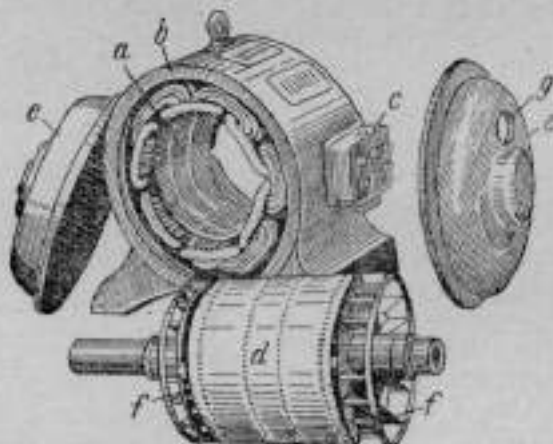


Рис. 74. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде.

использовании вращающегося магнитного поля, создаваемого трехфазным током.

Асинхронный двигатель (рис. 74) состоит из двух основных частей: неподвижной части — статора и вращающейся — ротора.

Сердечник статора цилиндрической формы обозначен буквой (рис. 74, *a*), набран из изолированных друг от друга листов стали (в целях борьбы с потерями на вихревые токи). На внутренней цилиндрической поверхности сердечника статора имеются пазы, расположенные параллельно оси цилиндра. Сердечник статора укреплен в чугунном корпусе (рис. 74, *b*). В пазах сердечника статора укладывается обмотка, состоящая из трех катушек, при прохождении по которой трехфазного тока создается вращающееся магнитное поле. Концы обмотки выводятся к коробке с зажимами (рис. 74, *c*), укрепленной на внешней поверхности корпуса двигателя. К зажимам подключаются провода от сети трехфазного тока.

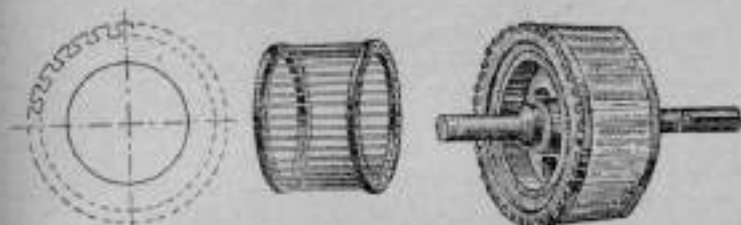


Рис. 75. Ротор асинхронного короткозамкнутого двигателя.

Ротор представляет собою цилиндр *d*, тоже набранный из отдельных листов стали (рис. 74, *d*). На боковой поверхности цилиндра имеются пазы, параллельные оси цилиндра. В пазы уложены провода (неизолированные), соединенные на концах кольцами. Провода с боковыми кольцами составляют так называемое беличье колесо. На рис. 75 показан один из штампованных листов, из которых набирается сердечник ротора, рядом беличье колесо отдельно от сердечника ротора и правее — сердечник ротора с беличьим колесом.

Двигатель с ротором такого устройства называется *двигателем с короткозамкнутым ротором*. Ротор насаживается на вал, который может вращаться в подшипниках, помещенных в подшипниковых щитах (рис. 74, *e*). Буквой *f* на рис. 74 обозначены вентиляторы, прогоняющие через двигатель во время его работы воздух (для охлаждения двигателя), и буквой *g* — вентиляционные отверстия в подшипниковых щитах.

При прохождении трехфазного тока по обмотке статора возникает вращающееся магнитное поле. В обмотке ротора (в беличьем колесе) возникает индукционный ток, создающий свое магнитное поле. В результате взаимодействия этих двух магнитных полей (рассмотренного нами в предыдущем параграфе), ротор приходит во вращение.

Кроме асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, изготавливают двигатели и другого типа — *асинхронные двигатели с кольцами* (с фазной обмоткой). Ротор таких двигателей имеет обмотку, подобную обмотке статора, состоящую из трех катушек, сдвинутых относительно друг друга на 120° . Эту обмотку называют фазной. Концы фазной обмотки соединяются вместе, а вначале присоединяются к трем медным изолированным кольцам, укрепленным на валу двигателя. К кольцам прижимаются щетки, соединенные с пусковым трехфазным реостатом. Трехфазный реостат дает возможность путем поворота шнекообразного рычага одновременно вводить (или выводить) сопротивления во все три фазы обмотки ротора. Схема обмотки ротора приведена на рис. 76. При пуске двигателя в ход (т. е. при пуске тока в обмотку статора) обмотки ротора замкнуты друг на друга через реостат. Статор создает вращающееся магнитное поле. В обмотке ротора возникает индукционный ток. Чтобы он не был при пуске двигателя очень большой величины (скорость вращения магнитного поля относительно ротора вначале велика), обмотки ротора замыкают не непосредственно друг на друга, а сначала через реостат. После пуска двигателя в ход скорость вращения ротора возрастет; реостат постепенно выключают и с помощью особого приспособления (короткозамыкателя) замыкают накоротко начала обмоток ротора, а щетки отводят от колец (чтобы избежать ненужного теперь трения щеток о кольца). Таким образом, реостат нужен только во время запуска двигателя и ход.

Ротор в рассматриваемых электродвигателях вращается асинхронно с магнитным полем, т. е. скорость вращения ротора n_2 всегда меньше скорости вращения магнитного поля статора n_1 . Разность $n_1 - n_2$ определяет скорость вращения поля статора относительно ротора. Величина, определяемая отношением этой скорости к скорости вра-

щения поля статора n_1 , называется *скольжением* (обозначается буквой S). Скольжение обычно выражается в процентах.

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$$

При холостом ходе электродвигателя скольжение незначительно больше нуля. При нагрузке ротора (тормозящей его вал) скорость вращения ротора уменьшается, скольжение увеличивается. Увеличение скольжения вызывает

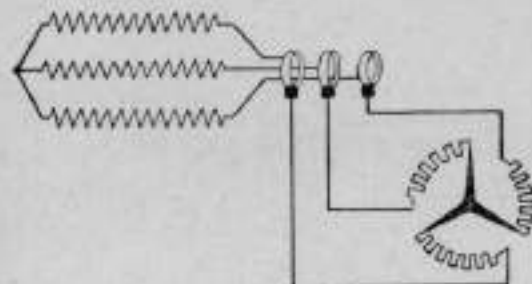


Рис. 76. Схема обмотки ротора асинхронного двигателя с кольцами (с фазной обмоткой).

увеличение в, д. с. и тока в обмотке ротора, вследствие чего возрастает вращающий момент двигателя и устанавливается динамическое равновесие между вращающим и тормозящим моментом. Кроме того, с увеличением нагрузки на двигатель возрастает ток, идущий в обмотку статора из сети, — увеличивается расход электроэнергии. У современных асинхронных электродвигателей скольжение S в пределах $1-6\%$.

Направление вращения ротора совпадает с направлением вращения магнитного поля статора. Поэтому, для того чтобы изменить вращение ротора на обратное, нужно изменить направление вращения магнитного поля статора. Для этого достаточно переключить любые два провода, соединяющие обмотку статора с сетью, и ротор будет вращаться в обратном направлении.

Обмотки статора каждого асинхронного электродвигателя трехфазного тока рассчитаны на определенное нормальное для данного двигателя фазное напряжение. При этом каждый электродвигатель может быть включен в сеть с двумя различными напряжениями, для чего

обмотки статора соединяются в одном случае звездой и в другом — треугольником. Так например, электродвигатель, обмотки которого рассчитаны на нормальное (для этого двигателя) напряжение 127 в, может быть включен в сеть с линейным напряжением 127 и 220 в. В первом случае обмотки статора двигателя должны быть соединены треугольником, во втором — звездой. (Как это вытекает из изложенного в § 17, напряжение, получаемое каждой обмоткой статора двигателя при соединении их

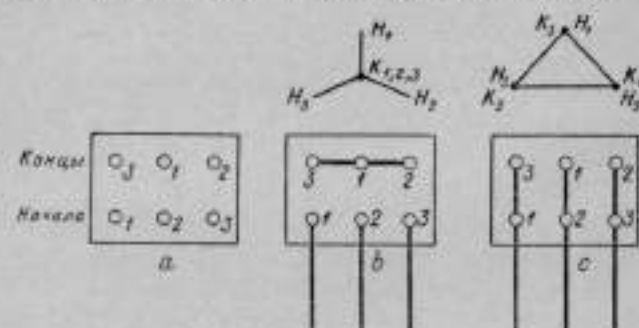


Рис. 77. Схема соединения обмоток статора асинхронного двигателя звездой или треугольником.

звездой, в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем при соединении треугольником.) В обоих случаях на каждую обмотку статора будет подано напряжение 127 в. Другой пример: обмотки статора двигателя рассчитаны на напряжение 220 в, а линейное напряжение сети 380 в. В этом случае двигатель может быть включен в сеть при соединении обмоток статора только звездой.

Как было указано выше, начала и концы обмоток статора подводится к зажимам в коробке на корпусе двигателя. На рис. 77 показано расположение зажимов и способы соединения обмоток статора звездой и треугольником. На рис. 77, а показано расположение начал и концов обмоток. Для соединения их звездой необходимо зажимы 3, 1 и 2 (концы обмоток) соединить одним общим проводом, а зажимы 1, 2, 3 (начала обмоток) подключить к проводам сети (рис. 77, б). Для соединения обмоток статора треугольником нужно конец обмотки соединить с началом 1, конец 1 с началом 2 и конец 2 — с началом 3. Клеммы 1, 2, 3 (начала

обмоток) подключить к проводам сети (рис. 77, в). Таким образом, соединение обмоток статора двигателя звездой и треугольником осуществляется легко и быстро.

Асинхронные электродвигатели чрезвычайно просты по устройству и уходу за ними и потому дешевы и экономичны. Изменение направления вращения ротора осуществляется легко и быстро (переключение двух фаз, подходящих к двигателю, производится с помощью двухполюсного переключателя). Однако эти двигатели имеют и недостатки. Основные из них — небольшая пусковая мощность (двигатели плохо «берут с места»), трудность регулирования скорости вращения ротора. По этим причинам асинхронные двигатели не нашли применения на транспорте, но получили широчайшее распространение на стационарных установках в промышленности и в сельском хозяйстве, во всех тех многочисленных случаях, когда не требуется строгого постоянства скорости вращения ротора двигателя и нет необходимости менять число его оборотов.

Методические указания

Рассмотрение устройства асинхронного электродвигателя трехфазного тока можно начать с демонстрации самодельной модели такого двигателя. Самодельные модели генератора трехфазного тока, упомянутые в § 12, могут быть использованы как модели асинхронного мотора. С этой целью нужно соединить обмотки статора звездой или треугольником, а обмотку ротора (электромагнита) замкнуть накоротко. Можно вместо электромагнита поместить ротор типа беличьего колеса, изготовление которого не так уж сложно. Разумеется, подключать обмотку статора модели двигателя к трехфазной проводке осветительной сети нужно через реостаты, поставленные в каждую фазу обмотки двигателя. В качестве реостатов могут быть использованы лампы накаливания.

Изготовление действующих моделей асинхронных двигателей несложно и доступно каждой школе.¹

¹ См., например, статью П. К. Черняк и И. М. Рачек: Изучение темы «Переменный ток», Журнал «Физика в школе», 1953, № 6. Много чрезвычайно ценных практических советов может найти учитель физики в книге: Е. Н. Горачкин. Переменный ток. Учпедгиз, 1938.

Наиболее удобна модель с обмоткой статора, допускающей включение в осветительную сеть без реостатов.

Демонстрируя модель двигателя, надо не забыть показать, как изменяется направление вращения ротора (переключением любых двух проводов из числа трех, подводщих ток к двигателю).

Дальше можно перейти к рассмотрению промышленного асинхронного короткозамкнутого двигателя. Его следует разобрать: снять подшипниковые щиты, вынуть ротор. Дать учащимся рассмотреть детали. Удобно иметь два экземпляра двигателя небольшой мощности: один из них разобрать, другой оставить собранным.

Желательно не только рассмотреть устройство двигателя, но и поставить некоторые опыты, характеризующие принцип действия двигателя.

В частности, взаимодействие магнитных полей статора и ротора может быть обнаружено следующей демонстрацией.

1. Собранный двигатель ставим на стол. Гибким, довольно длинным проводом подводим ток к обмотке статора. Замыкаем цепь. Статор неподвижен, ротор вращается.

2. Подвешиваем двигатель за вал ротора (горизонтально) так, чтобы вал не мог вращаться. Подаем ток. Ротор неподвижен, а статор вращается.

3. Подвешиваем двигатель за вал ротора (опять горизонтально), но теперь так, чтобы вал ротора мог вращаться. Подаем ток. Ротор вращается в одну сторону, статор в другую.

Затем следует продемонстрировать вращающееся магнитное поле статора. Здесь тоже уместна серия кратковременных опытов.

1. Статор двигателя (ротор вынуть) ставим на стол. Внутри статора вводим стальную намагниченную полоску на оси (или магнитную стрелку). Подаем ток. Намагниченная полоска вращается. (Не забыть ее «раскрутить».)

2. Вводим внутрь статора моток изолированной проволоки (100—200 витков), замкнутой на низковольтную лампочку. Подаем ток в обмотку статора. Лампочка горит.

3. Подав ток в обмотку статора, внутрь его кладем крупный металлический шарик. Он, вращаясь, бежит по окружности сердечника статора. (Эту демонстрацию хорошо дать в теневой проекции.)

4. Статор ставим на стол вертикально. Внутри его опускаем подвешенный на нитке металлический сосуд (например, от калориметра). Замыкаем цепь. Сосуд вращается.

Об устройстве асинхронного двигателя с кольцами на уроке можно не рассказывать.

Заключительная часть параграфа — о соединении обмоток статора при включении двигателя в сеть, о преимуществах и недостатках асинхронных электродвигателей — имеет практическое значение и заслуживает того, чтобы этот материал был изложен на уроке.

Для перекачивания жидких металлов употребляют электромагнитные насосы постоянного или переменного тока. Электромагнитный насос переменного тока построен на принципе трехфазного асинхронного двигателя. В круглой камере создается вращающееся магнитное поле, увлекающее расплавленный металл, как ротор асинхронного двигателя. Раскрученный металл вырывается из камеры под давлением, как в обычном центробежном насосе.¹

§ 21. Михаил Осипович Доливо-Добровольский

Трехфазная система переменного тока обладает рядом ценных качеств. Она обеспечивает наиболее выгодную передачу энергии. Генераторы и электродвигатели трехфазного тока просты по устройству, надежны в работе. Поэтому однофазный ток в настоящее время почти совершенно вытеснен током трехфазным. Трехфазная система переменного тока изобретена в 80-х годах прошлого столетия русским электротехником Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским (1862—1919 гг.) и получила широчайшее распространение во всем мире. Доливо-Добровольский является основоположником техники трехфазного тока. Он открыл вращающееся магнитное поле трехфазного тока, сконструировал асинхронный электродвигатель трехфазного тока. В частности, ротор короткозамкнутого двигателя типа беличьего колеса изобретен Доливо-Добровольским. Им же создан генератор трехфазного тока. Помимо этого, Доливо-Добровольский

¹ См. «Физика в школе», 1956, № 2. Статья проф. Р. В. Теслянина: Атомная электростанция Академии наук СССР.

сконструировал трехфазный трансформатор, ряд аппаратов и приборов. Им же была осуществлена первая в мире передача электрической энергии при помощи трехфазного тока. В последние годы своей жизни он работал в области передачи электрической энергии на большие расстояния при помощи постоянного тока высокого напряжения. Разносторонние труды Доливо-Добровольского получили высокую оценку и признание во всем мире. Блестящий теоретик и талантливый конструктор Михаил Осипович Доливо-Добровольский почитается нами как великий русский электротехник, представитель славной школы русских электротехников второй половины XIX века.

Методические указания

В процессе преподавания физики мы вскрываем значение трудов наиболее крупных деятелей (как отечественных, так и иностранных) в области науки и техники. Естественно, что, изучая трехфазный ток, мы не можем обойти молчанием деятельность М. О. Доливо-Добровольского. Несомненно, что учащиеся смогут оценить значение трудов того или иного ученого только после того, как они достаточно хорошо ознакомятся с содержанием трудов этого ученого. Поэтому представляется целесообразным в методическом отношении рассказать кратко о работах М. О. Доливо-Добровольского в конце изучения темы, когда учащиеся, уже ознакомившись с основами учения о трехфазном токе, узнав о свойствах трехфазной системы и преимуществах трехфазного тока перед однофазным, смогут по достоинству оценить все значение трудов этого крупного электротехника.

Ознакомление учащихся с трудами Доливо-Добровольского возможно и в другом плане. После изучения трехфазной системы переменного тока и выяснения достоинств, которыми она обладает (т. е. после § 17), можно кратко рассказать об изобретателе этой системы — М. О. Доливо-Добровольском. Затем, после рассмотрения устройства и принципа действия генератора трехфазного тока (§ 18) рассказать о том, что первый генератор был создан Доливо-Добровольским, а после рассмотрения вращающегося магнитного поля трехфазного тока (§ 19) — о том, что оно было открыто им же, и т. д.

В этом последнем варианте все же крайне желательно

найти несколько минут времени в конце темы для краткого подытоживания значения деятельности этого ученого.

Одно представляется несомненным: нецелесообразно пытаться не только вскрыть значение трудов Доливо-Добровольского, но даже и просто дать перечень работ ученого в самом начале изучения трехфазного тока, так как в это время учащиеся еще ничего о нем не знают.

В примерном учебном плане § 21 отнесен к последнему уроку по трехфазному току.

ГЛАВА III

ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 22. Преобразование переменного тока в постоянный

Все наши крупные электростанции генерируют трехфазный переменный ток. Передача электрической энергии от станций к потребителям в настоящее время преимущественно производится тоже посредством трехфазного тока. Потребности подавляющего большинства промышленных предприятий в электроэнергии, а также бытовые нужды населения удовлетворяются подачей им трехфазного переменного тока.

Энергия трехфазного переменного тока, будучи основным видом энергии, потребляемой промышленностью и населением, не является единственным видом энергии, в которой нуждается современная техника. Так, для электрометаллургической и в ряде случаев для химической промышленности, для гальванопластики и гальваностегии нужен ток постоянный, а не переменный. С помощью постоянного тока (электролитическим путем) добывают алюминий, а также магний, натрий, калий, кальций и некоторые другие металлы; производят рафинирование меди, получая чистую электролитическую медь, которая в современной электротехнике находит широкое применение. Так называемая тяжелая вода, необходимая для работы некоторых типов ядерных реакторов, получается путем электролиза природной воды, подкисленной серной кислотой. На постоянном токе в настоящее время осуществляется электротяга: электрифицированные железные дороги, трамваи, троллейбусы, метро. Широко применяется постоянный ток и в электросвязи (в частности, в радиосвязи — для питания радиотехнических устройств).

Поскольку электростанции генерируют переменный ток, возникает задача — преобразовать переменный ток в по-

стоянный. Эта задача в настоящее время решается двумя путями: в основе одного из них лежит получение постоянного тока от генератора постоянного тока, приводимого во вращение двигателем переменного тока, в основе второго пути — непосредственное преобразование переменного тока в постоянный.

К установкам первого типа относится *двигатель-генератор*. Двигатель-генератор представляет собой установку, состоящую из двигателя переменного тока и соединенного с ним (с помощью жесткой муфты или ременной передачи) генератора постоянного тока. Основное достоинство двигателя-генератора — независимость цепи постоянного тока от цепи переменного тока. Недостатки: высокая стоимость, громоздкость, необходимость постоянного наблюдения во время работы, невысокий коэффициент полезного действия (равный произведению η п. д. двигателя и генератора).

Приборы второго типа, преобразующие переменный ток непосредственно в постоянный, получили название *выпрямителей*. Существуют различные типы выпрямителей. Наиболее распространенные из них: механические (коллектор), электронные (кенотронные), газотронные, тиратронные, ртутные и твердые (полупроводниковые) выпрямители. Перечисленные выпрямители имеют различное устройство, отличаются механизмом выпрямления переменного тока, но у всех этих выпрямителей (кроме механических) есть общее — они оказывают небольшое сопротивление току одного направления и большое — току противоположного направления. В результате переменный ток обращается в ток одного направления, но изменяющийся по величине (пульсирующий ток). Для уменьшения изменений величины тока прибегают к специальным устройствам — сглаживающим фильтрам.

Из названных выше выпрямителей мы кратко рассмотрим кенотронный и твердые (полупроводниковые) выпрямители.

Методические указания

В настоящее время многие школы имеют двигатель-генератор. Разумеется, его следует показать учащимся.

Об ионных выпрямителях (газотронных, тиратронных и ртутных) учитель физики может быть, найдет возможным сказать несколько фраз после рассмотрения кенотрон-

ного выпрямителя. Принцип действия ионных выпрямителей учащими X класса, знакомыми с ударной ионизацией, с током в газах, может быть легко воспринят. Поэтому в перечень названий выпрямителей в тексте параграфа включены и ионные.

В последние годы все большее применение находит вибрационный преобразователь. Пояснить принцип его действия в немногих словах очень трудно, поэтому он не упомянут вовсе. Однокорные преобразователи применяются редко и потому тоже не упомянуты.

Если в школе употребляются электролитические выпрямители, то придется кратко сказать и о них.

§ 23. Двухэлектродная электронная лампа

Основной частью кенотронного выпрямителя служит двухэлектродная электронная лампа. Электронными лампами называют приборы, действие которых основано на испускании электронов накаливаемыми металлами. Электронная лампа в наше время получила широкое применение в самых различных областях современной науки и техники.

Существуют электронные лампы различных типов. Здесь мы кратко остановимся на устройстве и принципе действия электронной лампы, называемой *двухэлектродной электронной лампой или иначе диодом*.

Двухэлектродная электронная лампа представляет собой стеклянный или металлический баллон, внутри которого помещены два электрода.

Воздух из баллона почти полностью удален. (В зависимости от вещества баллона лампы часто так и называют: стеклянные, металлические. Последние из указанных ламп в наше время получили широкое распространение.) Одним электродом в диоде служит тонкий металлический проводничок, называемый нитью накала или катодом, другим электродом служит металлическая пластинка — анод. В ряде случаев аноду придается форма цилиндра или плоской коробочки, внутри которых помещается нить накала — катод. От электродов делаются выводы наружу. Баллон укрепляется на цоколе, сделанном из изолятора, в котором закреплены штырьки. К ним припаиваются выводы от электродов. Лампа включается в цепь с помощью ламповой панельки — пластинки из диэлектрика, в кото-

рую вмонтированы металлические гнезда. Число гнезд и их расположение соответствуют числу и расположению штырьков на цоколе лампы. Нить накала чаще всего делается из вольфрама, но также и из некоторых других металлов, а анод — из какого-либо трудно окисляющегося металла (никель, молибден и др.). В баллоне лампы создается очень высокий вакуум. Известно, что насосом нельзя откачать воздух полностью из какого-либо сосуда: в нем всегда останется некоторое количество воздуха, поэтому при изготовлении лампы в баллон заранее вводит так называемые поглотители (gettery). Поглотителями служат щелочные металлы: магний, барий или их сплавы.

Часто поглотители помещают в маленький металлический «кармашик», припаянный к аноду. Разбив стеклянный баллон пришедшей в негодность электронной лампы, можно увидеть этот «кармашик». Иногда он виден через стекло баллона. После откачки воздуха насосом баллон помещают в переменное магнитное поле (поле, созданное переменным током). Возникающие в металлических частях лампы, в том числе и в поглотителе, вихревые токи, нагревают их. Нагревание доводят до такой температуры, при которой поглотитель испаряется. При последующем охлаждении лампы пары поглотителя конденсируются и оседают, главным образом, на стекле баллона, покрывая стекло тонким налетом. Этот слой металла и поглощает почти полностью остатки воздуха, а также и газы, выделяющиеся из электродов лампы, которые нагреваются во время работы лампы. Магний придает стеклу баллона зеркальный вид, а барий дает налет золотисто-коричневого цвета. Лампы с вольфрамовой нитью накала не имеют getterов, так как пары вольфрама играют эту роль.

При накаливании катода током скорость хаотического движения свободных электронов нити накала возрастает, в результате чего отдельные из них получают энергию, достаточную для выхода электронов за пределы нити. Явление выделения свободных электронов с поверхности того или иного тела получило название электронной эмиссии. *Испускание электронов нагреваемым телом называется термоэлектронной эмиссией*.

Если напряжение между нитью и анодом равно нулю, то вылетевшие из нити электроны образуют вокруг нити так называемое электронное облачко. Оно удерживается около нити, так как нить, потерявшая часть свободных

электронов, заряжается положительно. Под действием притяжения со стороны нити отдельные электроны из электронного облачка возвращаются обратно в нить. Таким образом, процессу испускания накаливаемой нитью электронов сопутствует обратный процесс — поглощение электронов нитью. При постоянной температуре нити наступает динамическое (подвижное) равновесие: количество электронов, вылетевших из нити, становится равным количеству электронов, возвращающихся в нить. В итоге среднее количество электронов в облачке становится постоянным.

Общий заряд электронов, выделяемых катодом за каждую секунду, называют *током эмиссии* или просто эмиссией и выражают обычно в миллиамперах. *Эмиссия катода возрастает с повышением температуры и с увеличением размеров катода.* Кроме того, эмиссия катода во многом зависит от рода металла, из которого сделана нить накала. Для увеличения эмиссии вольфрамовую нить накала активируют различными способами, в частности, нанося на поверхность нити лампы окись бария, стронция, кальция.

Катод описанного устройства называется *катодом прямого накала* (непосредственно накаливается током). Катоды прямого накала обычно питаются постоянным током. Если калить нить переменным током, то температура нити не будет строго постоянной: в связи с изменениями тока она будет несколько изменяться, а следовательно, будет изменяться и эмиссия. Режим работы лампы не будет постоянным. Чтобы приспособить лампу для питания нити накала ее переменным током, несколько изменяют конструкцию катода, отделяя катод (назначение которого испускать электроны) от нити накала (предназначенной для накаливания катода). Такой катод называют *подогревным катодом*. Подогревный катод представляет собой тонкий никелевый цилиндр, покрытый с наружной стороны оксидным слоем (окись бария, стронция, кальция). Внутри цилиндрика вставлена фарфоровая трубочка, а внутри нее изходится вольфрамовая нить накала (в виде петли). В лампах, выпускаемых в последние годы, конструкция катода несколько иная — фарфоровый цилиндр отсутствует. Нить накала покрыта слоем теплостойкой изоляции из алунда (окисел алюминия) и вставлена внутрь катода (никелевого цилиндрика), покрытого оксид-

ным слоем. Подогревные катоды вследствие больших размеров имеют значительно большую эмиссию, чем катоды прямого накала.

Если аноду сообщить положительный потенциал, то под действием сил электрического поля часть электронов из электронного облака придет в ориентированное движение по направлению от катода к аноду, образовав внутри лампы ток, который называют *анодным током*. Высокий вакуум в баллоне лампы и нужен для того, чтобы молекулы воздуха не мешали двигаться электронам к аноду. Кроме того, наличие воздуха, а значит, и кислорода в баллоне лампы укорачивало бы срок службы нити накала, а вследствие ионизации воздуха летящими в нем электронами возникал бы ионный ток, мешающий нормальной работе лампы.

Для получения анодного тока в лампе с катодом прямого накала ее включают в электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 78. На этой схеме буквой *А* обозначен анод лампы, буквой *К* — нить накала. *Бн* — батарея аккумуляторов или гальванических элементов для накаливания катода. Эту батарею называют батареей накала. Для накала катода малоомощных ламп употребляют батареи с э. д. с. порядка нескольких (4—6) в. *Ба* — батарея аккумуляторов (небольшой емкости) или гальванических элементов, положительный полюс которой соединяется с анодом лампы, а отрицательный — с нитью накала. Эту батарею называют батареей анода. Для малоомощных ламп употребляют анодные батареи с э. д. с. порядка нескольких десятков (80—100) в. В установке, изображенной на рис. 78, различают две следующие электрические цепи: 1) цепь накала, состоящую из батареи накала, проводов и нити накала, и 2) анодную цепь, состоящую из батареи, проводов и пространства внутри лампы между анодом и катодом. Имея в виду электронное направление тока (техническое направление противоположно электронному), можно проследить путь тока в обеих указанных цепях. В цепи накала электроны идут от отрицательного полюса батареи накала по проводу к катоду и дальше по другому проводу — к положительному полюсу батареи накала. В анодной цепи электроны идут от отрицательного полюса анодной батареи по проводу к нити накала, от нее внутри лампы от катода к аноду и, наконец, от него по проводу к положительному

положусь батареи анода. (Внутри батареи накала и батареи анода ток представляет собою, как известно, поток ионов.)

Анодный ток можно измерить, включив в анодную цепь миллиамперметр. Анодный ток в маломощных лампах — порядка десятков миллиампер. Разность потенциалов между анодом и катодом называют анодным напряжением или напряжением на аноде. Оно может быть измерено вольтметром, включаемым между анодом и катодом (рис. 78). Схема включения в электрическую цепь лампы с подогревным катодом дана на рис. 79. Цепь накала самостоятельна, не соединена с цепью анода.

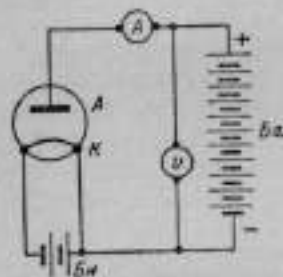


Рис. 78. Схема установки для обнаружения анодного тока в диоде с катодом прямого накала.

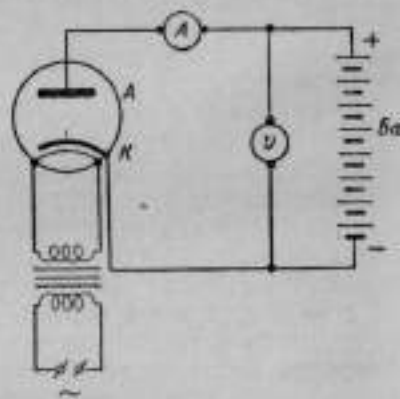


Рис. 79. Схема включения в цепь анода с подогревным катодом.

Установим экспериментально свойства электронной лампы, а также установим, от чего и как зависит величина анодного тока. Соберем установку по схеме рис. 78 (или рис. 79, в зависимости от типа взятой электронной лампы), включив в цепь накала и в анодную цепь рубильники, а вместо миллиамперметра — гальванометр (магнито-электрической системы).

1. В соответствии со сказанным выше, очевидно, что анодный ток появляется в анодной цепи лампы только в том случае, если аноду сообщен положительный потенциал. Если анод имеет отрицательный потенциал, то электроны, вышедшие из нити, сами имеющие отрицательные заряды, на анод не попадут. Ток в цепи лампы не будет.

Лампа размыкает цепь. (Употребляют выражение: «лампа заперта для тока».)

Убедимся в этом. Замкнем анодную цепь. Ток в ней не обнаруживается: катод не накален, термоэлектронной эмиссии не происходит, вакуум в лампе создает разрыв цепи между катодом и анодом.

Замкнем цепь накала. Через некоторое время стрелка гальванометра отклонится. Катод накался, появилось электронное облачко, под действием сил электрического поля анода электроны с облачка переходят на анод. Разрыв в анодной цепи замыкается потоком электронов. В анодной цепи появился ток. Разомкнем цепь анода и подключим к аноду лампы отрицательный полюс анодной батареи, а положительный полюс ее — к катоду лампы. Замкнем цепь анода. Ток через лампу не пойдет.

Итак — *электронная лампа обладает односторонней проводимостью, пропуская ток только в одном направлении.*

2. Исследуем, как зависит анодный ток от температуры катода. Присоединим положительный полюс анодной батареи к аноду лампы, а отрицательный полюс батареи к катоду. В цепь накала введем реостат. Учтем, что температура катода зависит от величины тока накала. Замкнем анодную цепь и цепь накала и будем изменять температуру катода (изменяя величину тока накала), наблюдая за изменениями анодного тока.

Анодный ток увеличивается с повышением температуры катода (с увеличением тока накала).

3. Исследуем зависимость анодного тока от напряжения на аноде. Дадим нити накала лампы нормальный для нее ток и не будем его изменять. Температура катода будет постоянной. Напряжение, подаваемое на анод, будем постепенно увеличивать от нуля до того максимального, какое может дать анодная батарея (постепенно увеличивая количество элементов батареи, включенных в цепь). Наблюдая за показаниями гальванометра, обнаруживаем, что когда напряжение на аноде равно нулю — анодный ток тоже равен нулю. Затем, по мере увеличения анодного напряжения, возрастает и анодный ток, сначала медленно, а затем более быстро. Дальше возрастание анодного тока опять замедляется и, наконец, вовсе прекращается, несмотря на то, что напряжение на аноде продолжает увеличиваться.

Максимальный анодный ток, величина которого не изменяется с повышением анодного напряжения, называется током насыщения.

Измерив значения анодного напряжения и соответствующие им значения анодного тока, можно построить график зависимости между этими величинами. График зависимости анодного тока двухэлектродной лампы от анодного напряжения называют характеристикой лампы.

На рис. 80 изображена характеристика одного из диодов. На оси ординат отложен анодный ток в миллиамперах, а на оси абсцисс — анодное напряжение в вольтах.

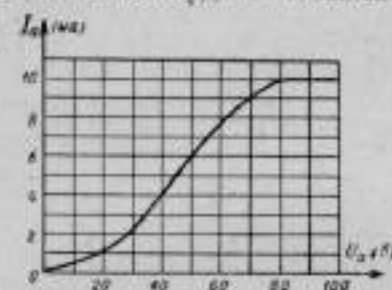


Рис. 80. График зависимости анодного тока двухэлектродной лампы от анодного напряжения.

Из графика видно, что ток насыщения в 10 мА наступил при анодном напряжении в 80 в. Как можно объяснить установленную нами зависимость между анодным током и напряжением на аноде? Когда напряжение на аноде равно нулю, электроны (электронного облачка) не притягиваются к аноду. Ток нет. Если анод имеет положительный потенциал, то под действием сил электрического поля между анодом и катодом наиболее удаленные от катода электроны летят к аноду. Появился анодный ток. По мере увеличения анодного напряжения увеличивается количество электронов, летящих из электронного облачка к аноду. Анодный ток растет. И наконец, при достаточно большом напряжении на аноде все вылетающие из катода электроны принимают участие в образовании тока. Электронное облачко вокруг катода исчезает. Наступает ток насыщения. Дальнейшее увеличение анодного напряжения не вызывает возрастания анодного тока.

Очевидно, что ток насыщения определяет эмиссию катода, измеряемую общим зарядом электронов, испускаемых катодом в каждую секунду.

Установлено, что эмиссия катода увеличивается с повышением температуры. Поэтому с возрастанием накала нити (при одном и том же анодном напряжении) увеличивается эмиссия катода, а значит, и анодный ток.

Методические указания

Общие представления об устройстве и действии двухэлектродной электронной лампы учащиеся уже имеют. Здесь эти сведения следует повторить, привести в систему. Некоторые детали устройства лампы (применение геттеров, активация катода и т. д.), очень важные для учителя, на уроке могут быть опущены. Существенно, чтобы учащиеся хорошо представляли себе следующее: 1) устройство диода (имея в виду основное, самое существенное); 2) цепь накала и анодную цепь в схеме диода; 3) одностороннюю проводимость диода и 4) зависимость анодного тока от температуры катода и величины анодного напряжения. Первые три пункта нужны для рассмотрения кенотронного выпрямителя. Последний пункт связан с очень важными свойствами диода, о которых умолчать невозможно и которые, кроме того, понадобятся в следующей теме в связи с изучением физических основ радиопередачи.

Рассказывая об электронных лампах, следует показать учащимся как целые лампы, так и лампы с разбитым стеклянным баллоном.

Если раньше опыт, демонстрирующий появление анодного тока, не был показан, то его следует показать теперь. С этой целью можно воспользоваться любым кенотроном, соединив два его анода вместе. Если под руками не окажется кенотрона, то можно взять триод, соединив его сетку с анодом.

Установка может быть собрана по схеме рис. 78. Анодная батарея должна быть такой, чтобы на анод можно было подавать напряжение до 100—120 в.

Пользуясь такой установкой, можно легко показать зависимость анодного тока от температуры нити накала (изменяя реостатом ток в цепи накала) и зависимость анодного тока от напряжения на аноде (изменяя потенциал его). Если нужной анодной батареи не найдется, то можно воспользоваться любым кенотронным выпрямителем. В методическом отношении этот путь менее удачен, так как устройство и действие такого выпрямителя учащимся еще не известно.

Напряжение от выпрямителя на анод лампы удобно подавать с помощью потенциометра. В качестве последнего можно использовать достаточно большого сопротивления реостат с подвижным контактом. Схема установки

дана на рис. 81. Клеммы реостата должны быть подключены к выводным клеммам выпрямителя. Передвигая движок потенциометра влево (рис. 81), можно сообщить аноду различной величины отрицательный потенциал, а перемещая движок вправо — положительный потенциал. Удобно воспользоваться потенциометром и при наличии анодной батареи. Способ включения такой же, как и в случае выпрямителя. На рис. 78 потенциометр сознательно не указан, чтобы не усложнять чертеж, который должны уметь делать и учащиеся. Если учащиеся ясна идея, лежащая в основе потенциометра, и они владеют графическими навыками, то этого упрощения на чертеже можно не делать.

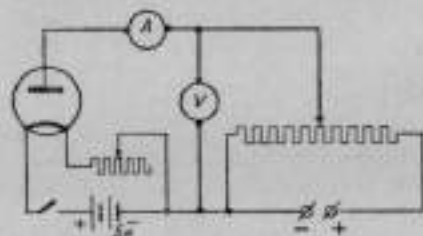


Рис. 81. Схема установки для демонстрации зависимости анодного тока от температуры катода и от напряжения на аноде.

По поводу зависимости анодного тока от напряжения на аноде полезно иметь в виду следующее.

Анодный ток при нулевом напряжении на аноде не равен нулю, хотя и очень невелик. Объясняется это тем, что вылетающие из катода электроны имеют различную скорость, а значит, и энергию. Часть вылетающих электронов имеет энергию, достаточную для преодоления противодействия со стороны заряда электронного облачка (заряд облачка называют объемным зарядом). Эти электроны доходят до анода и создают слабый анодный ток. По этой причине анодный ток становится равным нулю только при небольшом отрицательном напряжении на аноде (порядка десятых долей вольта).

Ток насыщения, строго говоря, не остается неизменным, а несколько растет с увеличением напряжения на аноде. Обусловлено это обстоятельство двумя причинами: вырыванием электронов из катода полем анода и дополнитель-

ным нагревом катода анодным током. Обе указанные причины увеличивают эмиссию катода, а значит, и анодный ток. Особенно сильно сказывается это явление (возрастание тока насыщения) в лампах с оксидным катодом. У ламп с вольфрамовым катодом ток насыщения выражен значительно более резко. Разумеется, рассказывать учащимся обо всех этих деталях на уроке нет необходимости.

§ 24. Кенотронный выпрямитель. Ионные выпрямители

Односторонняя проводимость диода используется для выпрямления переменного тока. В анодной цепи лампы ток идет только в том случае, если аноду сообщен положительный потенциал. Поэтому, если включить между анодом и катодом лампы источник переменного напряжения, например генератор переменного тока и тот или иной приемник электрической энергии (рис. 82), то в анодной

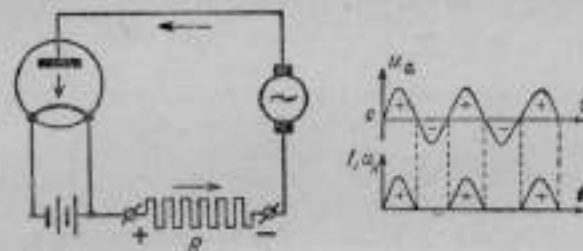


Рис. 82. Схема кенотронного выпрямителя и графическое изображение процесса выпрямления переменного тока.

цепи лампы произойдет следующее. Анод лампы получает попеременно то положительный, то отрицательный потенциал. Во время тех полупериодов переменного тока, когда анод лампы получает положительный потенциал, ток по цепи идет, в те же полупериоды, когда анод получает отрицательный потенциал, лампа заперта и ток в анодной цепи не идет. При этом значение положительного потенциала анода в течение каждого положительного полупериода будет изменяться (возрастать от нуля до максимума и затем падать до нуля) в соответствии с тем, как меняется напряжение на полюсах генератора.

Вспомни, что величина анодного тока зависит от напряжения на аноде, мы приходим к выводу, что в анодной цепи диода (а значит, и в приемнике электрической

энергии) пойдет ток одного направления, но изменяющийся по величине.

Ток одного направления, но изменяющийся по величине, называется пульсирующим током.

Графическое изображение процесса выпрямления переменного тока дано на правой части рис. 82. Верхний график изображает переменное напряжение на аноде,

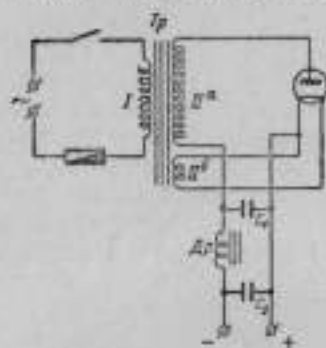


Рис. 83. Схема однополупериодного кенотронного выпрямителя.

нижний — пульсирующий ток в цепи и напряжение на нагрузочном сопротивлении R (на приемнике электрической энергии). Электроны, вышедшие из катода, идут внутри лампы от катода к аноду, а дальше их движение имеет направление от анода к катоду. Таково электронное направление тока. Имея в виду, что техническое направление тока противоположно электронному, за направление тока во внешней цепи лампы надо принимать направление от катода к аноду. Таким образом, конец нагрузочного сопротивления, соединенный с катодом, имеет положительный потенциал, а другой его конец — отрицательный потенциал. Техническое направление выпрямленного тока указано стрелками на левой части рис. 82. *Электронные лампы, предназначенные для выпрямления переменного тока, называются кенотронами, а выпрямители с такой лампой — кенотронными выпрямителями.*

Практически кенотронный выпрямитель подключается к сети переменного тока с помощью трансформатора. Первичная обмотка трансформатора (рис. 83, I) включается в сеть, а во вторичную (повышающую) обмотку включается кенотрон (обмотка II на рис. 83). Обмотка II трансформатора служит для питания нити накала кенотрона. Приемник энергии подключается к зажимам выпрямителя, обозначенным на рис. 83 знаками плюс и минус (имеется в виду техническое направление тока).

На нижней части рис. 83 показан так называемый сглаживающий фильтр, назначение которого состоит в сле-

дующем. Пульсирующий ток, принадлежа к числу несинусоидальных токов, вместе с тем является одним из тех сложных токов, о которых шла речь в § 3. На рис. 6 изображен сложный переменный несинусоидальный ток, являющийся суммой двух переменных синусоидальных токов. Оказывается, что пульсирующий ток представляет собой сумму двух токов: постоянного и синусоидального переменного тока. Это обстоятельство может быть проверено экспериментально. Если по одной и той же цепи пропускать постоянный и синусоидальный переменный ток (выключив в эту цепь генератор постоянного и генератор



Рис. 84. Сложение постоянного и синусоидального переменного токов.

переменного тока), то в цепи будет обнаружен пульсирующий ток. (Амплитуда переменного тока не должна быть больше величины постоянного тока.)

К тому же выводу можно прийти графически — путем сложения графиков постоянного тока и синусоидального переменного тока. На рис. 84 изображен график постоянного тока (прямая, параллельная оси времени) и график синусоидального переменного тока (синусоида, расположенная своими частями выше и ниже оси времени). Это — составляющие токи. Сложим эти токи, учитывая их направление, и найдем результирующий ток. В начальный момент времени переменный ток равен нулю, а сумма токов равна величине постоянного тока (точка a на рис. 84). В течение первой четверти периода переменный ток возрастает и имеет такое же направление, как и ток постоянный. Результирующий ток тоже увеличивается и к концу первой четверти периода переменного тока достигает максимального значения (точка b на рис. 84). В течение второй

четверти периода переменный ток уменьшается до нуля, а результирующий — до значения величины постоянного тока (точка *c*). В третью четверть периода переменный ток имеет направление, обратное постоянному, и по абсолютному значению растет. Результирующий ток становится меньше значения постоянного тока и уменьшается до нуля (точка *d*). В четвертую четверть периода переменный ток, имея по-прежнему направление, обратное постоянному току, уменьшается. Результирующий ток возрастает, достигая к концу этой четверти периода значения постоянного тока (точка *e*). Далее этот процесс повторяется сначала. Полученная результирующая кривая есть график пульсирующего тока, тока одного направления (вся кривая лежит выше оси времени), но изменяющегося по величине. Пульсирующий ток, изображенный на правой части рис. 82, отличается от полученного нами сейчас только тем, что он является пульсирующим *прерывистым* током. Вывод, к которому мы пришли, справедлив и для прерывистого тока.

Итак, *пульсирующий ток является сложным током, состоящим из постоянного тока и синусоидального переменного тока.*

Постоянный ток называют *постоянной составляющей пульсирующего тока*, а синусоидальный переменный ток — *переменной составляющей пульсирующего тока*. Очевидно, что уменьшение переменной составляющей приведет к все большему приближению пульсирующего тока к постоянному, т. е. не изменяющемуся не только по направлению, но и по величине.

Упомянутый выше сглаживающий фильтр в выпрямителе предназначен для пропускания постоянной составляющей пульсирующего тока в нагрузочное сопротивление и для отведения от него переменной составляющей.

Фильтр состоит (см. рис. 83) из двух конденсаторов C_1 и C_2 (порядка десятков микрофард) и дросселя Dr (порядка десятков генри).

Дроссель представляет собой катушку индуктивности, состоящую из стального замкнутого сердечника, на который намотано большое число (тысячи) витков изолированного провода. Медный провод дросселя оказывает постоянной составляющей небольшое сопротивление, пропуская ее в нагрузочное сопротивление. Тот же дроссель оказывает переменной составляющей очень большое со-

противление. Конденсатор C_1 , не пропуская через себя постоянную составляющую, оказывает небольшое сопротивление переменной составляющей, которая через него возвращается обратно в выпрямитель. Назначение конденсатора C_2 — отвести от нагрузочного сопротивления ту часть переменной составляющей, которая может пройти через дроссель. При этом конденсатор C_1 не только сглаживает пульсации, но и повышает постоянную составляющую выпрямленного напряжения. Дело в том, что конденсатор C_1 при нарастании напряжения быстро заряжается от выпрямителя, а когда напряжение уменьшается, конденсатор медленно разряжается через дроссель на нагрузочное сопротивление, задерживая уменьшение напряжения. Далее конденсатор вновь быстро заряжается, после чего снова поддерживает напряжение на заданном уровне выпрямителя и т. д. Разрядиться через лампу конденсатор C_1 не может, так как для тока от анода к катоду лампа закрыта. В результате совместного действия конденсаторов и дросселя пульсации напряжения сильно сглаживаются. В итоге напряжение и ток становятся постоянными по величине.

В рассмотренном нами выпрямителе используются полупериоды переменного тока только одного направления. Такой выпрямитель называют *однополупериодным выпрямителем*.

Обычно применяют кенотронные лампы с двумя анодами, что дает возможность использовать оба полупериода (положительный и отрицательный) переменного тока. Выпрямитель в этом случае называют *двухполупериодным*. Схема его показана на рис. 85. Повышающая обмотка трансформатора должна давать напряжение в два раза большее, чем при однополупериодном выпрямлении. Она имеет вывод от средней точки, являющийся отрицательным полюсом выпрямителя.

Нить лампы накаливается переменным током от отдельной обмотки трансформатора (II^0 на рис. 85), повышающей напряжение сети до напряжения, нужного для накала нити. Вывод от средней точки этой обмотки (или один из концов нити накала) служит положительным полюсом выпрямителя. (Имеется в виду техническое направление тока.) Аноды кенотрона работают поочередно. В первую половину периода ток идет (имеется в виду электронное направление тока) от того анода, который имеет поло-

жительный потенциал, и дальше, пройдя через одну из половин повышающей обмотки, выходит во внешнюю цепь. Во вторую половину периода положительный потенциал получает уже другой анод; ток от него, пройдя через другую половину повышающей обмотки, выходит во внешнюю цепь. Таким образом, во внешней цепи идет ток одного направления. И этот ток, как и в случае однополупериодного выпрямления, пульсирующий.

На правой части рис. 85 приведено графическое изображение выпрямленного переменного тока таким выпрями-

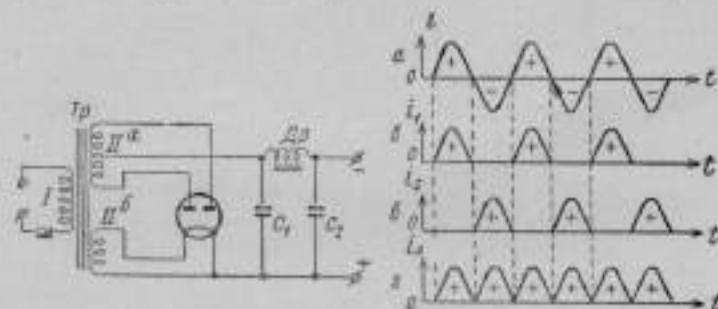


Рис. 85. Схема двухполупериодного кенотронного выпрямителя и графическое изображение процесса выпрямления переменного тока.

телем (без фильтра). Др, C_1 и C_2 на этом рисунке — сглаживающий фильтр, назначение которого такое же, как и в однополупериодном выпрямителе.

Кенотронные выпрямители применяются для питания установок, не требующих значительных по величине токов. В частности, кенотронные выпрямители получили широчайшее применение в радиотехнике.

Для получения выпрямленного тока порядка нескольких десятков ампер применяют *газотроны* и *тиратроны*. Газотрон представляет собой двухэлектродную электронную лампу, отличающуюся от кенотрона тем, что в баллоне лампы вместо вакуума находятся разреженные пары ртути (давление порядка 0,001 мм рт. ст.) или инертный газ (аргон, давление порядка нескольких миллиметров рт. ст.). Испускаемые катодом электроны ионизируют пары ртути (или газ). Получаются дополнительные свободные электроны за счет ионизации, а также за счет нейтрализации объемного заряда положительными ионами. В итоге

анодный ток получается значительно больший, чем в кенотронах.

Тиратрон представляет собой газотрон, имеющий третий электрод — сетку. Изменяя величину отрицательного потенциала на сетке, можно управлять запуском тиратрона. Чем больше отрицательный потенциал сетки, тем при более высоком анодном напряжении начинает работать тиратрон.

Наиболее мощными выпрямителями являются *ртутные выпрямители*. Источником электронов в этих выпрямителях является нагретый электрической дугой участок жидкой ртути, находящейся в баллоне выпрямителя. Вылетающие из жидкого катода электроны ионизируют пары ртути, которыми заполнен баллон. По материалу, из которого изготовлен баллон, различают стеклянные и металлические ртутные выпрямители. Стеклянные выпрямители рассчитаны на ток до 500 а при напряжении до 600 в или до 20 а при напряжении до 15 000 в. Металлические — на ток до 5000 а при напряжении до 800 в или до 200 а при напряжении до 50 000 в.

Методические указания

Кенотронные выпрямители играют очень большую роль в современной технике. Поэтому ознакомление с ними учащихся имеет крайне существенное значение. Имея в виду недостаток времени, можно на уроке основательно разобрать только принципиальную схему кенотронного выпрямителя (см. рис. 82). Однако очень желательно ознакомить учащихся с включением выпрямителя в сеть (см. рис. 83) и с двухполупериодным выпрямителем (см. рис. 85). По этому материалу можно на следующем уроке не спрашивать всех учащихся, а иметь в виду только наиболее сильных и особо интересующихся физикой учащихся. То же самое надо сказать и о сглаживающем фильтре в выпрямителе. Сглаживающий фильтр — прекрасный пример использования в технике свойств конденсатора и катушки индуктивности. Соответствующие схемы (см. рис. 83 и 85) в целях экономии времени на уроке могут быть приготовлены заранее.

Исключительно велико значение пульсирующего тока в радиотехнике. К сожалению, для сколько-нибудь основательного рассмотрения этого вопроса времени на уроке

не хватает. Следует изыскать пути для факультативного ознакомления учащихся со свойствами пульсирующего тока или очень кратко, в самых общих чертах рассказать о них на уроке, что значительно облегчит учащимся усвоение материала следующей темы — рассмотрение радио-приемных и передающих устройств. При этом следует учесть, что мысль о том, что пульсирующий ток является сложным и что „в состав“ его входит ток переменный, оказывается для учащихся новой и довольно трудно воспринимаемой, так как обычно пульсирующий ток в их представлении отождествляется с постоянным. Эти затруднения могут быть в значительной мере преодолены, если, помимо соображений, приведенных в настоящем параграфе, указать учащимся, что *пульсирующий ток по своим свойствам отличен от постоянного*. Так, если пропускать постоянный ток по первичной обмотке трансформатора, то во вторичной обмотке его индукционный ток не возникает. Если же по первичной обмотке пропускать пульсирующий ток, то во вторичной обмотке трансформатора возникнет индукционный ток. Больше того, этот ток есть ток переменный, так как при возрастании пульсирующего тока в первичной обмотке трансформатора индукционный ток во вторичной обмотке имеет одно направление, а при уменьшении пульсирующего тока индукционный ток имеет направление, обратное первому. Насколько важны указанные представления для осознанного восприятия учащимися последующего материала, можно судить хотя бы по тому, что без этих представлений будет невозможно понимание учащимися принципа действия передатчика для радиотелефонии (модуляции колебаний). В самом деле, в цепи микрофона, включенного в первичную обмотку трансформатора, в результате изменяющегося вдавливания мембраны микрофона на угольные зерна имеет место *ток одного направления*, но изменяющийся по величине. На вторичной обмотке микрофонного трансформатора возникает *переменное* напряжение, подаваемое на сетку генераторной лампы. Кому из учителей физики не известен этот постоянный „камень преткновения“ для учащихся! Опыт свидетельствует о том, что преодоление таких „неожиданно“ возникающих затруднений требует значительно больше времени, чем то, какое нужно для своевременной подготовки учащихся к пониманию последующего материала.

Применительно к сложению постоянного тока и синусоидального переменного тока, рассмотренного на стр. 197—198, полезно учесть следующее.

В рассуждениях на указанных страницах говорится, что результирующий ток есть пульсирующий *несинусоидальный ток*. Однако рассматривая график рис. 84, учащиеся могут прийти к выводу, что график пульсирующего тока (кривая *abcde* на рис. 84) есть синусоида. Во избежание подобной ошибки полезно обратить внимание учащихся на то, что *все точки кривой abcde* на графике рис. 84 *лежат выше оси времени*. Следовательно, пульсирующий ток, непрерывно изменяясь по величине, сохраняет свое направление неизменным.

Краткие сведения об ионных выпрямителях, имеющиеся в конце параграфа, выходят за пределы обязательного для всех учащихся учебного материала. Но сказать всем учащимся, что, помимо кенотронных выпрямителей, существуют значительно более мощные, — необходимо.

§ 25. Твердые (полупроводниковые) выпрямители

Выпрямляющее действие твердого полупроводникового выпрямителя тоже основано на односторонней проводимости его.

Свое название полупроводники получили потому, что в отношении электропроводности они занимают среднее место между металлами, являющимися хорошими проводниками электричества, и изоляторами, которые почти совсем не проводят тока. Высокая электропроводность металлов обусловлена наличием в них свободных электронов, которые под действием сил электрического поля приходят в ориентированное движение и тем самым создают ток. В изоляторах электроны прочно связаны со своими атомами, а в полупроводниках эта связь настолько слаба, что в результате некоторых воздействий на полупроводник (например, теплота, свет) в нем освобождаются электроны и потому электропроводность полупроводника весьма сильно повышается. В настоящее время полупроводники широко применяются в радиотехнике и электронике, в электротехнике постоянного тока, в автоматике и сигнализации, в осветительной технике.

Здесь мы кратко остановимся на том свойстве полупроводников, которое позволило использовать их в целях

выпрямления переменного тока. Оно состоит в том, что место контакта металла с рядом полупроводников обладает способностью хорошо проводить ток в одном направлении и плохо — в другом.

На рис. 86 дана принципиальная схема полупроводникового выпрямителя. Он состоит из металлической пластины (левая на рис. 86) и полупроводника, наложенных друг на друга. На границе металла с полупроводником, в результате взаимодействия между ними, появляется тонкий слой (толщиной порядка 10^{-6} см), называемый *запирающим (или запиорным) слоем*. Он обладает односторонней проводимостью. Правая на рис. 86 металлическая пластина служит для образования контакта с полупроводником.

Если подключить электрод-проводник (левую пластину на рис. 86) к отрицательному полюсу источника постоянного тока, а электрод-полупроводник (через правую пластину на рис. 86) к положительному полюсу источника постоянного тока, то по цепи пойдет ток; его называют прямым или пропускным током. Свободные электроны проводника под действием сил электрического поля проходят через запирающий слой и полупроводник. Если проволка от источника постоянного тока поменять местами, то по цепи опять пойдет ток (его называют обратным или запиорным током), но он будет в сотни и тысячи раз меньше прямого тока. В этом случае запирающий слой препятствует переходу электронов от полупроводника к проводнику. Поэтому его и называют запирающим слоем. Очевидно, если включить выпрямитель в цепь переменного тока, то в цепи установится ток одного направления (обратным током можно пренебречь), но изменяющийся по величине. В верхней части рис. 86 показано условное обозначение полупроводникового выпрямителя. Полупроводниковые выпрямители часто называют вентилями. В настоящее время наибольшее распространение получили купроксные (меднозакисные) и селеновые выпрямители.

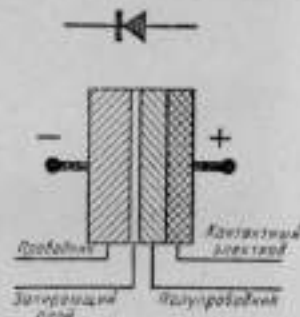


Рис. 86. Схематический чертеж полупроводникового выпрямителя и условное его обозначение.

КУПРОКСНЫЙ (МЕДНОЗАКИСНЫЙ) ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Купроксный выпрямитель состоит из медной пластины (круглой или прямоугольной формы), контактирующей с полупроводником — закисью меди (Cu_2O). Между ними образуется запирающий слой. К закиси меди прижимается контактная сляинцовая пластина, к которой прилегает тонкая медная пластина, имеющая большие размеры, чем все остальные пластины. Все пластины монтируются на болте. Последнюю пластину называют радиаторной. Она служит для отвода тепла, выделяющегося в выпрямителе при прохождении по нему тока. Отводить тепло необходимо потому, что при температуре выше 50° выпрямитель теряет свои вентильные (выпрямительные) свойства. Прилагаемое к выпрямителю переменное напряжение не должно быть выше некоторой нормы (3—5 в), так как при более высоком напряжении наступает пробой слоя закиси меди. Для выпрямления более высоких напряжений отдельные элементы выпрямителя (как тот, который только что нами описан) соединяются последовательно друг с другом, стягиваются общим болтом и образуют так называемый столбик выпрямителя.

СЕЛЕНОВЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Элемент селенового выпрямителя состоит из железной никелированной пластины, покрытой с одной стороны слоем полупроводника — селена. На селен наносится слой сплава олова, кадмия и висмута. При начальной обработке выпрямителя (длительный нагрев и пропускание тока) на границе между селеном и сплавом образуется запирающий слой. К слою сплава прилегает контактная латунная шайба. Селеновые элементы тоже собираются в столбики. Допустимое напряжение для селенового выпрямителя больше, чем для купроксного примерно в два раза. Селеновые выпрямители имеют меньшие, чем купроксные выпрямители, размеры и вес (при том же выпрямляемом напряжении) и постепенно вытесняют купроксные выпрямители.

Столбики купроксных и селеновых выпрямителей, так же как и двухэлектродные лампы (кенотроны), включаются по схеме однополупериодного и двухполупериодного выпрямления. На рис. 87а схема однополупериодного полупроводникового выпрямителя, на рис. 87б —

двухполупериодного. Работают они так же, как кенотронные выпрямители. В первом случае (рис. 87а) ток из вторичной обмотки трансформатора проходит через выпрямитель и последовательно соединенное с обмоткой нагрузочное сопротивление R только в течение одного полупериода переменного тока.

Во втором случае (рис. 87б) выпрямители работают поочередно (как два анода в двуханодном кенотроне). В одну половину периода ток проходит через одну поло-

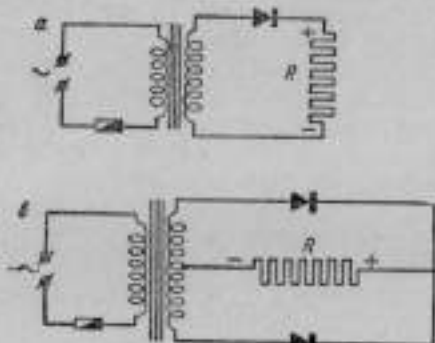


Рис. 87. Схема полупроводникового выпрямителя: а — однополупериодного, б — двухполупериодного.

вину вторичной обмотки трансформатора, через выпрямитель и нагрузочное сопротивление R . В течение другой половины периода ток проходит через вторую половину вторичной обмотки трансформатора, через выпрямитель и нагрузочное сопротивление. При этом в приемнике энергии R оба тока проходят друг за другом в одном направлении и создают общий выпрямленный ток.

Коэффициент полезного действия купроксных выпрямителей 70—75%, селенового — порядка 80%. К. п. д. выпрямителей, работающих от трансформатора, ниже указанных (около 50%).

Полупроводниковые выпрямители при правильной эксплуатации надежны в работе, просты в обращении, имеют длительный срок службы (несколько тысяч часов).

Основной недостаток купроксных и селеновых выпрямителей состоит в том, что они пригодны для получения выпрямленного тока небольшой величины.

Полупроводниковые выпрямители применяются для питания электролитических ванн, для зарядки аккумуляторных батарей, в радиотехнике, в измерительной технике и в автоматике.

ГЕРМАНИЕВЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

В последнее время наша промышленность освоила выпуск выпрямителей с полупроводником из германия. Допустимая для этого полупроводника плотность тока (величина тока на единицу площади) во много раз больше плотности тока, допустимой в селеновых и купроксных выпрямителях. Это позволило создать компактные, небольших размеров германиевые выпрямители, дающие выпрямленный ток в сотни ампер. Новые выпрямители уже использованы в электросварочных аппаратах.

Коэффициент полезного действия германиевого выпрямителя превышает 95%.

Методические указания

В наше время полупроводники широко применяются в современной технике. Необходимо сказать учащимся хотя бы несколько фраз о том, что представляют собой полупроводники с физической точки зрения.

Теория односторонней проводимости полупроводников весьма сложна. Она связана с нелегким понятием о так называемом дырочном токе, с квантовой теорией. Поэтому в тексте настоящего параграфа излагается только фактическая сторона дела, а вопрос о «механизме» односторонней проводимости полупроводниковых выпрямителей совершенно не затрагивается. Имеется только ссылка на опытно установленный факт вентильного действия запирающего слоя.

Самому учителю физики полезно учесть, что с современной точки зрения выпрямление в твердом выпрямителе происходит не на границе между полупроводником и металлом, как это считалось до недавнего времени, а в самом полупроводнике. Дело в том, что полупроводник в результате взаимодействия с металлом, с которым он контактируется, физически изменяется. Если полупроводник электронной проводимости, то часть его, граничащая с металлом, обедняется электронами, так как они частично переходит в металл. Образуется обедненный электронами

слой пониженной электропроводности — запирающий слой. (Электроны переходят с полупроводника в металл, если энергия электронов в металле меньше энергии электронов в полупроводнике. Эти условия и нужны для создания запирающего слоя.) В итоге, слой полупроводника, граничащий с металлом, отличается от остальной части полупроводника концентрацией электронов.

Если полупроводник дырочной проводимости, то из полупроводника в металл переходят дырки. И в этом случае в полупроводнике возникает запирающий слой, обедненный дырками и, следовательно, пониженной проводимости. Выпрямление происходит при переходе тока из полупроводника одного типа (обедненного электронами или дырками) в полупроводник другого типа (другой концентрации электронов или дырок).

В селеновом выпрямителе выпрмление тока происходит на границе между селеном, обладающим дырочной проводимостью, и селенистым кадмием (получающимся в процессе обработки выпрямителя), обладающим электронной проводимостью. И здесь, как видим, имеет место переход тока из полупроводника одного типа в полупроводник другого типа. (При одном направлении приложенного напряжения дырки в одном полупроводнике и электроны в другом движутся навстречу друг другу и создают прямой ток. При другом направлении напряжения они расходятся. Сопротивление запирающего слоя становится большим.)

Особый интерес представляет германиевый выпрямитель. Чистый германий обладает электронной проводимостью. Однако введение в него ничтожных количеств некоторых других атомов изменяет его проводимость на дырочную.

Германиевый выпрямитель представляет собой пластину из чистого (электронной проводимости) германия, на поверхности которой создан тонкий слой германия дырочной проводимости. При переходе тока из одного полупроводника в другой происходит выпрмление тока.

Так как допустимая плотность тока для германиевого выпрямителя во много раз больше, чем для других, его техническое значение как компактного и мощного выпрямителя исключительно велико. Основное затруднение заключается в получении совершенно чистого германия, так как ничтожное количество примесей (миллионные доли процента) изменяют тип его проводимости.

Основное для учащихся в данном параграфе — это принципиальная схема полупроводникового выпрямителя, принцип его действия (без теоретических основ) и общие представления о купроксном и селеновом выпрямителех.

Во многих школах имеются купроксные и селеновые выпрямители. Их следует показать учащимся, сняв защитный кожух, чтобы были видны отдельные элементы выпрямителя и его столбики.

ГЛАВА IV

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 26. Генератор постоянного тока

Постоянный ток для удовлетворения нужд народного хозяйства получается не только путем выпрямления переменного тока, но и вырабатывается непосредственно генераторами постоянного тока. В генераторе постоянного тока так же, как и в генераторах переменного тока, механическая энергия преобразуется в электрическую. Принцип действия генератора постоянного тока состоит в следующем.

В § 3 было установлено, что если виток, равномерно вращающийся в однородном магнитном поле, замкнуть посредством двух колец, к которым припаяны концы витка, и посредством щеток на внешнюю цепь, то по цепи пойдет синусоидальный переменный ток. Схематический чертеж витка дан на рис. 1, а график тока — на рис. 5. Для того чтобы получить по внешней цепи ток одного направления, концы витка следует присоединить не к двум кольцам, а к двум изолированным друг от друга половинкам одного и того же кольца (рис. 88). Щетки должны быть расположены так, чтобы при вращении витка и полуколец они одновременно переходили с одного полукольца на другое в те моменты времени, когда виток переходит через нейтральную плоскость. В эти моменты времени э. д. с. индукции в обоих проводах витка равна нулю. На рис. 88, 1 показано мгновенное положение витка, перпендикулярное к нейтральной плоскости, а на рис. 88, 2 — тот же виток после того, как он в процессе своего движения повернется на угол в 180° и проводники ad и bc поменяются своими местами.

При вращении витка каждый из его проводов ad и bc движется по окружности, попеременно находясь то против северного полюса магнита (при движении по одной

половине окружности), то против южного полюса магнита (при движении по другой половине окружности). Направление тока в витке может быть определено с помощью правила правой руки. При вращении витка, изображенного на рис. 88, по часовой стрелке в каждом из проводов ad и bc , когда он находится против южного полюса, ток направлен на наблюдателя, а когда любой из проводов находится против северного полюса, ток в нем направлен от наблюдателя. Смена направления тока происходит при переходе витка

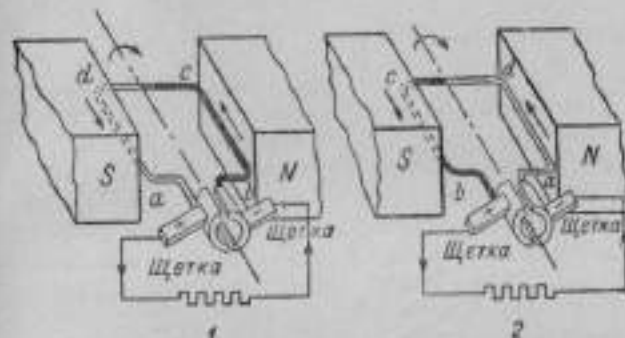


Рис. 88. Схематический рисунок генератора постоянного тока.

через нейтральную плоскость, и в этот же момент времени полукольца меняются своими местами. На рис. 88 видно, что левая щетка все время соединена с проводом, движущимся перед южным полюсом, а правая щетка — с проводом, движущимся перед северным полюсом. Следовательно, ток постоянно выходит во внешнюю цепь из левой щетки, а возвращается в виток через правую щетку. В итоге — во внешней цепи идет ток одного направления, но изменяющийся по величине. Напряжение на щетках остается неизменным по направлению. Таким образом, посредством изолированных друг от друга полуколец переменный ток, индуцируемый в витке, выпрямляется и с помощью щеток отводится во внешнюю цепь.

Такое устройство, в простейшем случае состоящее из двух изолированных друг от друга полуколец, называется *коллектором*, а каждое полукольцо — *пластиной коллектора*.

На рис. 89 даны графики переменного тока в витке (пунктирной синусоидой) и график выпрямленного пульсирующего тока во внешней цепи (сплошной линией).

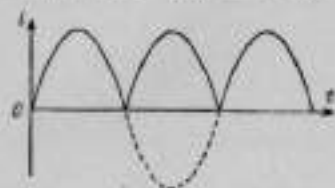


Рис. 89. График переменного тока в витке (см. рис. 88) и пульсирующего тока во внешней цепи.

Основными частями генератора постоянного тока являются: 1) магнитная система (индуктор), создающая магнитное поле; 2) якорь, в обмотке которого индуцируется переменная э. д. с; 3) коллектор со щетками, назначение которого — выпрямить переменный ток, даваемый якорем, и отводить его во внешнюю цепь.

Принципиальная схема генератора постоянного тока дана на рис. 90.

В устройстве генератора постоянного тока много общего с генератором переменного тока с вращающимся якорем (см. § 5). И в том и в другом генераторе — индуктор и вращающийся якорь, в обмотке которого индуцируется переменная э. д. с. Основное различие заключается в том, что у генератора постоянного тока имеется спрямляющее устройство — коллектор.

Магнитная система генератора постоянного тока устроена так же, как и в генераторе переменного тока с вращающимся якорем: станина из мягкой литой стали (в чугунном корпусе), к которой прикреплены полюсные сердечники с обмоткой возбуждения (см. рис. 18). Магнитная система генератора в зависимости от его мощности изготавливается с различным числом полюсов (см. рис. 19). Для создания магнит-

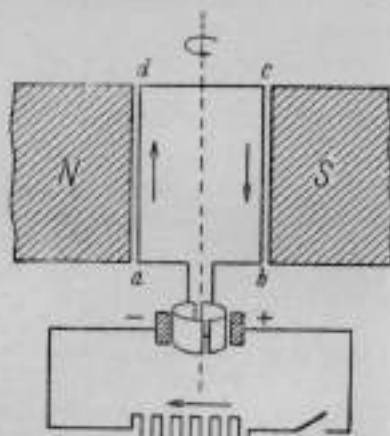


Рис. 90. Принципиальная схема генератора постоянного тока.

ного поля (для возбуждения генератора) по обмоткам электромагнитов пропускается постоянный ток.

Якорь устроен так же, как в генераторе переменного тока (см. § 5): он состоит из стального сердечника (набранного из отдельных фигурных листов), в пазах которого уложена обмотка.

Напряжение на щетках витка (рис. 88), оставаясь постоянным по направлению, изменяется по величине от

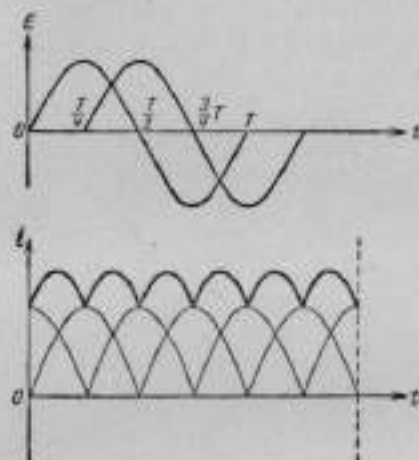


Рис. 91. Сглаживание пульсаций:

Синусоиды э. д. с. в двух витках (плоскости витков перпендикулярны друг другу), вращающихся в магнитном поле; ток, даваемый витками, и суммарный ток во внешней цепи.

нули до некоторого максимального значения. Ток во внешней цепи (при постоянном ее сопротивлении) тоже, сохраняя свое направление постоянным, изменяется по величине от нуля до некоторого максимума (см. график пульсирующего тока на рис. 89). Генератор же должен давать ток, постоянный не только по направлению, но и по величине. Решается эта задача следующим образом.

Представим себе, что в магнитном поле вращается не один виток, как это показано на рис. 88, а два витка, расположенные в двух перпендикулярных плоскостях. Коллектор в этом случае должен состоять из четырех пластин. Щетки в каждый данный момент времени контактируют с одной

парой пластин коллектора и, следовательно, с одним витком. В каждом витке будет индуцироваться синусоидально изменяющаяся э. д. с. Нулевые и максимальные значения в витках по времени не совпадают, отставая на $\frac{1}{4}$ периода (угол сдвига фаз 90°). Синусоиды э. д. с. изображены на рис. 91. Благодаря коллектору во внешней цепи и в этом случае получится пульсирующий ток, но пульсации тока будут значительно меньше, чем при одном витке. Это ясно видно на рис. 91, на котором тонкими линиями показаны графики токов, даваемых во внешнюю цепь каждым витком, и суммарный ток (толстой

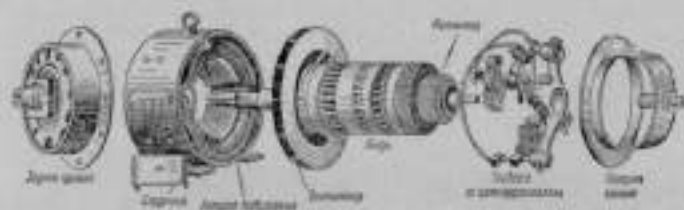


Рис. 92. Детали генератора постоянного тока.

линией) во внешней цепи. На том же графике (рис. 91) видно, что ток во внешней цепи не только уменьшил свои пульсации, но что он теперь не падает до нуля. Если еще больше увеличить число витков (и число коллекторных пластин), то пульсации тока уменьшатся очень сильно. Так, например, при 20 коллекторных пластинках колебания напряжения составляют меньше 1% от среднего значения напряжения. Пульсации тока становятся настолько незначительными, что практически он оказывается током постоянным.

В соответствии со сказанным, обмотка якоря генератора постоянного тока представляет собой сложную систему проводов, состоящую из секций. Каждая секция состоит из нескольких витков изолированного провода. Секции закладываются в пазы якоря и определенным образом соединяются между собой и с пластинами коллектора.

Коллектор состоит из медных коллекторных пластин с прокладками из изолятора между ними.

На рис. 92 показаны детали генератора постоянного тока. Вал якоря устанавливается в подшипниках. Щетки крепятся в особом приспособлении (траверсе), с помощью

которого может быть изменено положение щеток на коллекторе. Конструкцией генератора предусмотрено охлаждение якоря и станины с помощью вентилятора, посаженного на вал генератора.

Э. д. с. генератора тем больше, чем больше витков и обмотке якоря, чем больше скорость его вращения и чем больше магнитная индукция поля созданного индуктором генератора.

Методические указания

В обмотке якоря генератора постоянного тока возбуждается э. д. с., изменяющаяся синусоидально. Как практически осуществляются условия, нужные для возбуждения синусоидальной э. д. с., мы уже говорили (см. соответствующую часть методических указаний к § 1, 5, 12, 18).

Рассказывая о принципе действия генератора постоянного тока, полезно прибегнуть к обычно имеющемуся в школах прибору — проволочному витку с полукольцами, поворачивающемуся между двумя металлическими пластинами, символизирующими магнитные полюсы.

Существенно, чтобы учащиеся хорошо разобрались в спрямляющем действии коллектора. С этой целью помимо только что упомянутого проволочного витка, нужно использовать чертеж. Рис. 88 удобен, но выполнение его на уроке отнимает много времени. С успехом можно воспользоваться чертежом, данным на рис. 90.

Объяснение тому, почему ток во внешней цепи постоянен по направлению, может быть сделано так, как в данном параграфе. В основе его лежит утверждение, что каждая щетка все время соединена с тем проводом, который проходит перед одним и тем же полюсом.

Возможен и другой путь. Установив направление тока в проводах *ad* и *bc* (см. рис. 90), приходим к заключению, что в это время правая щетка генератора является положительным полюсом, а левая — отрицательным. Когда виток из положения, указанного на рис. 90, повернувшись на угол в 90° , окажется в нейтральной плоскости, направление тока в проводах *ad* и *bc* изменится на противоположное. Но в этот же момент времени полукольца поменяются местами. Значит, и дальше правая щетка генератора будет положительным полюсом, а левая —

отрицательным полюсом генератора. В итоге направление тока во внешней цепи меняться не будет.

Другой (помимо коммутации) принципиально важный вопрос — это сглаживание пульсаций. Ему должно быть отведено время (очень небольшое) на уроке. Рассматривая график рис. 91, нужно обратить внимание на то, что при наличии двух витков ток во внешней цепи не падает до нуля, помимо того, что пульсации его резко сглаживаются.

Следует продемонстрировать учащимся широко распространенный в школе прибор — виток в магнитном поле, имеющий для одного и того же витка (состоящего из некоторого числа оборотов провода) контактные кольца, двухпластинчатый коллектор (два полукольца) и передвижные щетки. Поставив щетки так, чтобы они прижимались к коллектору, присоединим к зажимам прибора стрелочный гальванометр магнито-электрической системы. При вращении витка рукой мы обнаруживаем в гальванометре ток одного направления. Если щетки переставить так, чтобы они прижимались к контактным кольцам, стрелка гальванометра дрожит, слегка отклоняясь в одну и другую сторону. В тех же целях (демонстрация выпрямляющего действия коллектора) может быть использована имеющаяся в школах действующая модель генератора постоянного и переменного тока. (Магнитная система — два постоянных подковообразных магнита. Ручной привод.)

Вращать якорь следует очень медленно, чтобы не пережечь гальванометр. Модель генератора дает ток, достаточный для зажигания лампочки от карманного электрического фонаря.

Помимо физических приборов, необходимо показать учащимся детали промышленного генератора постоянного тока, в частности якорь, коллектор. Если найдется в школе генератор, то, разумеется, его следует показать учащимся в собранном виде.

§ 27. Типы генераторов постоянного тока

Магнитное поле в генераторе создается электромагнитом, по обмотке которого нужно пропускать постоянный ток, называемый током возбуждения. Этот ток может быть получен или от постороннего источника электрической

энергии (батарея аккумуляторов или другой генератор постоянного тока), или от самого генератора.

Генераторы, обмотка возбуждения которых питается током от постороннего источника электрической энергии, называются генераторами с независимым возбуждением.

Схематический чертеж такого генератора показан на рис. 93.

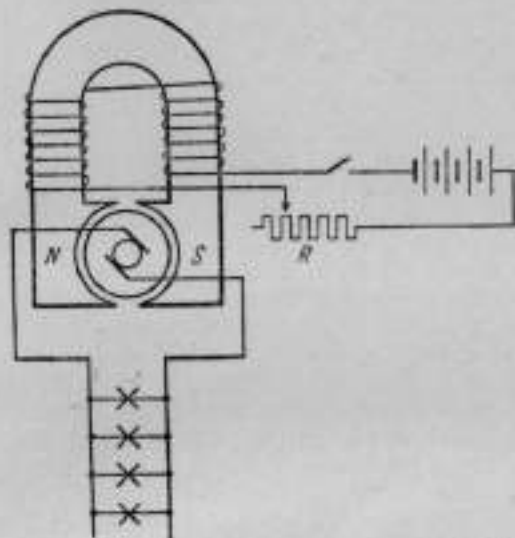


Рис. 93. Схематический чертеж генератора с независимым возбуждением.

При постоянном числе оборотов якоря э. д. с. такого генератора остается постоянной по величине. При изменении нагрузки, т. е. при изменении сопротивления внешней цепи, изменится ток в якорь, а значит, изменится и падение напряжения во внутренней цепи. В связи с этим изменится и напряжение на зажимах генератора (на внешней цепи). С увеличением тока нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается, а с уменьшением нагрузки — увеличивается. Напряжение на зажимах может поддерживаться постоянным с помощью регулировочного реостата R в цепи обмотки возбуждения (см. рис. 93).

Короткое замыкание для генератора крайне опасно, так как ток в обмотке якоря в этом случае резко возрастает.

Перемена направления вращения якоря меняет полярность щеток генератора, но не разматывает его магнита.

Описанные генераторы применяются в случаях, когда необходимо иметь мало изменяющееся напряжение.

Генераторы, обмотка возбуждения которых питается током от самого генератора, называются генераторами с самовозбуждением.

Мягкая литая сталь, из которой делают сердечники магнитных полюсов и станина генератора, обладает небольшим остаточным магнетизмом. В связи с этим, когда генератор и не работает, магнитная система его создает слабое магнитное поле. Поэтому при вращении якоря генератора в обмотке возникает небольшая э. д. с. Если щетки генератора соединены с обмоткой возбуждения, то по ней пойдет незначительный ток. Он усилит магнитный поток полюсов, и э. д. с. в обмотке якоря соответственно возрастет. Но в связи с этим вновь возрастет ток возбуждения, что вызовет новое увеличение э. д. с. в обмотке якоря, и т. д. Этот процесс будет происходить до момента магнитного насыщения сердечника электромагнита, после чего дальнейшее возрастание э. д. с. прекратится.

Таким образом, генератор с самовозбуждением питает ток и внешнюю цепь с приемниками электрической энергии и обмотку возбуждения. По способу включения обмотки возбуждения генераторы постоянного тока делятся на следующие три типа.

ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (ШУНТ-МАШИНА)

Обмотка возбуждения такого генератора подключена к щеткам параллельно внешней цепи (рис. 94). Обмотка возбуждения состоит из большого числа витков тонкой проволоки. (Такая обмотка обладает большим сопротивлением и потому потребляет небольшой ток. Достаточно мощный магнитный поток при небольшом токе обеспечивается большим числом витков в обмотке. Ток возбуждения составляет 2—3% от величины тока в якоре.) В цепь обмотки возбуждения включен регулировочный шунтовой реостат (r_a на рис. 94, а), с помощью кото-

рого регулируется ток возбуждения, а значит, и э. д. с. генератора. На рис. 94, а дан схематический чертеж генератора с параллельным возбуждением, а на рис. 94, б — схема соединения обмотки возбуждения r_a и внешней цепи R со щетками генератора.

Так как обмотка возбуждения подключена к щеткам параллельно внешней цепи, то при увеличении нагрузки (уменьшении внешнего сопротивления) ток в обмотке

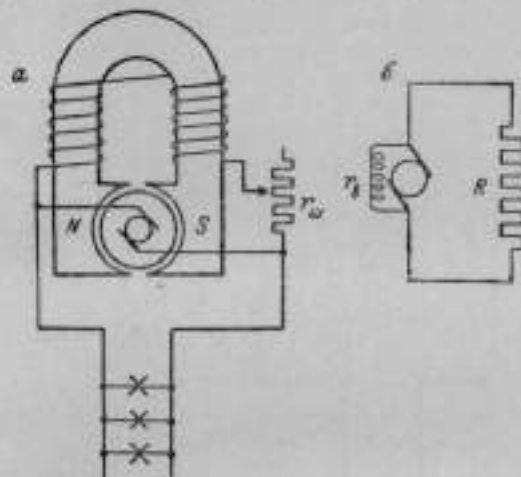


Рис. 94. Схематический чертеж генератора с параллельным возбуждением.

возбуждения уменьшается, напряжение на зажимах генератора падает. Изменение напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением, происходящее при изменении нагрузки, больше (на 10—15%), чем у генератора с независимым возбуждением. Это объясняется тем, что при изменении нагрузки напряжение на зажимах генератора изменяется по двум причинам: 1) изменяется падение напряжения во внутренней цепи, 2) изменяется э. д. с. генератора, так как изменяется величина тока, идущего в обмотку возбуждения.

Генератор возбуждается при разомкнутой внешней цепи. Короткое замыкание для генератора не опасно (напряжение на зажимах в этом случае падает до нуля, тока в обмотке возбуждения нет. Остаточный магнетизм наводит

в обмотке якоря очень небольшую э. д. с., поэтому ток короткого замыкания мал).

Генераторы этого типа применяются при мало изменяющейся нагрузке (например, при зарядке аккумуляторов).

ГЕНЕРАТОР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (СЕРИЕС-МАШИНА)

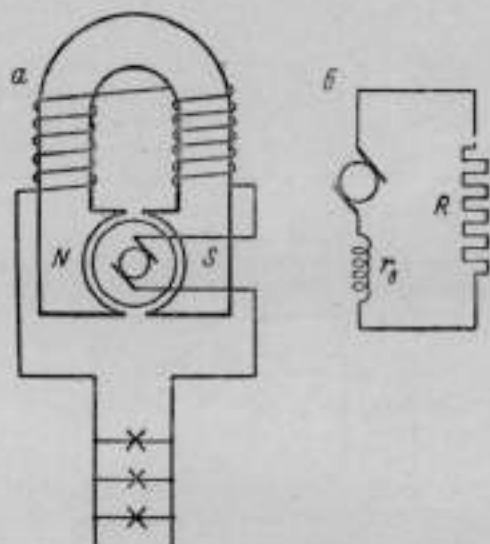


Рис. 95. Схематический чертеж генератора с последовательным возбуждением.

Обмотка возбуждения подключена к щеткам генератора последовательно с внешней цепью (рис. 95). Обмотка состоит из небольшого числа витков толстой проволоки. (Провод взят толстым потому, что по обмотке возбуждения проходит весь нагрузочный ток, идущий по внешней цепи. Он, как правило, велик. Поэтому при небольшом числе витков обмотки создается достаточно мощный магнитный поток.) На рис. 95, а дан схематический чертеж генератора с последовательным возбуждением, а на рис. 95, б — схема соединения обмотки возбуждения r_a и внешней цепи R со щетками генератора.

Ток в обмотке возбуждения и во внешней цепи одинаков. При изменении нагрузки напряжение на зажимах генератора изменяется в широких пределах. Генератор не возбуждается при разомкнутой внешней цепи.

При коротком замыкании напряжение на зажимах генератора падает до нуля, а ток короткого замыкания в несколько раз превышает допустимый.

Генераторы с последовательным возбуждением применяются очень редко (в случаях постоянной нагрузки).

Так как обмотка возбуждения соединена с внешней цепью последовательно, то при увеличении нагрузки (уменьшении внешнего сопротивления) ток в обмотке возбуждения увеличивается, напряжение на зажимах возрастает (в некоторых пределах). Как указывалось, напряжение на зажимах шунт-машины при увеличении нагрузки уменьшается.

Изменение напряжения на зажимах генератора является недостатком его. Этот недостаток сильно ослаблен в компаунд-машине.

ГЕНЕРАТОР СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (КОМПАУНД-МАШИНА)

Генератор имеет две обмотки возбуждения. Одна выполнена толстым проводом и соединена последовательно

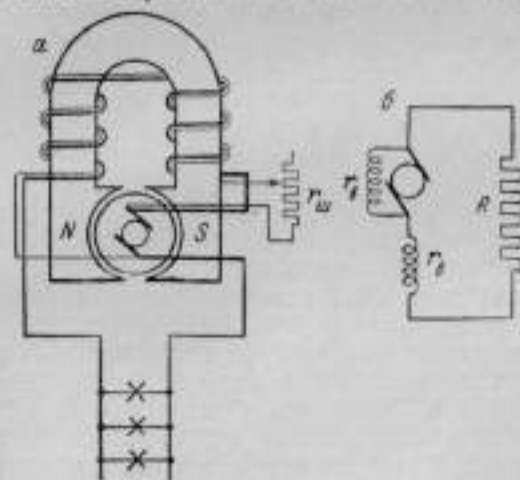


Рис. 96. Схематический чертеж генератора со смешанным возбуждением.

с внешней цепью, а другая выполнена тонким проводом и подключена к щеткам параллельно внешней цепи. На рис. 96, а дан схематический чертеж генератора со смешанным возбуждением.

Последовательно включенная обмотка показана толстой линией, параллельно включенная — тонкой. В последнюю включается регулировочный реостат. На рис. 96, б показана схема включения обмоток возбуждения.

Наличие двух обмоток возбуждения в компаунд-машине ведет к тому, что напряжение на зажимах генератора при изменении нагрузки меняется очень незначительно (2—3%). Напряжение регулируется реостатом, находящимся в обмотке, подключенной параллельно.

Генераторы со смешанным возбуждением широко применяются в тех случаях, когда нужно иметь постоянное напряжение при резко и часто изменяющейся нагрузке.

Методические указания

Вопрос о том, включать ли рассмотрение типов генераторов постоянного тока в программный материал, решался в последние годы по-разному. Очевидно, что рассказать учащимся о способах возбуждения генератора нужно. Значит, не сказать о самовозбуждении нельзя. В связи с этим неизбежно встанет вопрос о том, как отвести ток из якоря генератора в его обмотку возбуждения. Поэтому рассказать об одном из трех типов генераторов (например, о шунт-машине) необходимо. О генераторах двух других типов придется или ничего не говорить или сказать очень немногое: о способах подключения их обмоток возбуждения, не делая чертежей, или воспользовавшись чертежами, заранее подготовленными.

Для более осознанного понимания учащимися возможностей по-разному подключить обмотку возбуждения полезен такой прием. На первом чертеже генератора с самовозбуждением, выполненном учителем на классной доске, концы обмотки возбуждения и внешней цепи сначала оставляются свободными, не подключенными к щеткам генератора. Затем при участии учащихся решается вопрос о том, каким путем можно направить ток, если он возникнет в обмотке якоря, и в индуктор и во внешнюю цепь. После этого делаются на чертеже нужные соединения.

Чертежи, данные на рис. 93—96, нам думается, дают наиболее отчетливое представление о способах включения обмоток возбуждения.

Основные характерные особенности генераторов разных типов на уроке по необходимости должны быть опущены. Но необходимо учесть, что если учащимся будет кратко рассказано о типах генераторов, то неизбежно возникнет вопрос о том, почему в компаунд-машинах две обмотки возбуждения.

§ 28. Электродвигатель постоянного тока

Рассмотренные выше генераторы постоянного тока обладают ценным свойством — обратимостью. Оно состоит в том, что электрические машины постоянного тока могут работать как генераторы и как электродвигатели. В первом случае якорь машины вращается с помощью какого-либо двигателя. Происходит преобразование механической энергии в электрическую — машина дает постоянный ток. Во втором случае в обмотку якоря машины пускается постоянный ток. Якорь машины вращается, происходит преобразование электрической энергии в механическую. Машина работает как электродвигатель.

Электрические машины, преобразующие электрическую энергию в механическую, называются электродвигателями.

Обратимость машины постоянного тока была открыта русскими академиками Э. Х. Ленцем и Б. С. Якоби. Это свойство машины постоянного тока подтверждается опытом и теорией.

Воспользуемся рис. 97, на котором дана принципиальная схема электродвигателя постоянного тока. Виток

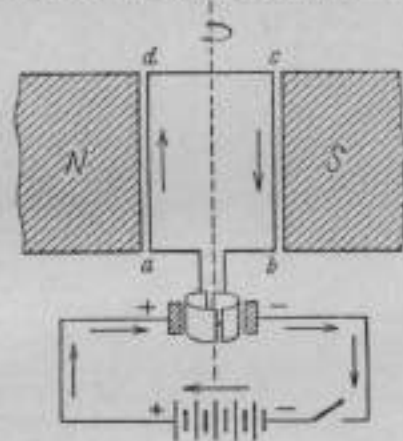


Рис. 97. Принципиальная схема электродвигателя постоянного тока.

adcb находится в магнитном поле, созданном полюсами *N* и *S* магнита. Концы витка присоединены к коллектору, состоящему из двух полуколец. Посредством щеток виток соединен с полюсами источника постоянного тока (например, батареи аккумуляторов). В проводнике *ad* ток идет снизу вверх. Пользуясь правилом левой руки, найдем, что проводник *ad* движется от нас. Путем аналогичных рассуждений применительно к проводнику *bc* придем к выводу, что он движется к нам. На виток действует пара сил, поворачивающая виток в направлении, указанном на рис. 97 стрелкой. Когда виток повернется из положения, указанного на рис. 97, на угол в 90° , виток окажется в нейтральной плоскости, которую он пройдет по инерции. В этот момент времени полукольца поменяются местами. Направление тока в витке изменится на противоположное. Под действием пары сил виток будет вращаться в том же направлении. Когда виток повернется от рассмотренного положения его в нейтральной плоскости на угол в 180° , направление тока в нем опять изменится на противоположное, а виток будет продолжать вращение в том же направлении.

Таков принцип действия электродвигателя. Сравнивая принципиальную схему его (рис. 97) с принципиальной схемой генератора постоянного тока (рис. 90), мы видим, что они тождественны.

Конструкция генератора постоянного тока и электродвигателя одинакова.

Итак, каждый генератор постоянного тока может быть использован как электродвигатель постоянного тока, и наоборот — каждый электродвигатель постоянного тока может быть использован как генератор.

Изучая генератор постоянного тока, мы рассмотрели три типа их. Совершенно так же устроены и электродвигатели постоянного тока.

В соответствии с этим, различают три типа электродвигателей постоянного тока: с последовательным, параллельным и смешанным возбуждением.

Познакомимся с некоторыми особенностями работы электрических машин постоянного тока, используемых в качестве двигателей.

1. При вращении якоря электродвигателя обмотка его пронизывается магнитным потоком. Величина магнитного потока, охватываемого контуром обмотки, непрерывно

изменяется вследствие того, что обмотка (вместе с сердечником якоря) вращается. В итоге в обмотке якоря возникает э.д.с., направленная противоположно приложенному к обмотке якоря напряжению (закон Ленца).

Индуктируемая в обмотке вращающегося якоря электродвигателя э.д.с. называется обратной электродвижущей силой или противоэлектродвижущей силой.

2. В связи с этим величина тока в обмотке якоря определяется не приложенным к якорю напряжением, а разностью между этим напряжением и противоэлектродвижущей силой. Следовательно:

$$I_a = \frac{u - E}{R_a},$$

где I_a — ток в якоре, u — напряжение, приложенное к якору, E — противоэлектродвижущая сила, а R_a — сопротивление обмотки якоря.

В этой формуле u и R_a — величины постоянные, а E и I_a изменяются, если изменяется скорость вращения якоря. В соответствии с законом Фарадея для электромагнитной индукции, э.д.с. индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, охватываемого контуром обмотки якоря. Поэтому при небольшой скорости вращения якоря противоэлектродвижущая сила мала, при увеличении скорости вращения якоря обратная э.д.с. соответственно возрастает. Скорость же вращения якоря зависит от величины механической нагрузки на валу электродвигателя. При увеличении нагрузки скорость вращения якоря уменьшается, противоэлектродвижущая сила E становится меньше, разность $u - E$ увеличивается, потребляемый двигателем ток I_a возрастает. При уменьшении нагрузки скорость вращения якоря возрастает, E увеличивается, разность $u - E$ уменьшается, потребляемый ток становится меньше. Очевидно, что при холостом ходе двигателя скорость вращения якоря наибольшая, а потребляемый ток — минимален. При этом противоэлектродвижущая сила близка к подводимому к обмотке якоря напряжению.

Таким образом, количество потребляемой двигателем электрической энергии регулируется самим двигателем и изменяется в зависимости от величины совершаемой им механической работы.

3. Пуск электродвигателя в ход осуществляется с помощью так называемого пускового реостата, выключаемого последовательно с обмоткой якоря двигателя. Необходимость увеличить при запуске двигателя сопротивление подводимому к якорю току вызвана следующей причиной.

Если при запуске двигателя, не прибегая к пусковому реостату, подключить обмотку якоря сразу на полное напряжение, то вследствие того, что сопротивление обмотки якоря мало (обмотка мотается толстым проводом), а противоэлектродвижущая сила равна нулю (якорь неподвижен), в обмотке якоря возникнет недопустимо большой величины ток. Это неизбежно поведет к аварии — обмотка якоря перегорит.

Назначение пускового реостата — уменьшить ток в обмотке якоря при запуске двигателя. По мере того, как увеличивается скорость вращения якоря и, следовательно, растет обратная э.д.с., реостат постепенно выключается.

4. На схеме рис. 97 легко увидеть, что для того чтобы изменить направление вращения якоря, необходимо или изменить направление тока в якорь, или изменить направление магнитного поля, для чего необходимо изменить на обратное направление тока в обмотке возбуждения. Обычно изменение направления вращения якоря осуществляют путем изменения направления тока в якорь.

5. Электродвигатели различного типа отличаются друг от друга своими свойствами. Электродвигатель с последовательным возбуждением развивает большой вращающий момент при пуске в ход (хорошо „берет с места“) и при перегрузках, а также сильно изменяет скорость вращения якоря при изменениях нагрузки. Поэтому двигатели с последовательным возбуждением широко применяются на транспорте (трамвай, электровозы) и в подъемных кранах. Именно в этих условиях при большой нагрузке нужен большой вращающий момент и малая скорость, а при малой нагрузке — небольшой вращающий момент, но большая скорость.

Методические указания

Обратимость электрических машин постоянного тока может быть иллюстрирована следующей простой демонстрацией.

Два стрелочных гальванометра магнито-электрической системы ставятся на демонстрационный стол на некотором расстоянии друг от друга. Клеммы их соединяются двумя проводами. Гальванометры имеют общее с машинами постоянное тока. В каждом имеется постоянный магнит, создающий магнитное поле (индуктор), и подвижная обмотка (якорь), концы которой выведены к клеммам. Об этом обязательно следует сказать учащимся, так как иначе демонстрация ими не осмысливается. При покачивании руками одного гальванометра подвижная система его поворачивается, в обмотке возникает ток. Попадая в обмотку второго гальванометра, он заставляет поворачиваться его подвижную систему. Покачиваемый гальванометр является генератором, другой — двигателем. Покачивая затем другой гальванометр, обращаем его в генератор, а первый — в электродвигатель.

С этой же целью следует использовать прибор — вилок в магнитном поле, который только что перед этим был показан как упрощенная модель генератора постоянного тока. Пустив в вилок ток от аккумулятора, увидим, что он станет вращаться, т. е. обратится в электродвигатель.

Материал всего параграфа, как показывает опыт работы с учащимися X классов, нетруден, хорошо понимается и усваивается учащимися. С физической точки зрения особый интерес представляет возбуждение в обмотке якоря двигателя противоэлектродвижущей силы. Разобравшись в этом вопросе, учащиеся быстро и легко усвоят, как происходит „автоматическое“ регулирование потребляемой двигателем энергии, почему при запуске электродвигателя нужен пусковой реостат.

ГЛАВА V

ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОКА

§ 29. Передача электрической энергии. Потери энергии в линии передачи и меры борьбы с ними

Электрическая энергия обладает рядом преимуществ перед другими видами энергии. (Подробнее об этом см. в § 31.)

Одно из наиболее важных достоинств электрической энергии состоит в том, что она может быть передана с относительно небольшими потерями на большие расстояния. Это обстоятельство имеет существенное значение. Большая часть электрической энергии вырабатывается в СССР на районных центральных электростанциях. Эти станции выгодно располагать в местах, где имеются большие природные запасы энергии в виде энергии торфа, бурого угля, падающей воды. Экономическая выгода такого расположения станций обусловлена тем, что используется низкосортное топливо и энергии падающей воды, что дает возможность более рационально употребить топливо высокого качества и освободить железнодорожный и водный транспорт от перевозки огромных количеств топлива.

Выработанный на районных электростанциях электрический ток передается по линиям передач к потребителям электрической энергии, удаленным от станций на десятки и сотни километров.

В линиях передач происходят потери энергии, так как при прохождении по проводам тока провода нагреваются.

Потери электрической энергии в проводах проявляются потерей напряжения в них.

Пронаблюдаем это явление.

Воспользуемся деревянной доской, на которой смонтированы три патрона для ламп накаливания: по одному

патрону на концах доски и третий между ними (рис. 98). Патроны соединены друг с другом параллельно голым проводником большого удельного сопротивления. Для увеличения длины соединительных проводов их натягивают зигзагообразно на вбитые в доску гвоздики. В патроны ввинтим лампы одинаковой мощности.

Демонстрацию осуществим в следующем порядке.

1. Подведем ток от осветительной сети к одной из крайних ламп. Обнаруживаем, что первая лампа, ближайшая к источнику тока, горит нормально, полным накалом, вторая — менее ярко, третья — совсем тускло. С помощью вольтметра обнаруживаем, что первая лампа получает напряжение, равное напряжению осветительной

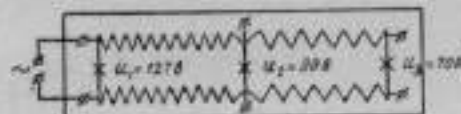


Рис. 98. Схема прибора для демонстрации потерь напряжения в линии передачи.

сети (например, 127 в), вторая — меньше (в зависимости от мощности примененных ламп и сопротивления соединительных проводов, потеря напряжения может быть различной; допустим, что вторая лампа получит напряжение в 90 в) и третья — еще меньше (например, 70 в).

Отсюда заключаем, что в проводах между первой и второй и между второй и третьей лампами происходит потеря энергии.

2. Подводим ток к средней лампе. Теперь средняя лампа горит ярко, крайние — менее ярко. Измеряем напряжение на лампах. Приходим к тому же заключению.

3. Подводим ток от осветительной сети к другой крайней лампе. Наблюдаем картину, обратную первой. К вольтметру теперь уже можно и не прибегать. Заключение — то же.

На основе данных опыта приходим к следующему выводу.

Потеря энергии в проводах, по которым передается ток, проявляется потерей напряжения в этих проводах.

Каково же соотношение между энергией, теряемой на нагревание проводов, и потерей напряжения в них? Потери

электрической энергии в проводах можно оценивать потерей мощности в них. Потеря мощности в проводах $P = I \cdot u$, где I — величина тока в проводах, а u — потеря напряжения в них. Из этой формулы видно, что при заданной величине тока $I = \text{const}$ потеря мощности (а значит и энергии) в проводах линии передачи прямо пропорциональна потере напряжения в проводах.

Потеря энергии происходит во всех случаях передачи электрического тока по проводам. При наличии линий передач большой протяженности потеря электрической энергии может быть весьма значительной. Эта энергия теряется бесполезно, „ускользает“ от нас, уходя на ненужное нам нагревание проводов, по которым передается ток. В связи с этим мы используем не всю энергию, даваемую генераторами, а только некоторую часть ее, что, в свою очередь, вызывает увеличение стоимости энергии. Поэтому борьба с потерями увеличивает ту часть энергии генераторов, которую мы можем использовать, и уменьшает стоимость энергии. Избежать целиком потерь энергии в пути нельзя, но нужно установить некоторый предел для этих потерь, имея в виду тот минимум потерь, который может быть достигнут при современном состоянии техники. В настоящее время считается неизбежной и потому допустимой потеря энергии в линии передачи в размере 10% от всей передаваемой энергии.

Как было выше указано, потеря энергии в линии передачи определяется потерей напряжения в проводах. Значит, потеря напряжения в линии передачи не должна превышать 10% от напряжения, под которым передается ток. (Необходимо учесть, что здесь идет речь о допустимой потере напряжения в *линиях дальней передачи*.) Для проводов внутренней проводки, подводящих ток от магистральной линии к приемникам электрической энергии, существуют другие нормы. Допустимая потеря напряжения в осветительных сетях 1—2%, а в силовых, питающих электродвигатели, мощные электрические печи и другие производственные установки, 2—5%.

Например, при передаче тока на большое расстояние под напряжением 120 000 в потери напряжения в проводах может составлять 12 000 в (10% от 120 000 в). Следовательно, напряжение, получаемое на месте потребления энергии, составит 120 000 в — 12 000 в = 108 000 в.

Потери энергии в линии передачи обусловлены сопротивлением проводов, по которым передается ток. Потери напряжения в проводах (при $I = \text{const}$) пропорциональна сопротивлению проводов ($u = IR$). Очевидно, что для того, чтобы потери напряжения, а значит, и энергии, в линии передачи не были больше допустимых, сопротивление проводов линии не должно превышать некоторого определенного значения.

Подсчитаем для какого-либо случая передачи энергии то сопротивление проводов, проводящих ток, при котором потери энергии не превышала бы 10%. Допустим, что электрическая энергия ГЭС мощностью в 60 000 кВт передается в город током под напряжением в 120 000 в. Имеем следующие данные:

напряжение, под которым передается ток . .	130 000 а
" " , получаемое в городе	108 000 "
потери напряжения в проводах	12 000 "

Рассчитаем величину тока:

$$P = Ix;$$

$$I = \frac{P}{u};$$

$$p = 60\,000 \text{ KAM} = 60\,000\,000 \text{ atm.}$$

$$I = \frac{60000000}{120000} = 500 \text{ a.}$$

Таким образом, по проводам между ГЭС и городом идет ток в 500 а. Потеря напряжения в проводах равна 12 000 а.

Применив закон Ома, рассчитаем сопротивление проводов. Получим:

$$R = \frac{u}{l};$$

$$R_1 = \frac{12000}{500} = 24 \text{ o.m.}$$

Итак, если мы хотим, чтобы при передаче тона под напряжением в 120 000 в потери энергии не превышали 10%, необходимо, чтобы сопротивление линии передачи (т. е. сопротивление двух проводов — прямого и обратного) было не больше 24 ом.

Теперь рассчитаем сопротивление проводов, если ток будет передаваться под напряжением в 90 000 в.

Допустимая потеря напряжения прежняя — 10%, передаваемая мощность та же — 60 000 *квт*.

Мы живем

напряжение, под которым передается ток . . .	90 000 в
" " , получаемые в городе	81 000 "
потери напряжения в проводах	9 000 "

Рассчитаем величину тока:

$$P = Iu;$$

$$I = \frac{P}{\mu};$$

$$P = 50\,000 \text{ kgm} = 50\,000\,000 \text{ am};$$

$$I = \frac{60000000}{90000} \approx 700 \text{ a.}$$

Рассчитав сопротивление проводов, получим:

$$R = \frac{u}{T};$$

$$R_4 = \frac{9000}{750} \approx 12 \text{ o.m.}$$






Итак, если передавать ту же мощность током под напряжением в 90 000 в вместо 120 000 в, то сопротивление проводов должно быть в 2 раза меньше, а площадь поперечного сечения проводов в 2 раза больше.

Сведем полученные данные в табличку и произведем такие же расчеты для напряжения в 60 000 и 12 000 а.

Поперечное сечение провода в первом случае условно обозначим произвольным квадратиком. Поперечное сечение провода в других случаях будем обозначать столько-кими квадратиками, во сколько раз сопротивление провода должно быть меньше, чем в первом случае.

Сечение провода в условных квадратах для последнего случая в таблице не уместить.

Если расстояние от станции до места потребления энергии порядка 120 км, то в первом случае сечение передающих ток медных проводов при сопротивлении их

	в ВОЛЬТАХ			
	Напряжение, под которым передается ток	Напряжение, полу- чаемое в городе	Потери напряжение в проводах	
$I_1 = \frac{60000000}{120000} = 500 \text{ а}$	120 000	108 000	12 000	$R_1 = \frac{12000}{500} = 24 \Omega$ 
$I_2 = \frac{60000000}{90000} \approx 700 \text{ а}$	90 000	81 000	9 000	$R_2 = \frac{9000}{700} \approx 12 \Omega$  
$I_3 = \frac{60000000}{60000} = 1000 \text{ а}$	60 000	54 000	6 000	$R_3 = \frac{6000}{1000} = 6 \Omega$ 
$I_4 = \frac{60000000}{12000} = 5000 \text{ а}$	12 000	10 800	1 200	$R_4 = \frac{1200}{5000} = 0,24 \Omega$  (в 100 раз больше)

в 24 Ом должно быть около 2 см². (Оно может быть вычислено по формуле $R = \frac{\rho}{S}$.)

Легко представить себе, какой громадной толщины должен быть провод, если бы мы задумали передавать ток под напряжением в 120 а. Путем такого же расчета, как тот, которым мы только что пользовались, нетрудно установить, что сечение провода должно было быть приблизительно в 100 000 раз больше, чем в первом случае, т. е. 200 000 см², или 2000 дм², т. е. 20 м²!

Легко подсчитать, что 1 лог. м такого "провода" весит 176 г. Практически пользоваться проводами сколь угодно большой площади поперечного сечения нет возможности; обычно берут провода сечением 1, 2, 3 см².

Увеличение сечения проводов не только увеличивает расход металла на провода (медь, алюминий), но и повышает расходы на установку опор; они должны быть более массивными, более прочными.

При подсчете сечения проводов мы исходили из соображения о том, чтобы потеря напряжения в них не

превышала 10%. Помимо этого, провода должны удовлетворять еще и второму требованию: сечение проводов должно быть таким, чтобы была исключена возможность нагревания их током выше предельных допустимых значений. Поэтому после определения сечения проводов по допустимой потере напряжения найденное сечение проверяют с точки зрения допустимого нагрева. Проверка производится по таблицам, в которых даны предельные длительные допустимые токи для стандартных типов проводов различного сечения. Если найденное сечение оказывается в отношении допустимого нагрева малым (при том токе, какой будет передаваться), то переходят к одному из больших сечений, при котором нагрев не будет больше допустимого.

К каким же выводам надо прийти на основании подсчетов, сделанных нами?

Данные таблицы свидетельствуют о том, что для того, чтобы потери энергии в линии передачи при относительно небольшой площади поперечного сечения проводов не вышли за пределы 10%, *необходимо передавать ток под возможно более высоким напряжением*. При этом необходимо учесть, что при сохранении мощности передаваемого тока неизменной, в результате повышения напряжения, под которым передается ток, в то или иное число раз величина тока в линии передачи уменьшится во столько же раз. (Сопоставьте, например, величину токов и напряжения, под которым передается ток, в четвертом случае передачи энергии с первым из записанных в таблице.)

В СССР передача энергии на большие расстояния осуществляется под напряжением 110 кВ, 160 кВ, 220 кВ. Вновь строящиеся Куйбышевская и Сталинградская ГЭС будут передавать ток под напряжением 400 кВ, что даст возможность значительно снизить бесполезную трату энергии и еще больше удешевить энергию.

Районные электрические станции имеют генераторы на напряжение 6—10—15 кВ. Конструирование генераторов на большее напряжение чрезвычайно затруднительно: нужна исключительно высокая качества изоляции. Поэтому при передаче тока на большое расстояние сначала повышают напряжение тока, вырабатываемого генераторами станций, а затем уже направляют ток в линию передачи.

Возможны две системы в рассмотрении вопроса о канализации электрической энергии: 1) сначала изучается устройство и действие трансформатора, а затем — применение его в практических целях; 2) выясняются способы борьбы с потерями энергии в линиях передач, а после этого рассматривается трансформатор. Последний путь более целесообразен в средней школе и потому использован в данном параграфе. Такой подход обеспечивает более вдумчивое отношение учащихся к принципу действия трансформатора, более осознанные знания у них.

Однако, избрав второй путь, необходимо учесть, что он может ввести учащихся на весьма распространенную ошибку, состоящую в том, что некоторые учащиеся рассматривают трансформатор как прибор, служащий для передачи энергии на большие расстояния. При всей важности последней задачи она не должна рассматриваться как основная. Трансформатор дает возможность преобразовать напряжение применительно к потребностям каждого данного производства, дает возможность снабжать множество различных потребителей током от одного генератора. В этом одно из преимуществ переменного тока перед постоянным. Поэтому, установив роль трансформатора в деле передачи электрического тока на большие расстояния, дальше (п. 5 следующего § 30) необходимо показать учащимся, что это далеко не единственная область применения трансформаторов.

Вопрос о распределении напряжений в замкнутой цепи принадлежит к числу трудных вопросов. Очень многие учащиеся, неплохо представляя себе наличие напряжения на приемниках электрической энергии, упускают из вида напряжение на проводах. Созданию у учащихся ошибочных представлений в этом отношении способствует недостаточное освещение этого вопроса на уроке, решение преимущественно таких задач, в которых потеря напряжения в соединительных проводах не учитывается. Этот пробел в знаниях учащихся в области физической сущности процесса особенно неприятен и нежелателен. По этим причинам вопросу о потере напряжения в соединительных проводах в настоящем параграфе уделено повышенное внимание, что должно быть сделано и на уроке.

Демонстрировать потерю напряжения в проводах целесообразно на описанном приборе (см. рис. 98), изготовление которого элементарно просто. При отсутствии проводников из металлов с большим удельным сопротивлением можно воспользоваться стальной балалаечной струной. Если длина доски порядка 1 м и проволока натянута зигзагообразно, то потеря напряжения в ней прекрасно обнаруживается не только вольтметром, но и различной степенью накала ламп. Если по каким-либо причинам такого прибора не будет под руками, возможна демонстрация потери напряжения в проводах рядом других способов. Наиболее простой, но менее демонстрационный, нежели описанный выше, состоит в следующем.

Подбираем реостат с движком, который может быть включен непосредственно в осветительную сеть. Включаем его в сеть. Защищенные концы проводов от вольтметра, рассчитанного на напряжение сети, контактируем с крайними витками провода реостата. Вольтметр показывает напряжение сети. Оставив один конец провода от вольтметра неподвижным, ведем концом другого провода по реостату (для лучшего контакта — по следу, оставшемуся обыкновенно движком реостата на его витках). Обнаруживаем довольно плавное падение напряжения.

Весьма распространенная демонстрация падения напряжения в линиях передач путем включения в осветительную сеть последовательно нескольких ламп накаливания методически менее ценна, так как в этом случае провода, по которым должен был бы передаваться ток, заменяются приемниками тока — лампами.

Сопротивление проводов в таблице на стр. 233 вычислено для случая передачи однофазного тока и, следовательно, при наличии в линии передачи двух проводов — прямого и обратного. Практически обычно передается трехфазный ток. Сделанное отступление в данном случае принципиального значения не имеет.

Крайне полезно обратить внимание учащихся на неизбежность потерь энергии в линии передач и на трудности, связанные с уменьшением их. Достаточно сказать, что при современном высоком уровне техники мы вынуждены мириться с потерей в линии передачи одной десятой части всей энергии, вырабатываемой станцией! Сознательное отношение к подобного рода фактам должно будить творческую мысль учащихся.

Расчет сечения проводов линии передачи по допустимой потере напряжения и сведение данных в таблицу, к сожалению, отнимает много времени. Поэтому можно, сохранив порядок изложения материала, осуществленного в § 29, воспользоваться готовой таблицей, заранее приготовив ее. Это тем более возможно, что основное — в идее, лежащей в основе рассуждений, а техника расчетов по формуле закона Ома $I = \frac{U}{R}$ и по формуле сопротивления проводников $R = \rho \frac{l}{S}$ для учащихся X класса элементарно проста.

Применительно к расчетам, произведенным для установления выводов по вопросу о мерах борьбы с потерями при передаче электрической энергии, необходимо сказать, что приведенные выше расчеты являются одним из возможных вариантов решения вопроса. Кратко остановимся на другом варианте.

Обосновывается необходимость некоторого допустимого предела для потерь. Затем устанавливается, какого сечения должны быть провода для передачи тока в разобранном нами выше примере, если бы мы решили передавать ток под напряжением в 100 в.

Производим расчет величины тока.

$$P = Iu;$$

$$I = \frac{P}{u};$$

$$P = 60\,000 \text{ квт} = 60\,000\,000 \text{ вт};$$

$$I = \frac{60\,000\,000}{100} = 600\,000 \text{ а.}$$

Дальше надо сообщить учащимся, что при такой величине тока техническими нормами допускается на каждый квадратный миллиметр сечения провода нагрузка приблизительно в 1 а, так как в этом случае потери на нагревание провода не выйдут за пределы 10%, и температура провода не будет выше допустимой. Получаем, что провод должен был бы иметь сечение 600 000 мм², или в 6000 см². Указываем, по каким соображениям такой способ передачи энергии практически невыполним.

Отсюда заключаем, что надо уменьшить величину тока, чтобы можно было иметь провод меньшего сечения, не уменьшая мощности передаваемого тока.

Допустим, что ток будет передаваться под напряжением в 120 000 в.

Рассчитав величину тока, получим:

$$I = \frac{60000000}{120000} = 500 \text{ а.}$$

Дальше нужно опять сослаться на технические нормы, в соответствии с которыми для передачи тока такой величины допускается сечение провода около 200 мм², или 2 см²; при таком проводе потери энергии не выйдут за пределы 10%, а температура провода не будет выше допустимой.

Делаем вывод, что для передачи данной мощности по проводам относительно небольшого сечения (около 2 см²) при условии, чтобы потери энергии не превышали 10%, необходимо передавать ее током возможно меньшей величины при возможно более высоком напряжении.

Как видим, в основе этого второго варианта лежит указание, даваемое нами учащимся, на технические нормы, которыми определяется сечение провода, связанное с температурным режимом, мало известным учащимся.

Кроме того, потери энергии при ее передаче в этом варианте расчетов не фигурирует достаточно ясно для учащихся. Поэтому вся система такого расчета может оказаться для них догматичной. И наконец, в основе указанного пути лежит весьма существенная неточность. Выбрав сечение провода по допустимому нагреву, мы считаем, что при этом сечении провод будет удовлетворять и второму требованию — потери напряжения в нем не выйдут за пределы 10%. На самом деле, по второму признаку сечение может быть несколько иным, причем и в этом случае провод может не перегреться.

В этом отношении первый из приведенных вариантов выгодно отличается от второго. В основе расчетов по этому варианту лежит потеря напряжения в проводах, а значит, и потери мощности, по которым можно судить о потерях энергии. Таким образом, если не потеря мощности, то потеря напряжения в расчетах выявляется для учащихся достаточно ясно. В связи с этим оказывается

возможным базироваться не на температурном режиме провода, а на соображениях, связанных с коэффициентом полезного действия.

Производимые расчеты и заключение, которое по ним можно сделать, создают чрезвычайно наглядную и убедительную для учащихся картину, которая может обеспечить осознанные знания учащихся и обоснованность выводов.

По указанным соображениям первый из рассмотренных вариантов представляется методически более обоснованным и целесообразным.

В связи с передачей электрического тока у учащихся часто возникают недоумения, связанные с применением формул

$$Q = 0,24 I^2 R t$$

"

$$Q = 0,24 \frac{U^2}{R} t.$$

Они правильно считают, что первая формула свидетельствует о том, что чем выше напряжение, под которым передается ток, тем меньше величина тока, а следовательно, и потери энергии в линии передачи. Вторая же формула часто ставит учащихся в тупик, так как с их точки зрения из формулы как будто следует, что применение высокого напряжения совсем невыгодно.

В этом случае полезно обратить внимание учащихся на следующие вопросы.

Потери энергии в линии передачи обусловлены *сопротивлением проводов*, по которым передается ток. Количество же теплоты, выделяющейся в *данном проводнике* ($R = \text{const}$; $t = \text{const}$), пропорционально квадрату величины тока. Поэтому в основе всех рассуждений, содержащихся в § 29, и положено решение такой задачи: каким должно быть сопротивление линии передачи, чтобы потери энергии в ней (при заданной мощности) не превышали 10%. В процессе решения этой задачи мы и установили, что при передаче тока заданной мощности следует прибегнуть к возможно более высокому напряжению, соответственно уменьшая при этом величину тока. Справедливость этого утверждения подтверждает и формула

$$Q = 0,24 I^2 R t,$$

так как она дает зависимость выделяющейся в проводнике теплоты от величины тока (при $R = \text{const}$ и $t = \text{const}$).

Что же касается формулы $Q = 0,24 \frac{u^2}{R} t$, то учащиеся часто не учитывают, что и в этом случае она применяет формулу к линии, по которой надлежит передавать ток заданной мощности. Из формулы $Q = 0,24 \frac{u^2}{R} t$ следует, что если мы, не уменьшая сопротивления линии передачи, увеличим падение напряжения в ней, например, в 2 раза, то количество выделяющейся теплоты возрастет в 4 раза (за то же время). Но необходимо принять во внимание, что увеличение напряжения на линии передачи в 2 раза связано с увеличением тока тоже в 2 раза. Изменение тока в проводах в данном случае обусловлено уменьшением напряжения на них.

В итоге — сопротивление линии осталось прежним, а ток увеличился в 2 раза. Количество выделившейся теплоты (зависающее от величины тока) возросло в 4 раза. Мы же, рассчитывая сопротивление линии передачи, имели в виду, что, увеличивая напряжение на линии передачи в несколько раз, мы не только не увеличивали ток в линии, но наоборот, уменьшали его во столько же раз, добиваясь соответствующего уменьшения количества выделяющейся теплоты.

Это обстоятельство необходимо учесть, если применить формулу $Q = 0,24 \frac{u^2}{R} t$ и в данном случае.

§ 30. Трансформатор

Изменение напряжения переменного тока осуществляется с помощью особого аппарата — трансформатора.

Назначение трансформатора — преобразование переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

1. Устройство трансформатора

Трансформатор состоит из массивного замкнутого стального сердечника, набранного из отдельных изолированных друг от друга пластин (изоляция — тонкая бумага или лак), на котором находятся две обмотки, не соеди-

ненные между собою (рис. 99). (В трансформаторах часто имеется большое число обмоток, но с точки зрения принципа работы трансформатора это не имеет значения. Поэтому мы остановимся на так называемом двухобмоточном трансформаторе.) Одна из обмоток трансформатора соединяется с генератором переменного тока (или включается в сеть переменного тока), а другая обмотка соединяется с приемником электрической энергии.

Обмотка трансформатора, соединенная с источником переменного тока, называется *первичной*, а соединенная

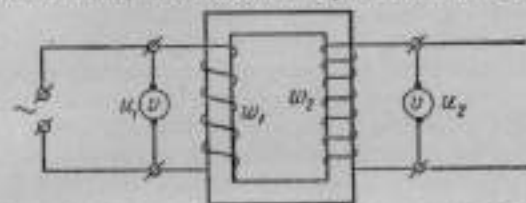


Рис. 99. Схема включения трансформатора в сеть (холостой ход).

с приемником энергии — *вторичной*. Обмотки трансформатора делаются на каркасах-катушках, надетых на сердечник. Число витков провода в обмотках различно.

Трансформаторы, предназначенные для учебных целей, делаются разборными. Сердечник таких трансформаторов, в рабочем состоянии стянутый болтами, может быть разобран, катушки можно снять и заменить другими (с иным числом витков).

2. Соотношение между напряжением на обмотках трансформатора и числом витков в них

Познакомимся со свойствами трансформатора на опыте. Наденем на сердечник разборного трансформатора катушки с числом витков приблизительно 600 и 1200, стянем сердечник болтами и включим трансформатор в осветительную сеть по схеме рис. 99. Катушку с числом витков $w_1 = 600$ сделаем первичной, а катушку с числом витков $w_2 = 1200$ — вторичной. К обмоткам подключим вольтметры: к первичной на 200 в, ко вторичной на 300—400 в.

Замкнем первичную обмотку трансформатора. Заметим, что вторичная обмотка разомкнута. Трансформатор

работает без нагрузки, как говорят, *вхолостую* (*холостой ход трансформатора*). Обнаруживаем, что вольтметр в первичной обмотке показывает напряжение в 127 в, во вторичной около 250 в, т. е. примерно в 2 раза больше. Видоизменим опыт. Снимем вторичную катушку и заменим ее катушкой, в которой 60 витков, т. е. в 10 раз меньше, чем в первичной. Заменим и вольтметр во вторичной обмотке на другой на 20—30 в. Повторив опыт, увидим, что напряжение на первичной обмотке осталось прежним — 127 в, а на вторичной теперь оно около 12 в, став меньше напряжения на первичной обмотке примерно в 10 раз. Заменив вторичную катушку другой (с иным числом витков), обнаружим, что напряжение на вторичной обмотке станет иным. При этом во всех опытах напряжение на вторичной обмотке больше или меньше напряжения на первичной обмотке во столько же раз, во сколько раз число витков вторичной обмотки соответственно больше или меньше числа витков первичной обмотки.

Напряжение на обмотках трансформатора при холостом ходе прямо пропорционально числу витков в обмотках.

Указанная зависимость может быть выражена следующей формулой:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (I)$$

Отношение первичного напряжения ко вторичному (при холостом ходе трансформатора), равное отношению числа витков первичной обмотки к числу витков во вторичной обмотке (оно остается тем же и в случае нагруженного трансформатора), называется коэффициентом трансформации.

Следовательно:

$$k = \frac{u_1}{u_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (II)$$

Коэффициент трансформации показывает, во сколько раз напряжение на первичной обмотке больше или меньше напряжения на вторичной обмотке.

В первом из наших опытов коэффициент трансформации трансформатора был равен $\frac{1}{2}$, а во втором 10. В паспортах трансформаторов коэффициент трансформации обычно указывается равным отношению высшего напря-

жения к низшему. В этом случае он всегда больше единицы.

Трансформатор, напряжение на вторичной обмотке которого больше, чем на первичной, называется повышающим трансформатором. Если напряжение на вторичной обмотке меньше, чем на первичной, трансформатор называется понижающим.

Установленное нами на опыте соотношение между напряжениями на обмотках трансформатора и числом витков в них может быть объяснено следующим образом.

При замыкании цепи первичной обмотки в ней устанавливается переменный ток и появляется переменное магнитное поле. Внутри стального сердечника трансформатора возникает переменный магнитный поток. Этот *переменный магнитный поток замкнут сердечником, проходящим внутри обмоток, и является общим для обеих обмоток*. Так как магнитный поток, охватываемый контуром каждой катушки, непрерывно изменяется, то в обеих катушках имеет место явление электромагнитной индукции. Э. д. с. индукции, возникающая в первичной обмотке, есть э. д. с. самоиндукции, так как первичная обмотка пронизывается магнитным потоком, созданным током, идущим по этой же обмотке.

Таким образом, в первичной обмотке, помимо приложенного к ней напряжения u_1 , будет иметь место противоположно направленная (закон Ленца) э. д. с. самоиндукции E_1 .

Во вторичной обмотке возникает э. д. с. индукции E_2 . Что можно сказать о величине E_1 и E_2 ?

В соответствии с законом Фарадея для электромагнитной индукции величина э. д. с. индукции (а также и самоиндукции) прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, охватываемого контуром проводника. Поэтому э. д. с. самоиндукции e_1 в каждой витке первичной обмотки выразится следующим образом:

$$e_1 = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Так как витки обмотки соединены последовательно, то полная э. д. с. самоиндукции в первичной обмотке

$$E_1 = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} W_1 \quad (III)$$

Э. д. с. индукции e_1 в каждом витке вторичной обмотки

$$e_1 = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

а полная э. д. с. во вторичной обмотке

$$E_2 = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} w_2. \quad (IV)$$

Учтем, что скорость изменения магнитного потока для обеих катушек одинакова, так как они обе пронизываются одним и тем же потоком. Поэтому э. д. с. самоиндукции e_1 в каждом витке первичной обмотки равна э. д. с. индукции e_2 в каждом витке вторичной обмотки.

Разделив почленно равенство (III) на равенство (IV) и произведя сокращения, получим

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (V)$$

Покажем теперь, что э. д. с. самоиндукции E_1 в первичной обмотке практически равна приложенному к ней напряжению u_1 , а $E_2 = u_2$.

Трансформатор работает холостую. Передача энергии из первичной обмотки во вторичную в этом случае отсутствует. Ток в первичной обмотке, намагничивающий стальной сердечник, очень мал, так как индуктивное сопротивление катушки с вложенным внутрь стальным сердечником велико. Активное сопротивление провода первичной обмотки мало. По этим причинам (малый ток, малое активное сопротивление) падение напряжения в первичной обмотке очень незначительно. Электродвижущая сила самоиндукции E_1 , как и всякая э. д. с. самоиндукции, должна преодолевать приложенным к первичной обмотке напряжением (иначе в обмотке не будет тока). Если откинуть небольшое падение напряжения в первичной обмотке, то можно считать, что все приложенное напряжение u_1 уравновешивает возникающую в первичной обмотке э. д. с. самоиндукции. Тогда $u_1 = E_1$.

Во вторичной обмотке тока нет. Значит, нет и падения напряжения во вторичной обмотке. Следовательно, напряжение на вторичной обмотке равно э. д. с. индукции в ней, т. е. $u_2 = E_2$.

Подставив в равенство (V) вместо E_1 и E_2 равные им величины u_1 и u_2 , получим

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (VI)$$

Значит, напряжение на обмотках трансформатора пропорционально числу витков в них.

Таким образом, соотношение между напряжениями на обмотках трансформатора (работающего холостую) и числом витков в обмотках, установленное нами на опыте, подтверждается теорией.

Какова же роль стального сердечника в трансформаторе?

Как известно, величина э. д. с. индукции зависит от величины магнитной индукции поля B . Магнитная индукция поля B в свою очередь зависит от магнитной проницаемости среды, в которой существует поле ($B = \mu H$). Для того чтобы э. д. с. индукции во вторичной обмотке была достаточно большой, прибегают к сердечнику, сделанному из трансформаторной стали, обладающей большой магнитной проницаемостью. Чтобы магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, был только в стали и не выходил в воздух (магнитная проницаемость воздуха в тысячи раз меньше магнитной проницаемости мягкой стали), сердечник должен быть замкнутым. Кроме того, он должен быть возможно меньшей длины. Тогда магнитный поток, созданный первичной обмоткой, будет полностью проходить внутри вторичной обмотки, не рассеиваясь в воздух.¹ Передача энергии из первичной обмотки во вторичную происходит при участии магнитного потока внутри сердечника трансформатора (см. стр. 250). Между сечением сердечника и мощностью, передаваемой из первичной обмотки во вторичную, существует связь: чем больше передаваемая мощность, тем больше должно быть сечение сердечника. Сечение сердечника приблизительно может быть найдено по формуле $S = \sqrt{P}$, где S — сечение сердечника в кв. сантиметрах, а P — передаваемая

¹ Здесь мы имеем в виду так называемый основной, или рабочий, поток трансформатора, пронизывающий обе обмотки. Небольшой поток рассеяния первичной катушки (замыкающийся через воздух) не учитывается.

мощность в ваттах. При значительном магнитном потоке объем стали в сердечнике будет по необходимости довольно большим. Поэтому сердечники трансформаторов, как правило, весьма массивны.

Для уменьшения потерь, связанных с вихревыми токами, сердечник делается не сплошным, а из отдельных изолированных листов. (Сердечник трансформатора является причиной некоторых потерь энергии, вызываемых, в частности, вихревыми токами. В случае тока высокой частоты эти потери оказываются очень значительными. Поэтому трансформаторы высокой частоты, употребляемые в радиотехнике, устраиваются или вовсе без сердечников, или с сердечниками, сделанными из специально изготовляемых магнитных материалов — магнитодиэлектриков, потери энергии в которых очень незначительны.)

Только при выполнении перечисленных выше условий (массивный замкнутый стальной сердечник, незначительные потери энергии в нем) магнитный поток во вторичной катушке будет таким же, как в первичной. Тогда э. д. с. в каждой витке первичной и вторичной обмоток будет одинаковой, а между напряжениями на обмотках будет иметь место установленное выше соотношение. Если же указанные условия не будут осуществлены, то магнитный поток во вторичной обмотке будет меньше, чем в первичной, и напряжение на ней будет меньше того, какое получается по расчету.

Сказанное о роли сердечника в трансформаторе может быть подтверждено опытом.

Возьмем сердечник школьного разборного трансформатора. Наденем на него катушку, создавая, например, понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации 1:2 (во вторичной обмотке витков примерно в два раза меньше, чем в первичной). Положим на место съемную часть сердечника и плотно прижмем ее винтами. Сердечник трансформатора замкнут. Присоединим к обмоткам трансформатора вольтметры. Включим в первичную обмотку ток от осветительной сети. Напряжение на первичной обмотке 127 в, на вторичной — около 60 в.

Снимем съемную часть сердечника и заменим тонким стальным бруском, соединив им оставшиеся части сердечника. Напряжение на первичной обмотке осталось прежним — 127 в, а на вторичной — заметно понизилось, стало, например, равным 40—45 в.

Снимем брусок стали, замыкавший сердечник. Напряжение на первичной обмотке прежнее, а на вторичной упало еще больше, например, до 15—20 в.

Обратим попутно внимание на гудение и дрожание трансформатора, особенно заметное во время замены съемной части сердечника небольшим бруском стали (мы его не поджимали винтами). Дрожание сердечника вызвано его постоянным перемагничиванием.

Из сказанного выше о соотношении напряжений на обмотках трансформатора вытекает, что число витков во вторичной обмотке определяется тем, какое напряжение необходимо получить на вторичной обмотке по сравнению с напряжением на первичной обмотке.

Какое же должно быть число витков в первичной обмотке?

По понятным соображениям при холостом ходе трансформатора он должен потреблять из сети как можно меньший ток. Для этого необходимо, чтобы индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора было достаточно большим. Выше (стр. 92) было указано, что индуктивность катушки тем больше, чем больше магнитная проницаемость сердечника, чем больше диаметр катушки, меньше ее длина и больше число витков в ней. Отсюда вытекает, что число витков в первичной обмотке должно быть достаточно большим. Приблизительно число витков на каждый вольт напряжения, приходящегося на первичную обмотку, может быть определено по формуле $n = \frac{50}{S}$, где 50 — постоянное число, а S — сечение сердечника трансформатора в кв. сантиметрах.

3. Соотношение между величиной тока и обмотках трансформатора и числом витков в них.

Перейдем теперь к краткому рассмотрению работы трансформатора при нагрузке. Если ко вторичной обмотке трансформатора подключены приемники электрической энергии, то по вторичной обмотке пойдет ток. Магнитный поток индукционного тока, как это известно из закона Ленца, противодействует первичному потоку, вызвавшему явление индукции. Следовательно, магнитный поток вторичной катушки размагничивает сердечник трансформатора.

Магнитный поток в сердечнике стал меньше того, какой был при холостом ходе. Поэтому уменьшится и индуктивное сопротивление первичной обмотки. В связи с этим уменьшится и величина э. д. с. самоиндукции в первичной обмотке. По этим причинам ток в первичной обмотке увеличивается. Возрастание тока в первичной обмотке происходит до тех пор, пока магнитный поток в сердечнике не станет таким, каким он был при холостом ходе. При этом размагничивающее влияние вторичной обмотки будет устранено, и э. д. с. самоиндукции в первичной обмотке увеличивается. Нарушенное равновесие между напряжением на первичной обмотке и э. д. с. самоиндукции в ней восстанавливается. Если нагрузка на трансформатор вновь увеличится, сопротивление подключенных ко вторичной обмотке приемников энергии уменьшится, ток во вторичной обмотке возрастет еще больше и описанный процесс повторится и ток в первичной обмотке тоже увеличится.

При уменьшении тока во вторичной обмотке размагничивающее действие его на сердечник трансформатора уменьшается, а магнитный поток в сердечнике начинает возрастать. Это изменение магнитного потока, охватываемого контуром первичной обмотки, вызывает увеличение э. д. с. самоиндукции E_1 в первичной обмотке. (Э. д. с. самоиндукции вызывается любым изменением магнитного потока: как увеличением его, так и уменьшением.) Ток в первичной обмотке уменьшается. По этой причине магнитный поток в сердечнике уменьшается. В результате магнитный поток остается таким, каким он был до изменения нагрузки.

Таким образом, при увеличении нагрузки трансформатора увеличивается ток не только во вторичной обмотке трансформатора (I_2), но и в первичной обмотке (I_1). И наоборот, при уменьшении тока во вторичной обмотке, уменьшается и ток в первичной обмотке.

Следовательно, при изменении нагрузки трансформатора автоматически соответственно изменяется количество энергии, потребляемой трансформатором из сети.

Каково же соотношение между токами I_1 и I_2 ?

Как было указано выше, при холостом ходе трансформатора ток во вторичной обмотке равен нулю, а в первичной — очень незначителен. Обозначим ток холостого хода в

первичной обмотке I_0 . При работе трансформатора с нагрузкой во вторичной обмотке появится ток I_2 , а ток в первичной обмотке увеличится на какую-то величину I_1 и станет равным $I_0 + I_1$. Ток холостого хода I_0 мал по сравнению с током в первичной обмотке I_1 , и поэтому его можно не учитывать, считая ток в первичной обмотке равным I_1 .

Тогда, в соответствии с тем, что было сказано выше, получается следующее. Во вторичной обмотке появляется ток I_2 , создающий магнитный поток, размагничивающий сердечник. В первичной обмотке возникает ток I_1 , создающий магнитный поток, восстанавливающий магнитный поток в сердечнике до того значения, какое он имел при холостом ходе. Очевидно, что намагничивающее действие тока I_1 равно намагничивающему действию тока I_2 .

Известно, что намагничивающее действие тока зависит не только от величины тока, но и от числа витков в катушке, будучи пропорциональным произведению тока на число витков в катушке. Это произведение называют ампер-витками. Тогда

$$I_1 w_1 = I_2 w_2,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (\text{VII})$$

Следовательно, ток в обмотках трансформатора, работающего при нагрузке, обратно пропорционален числу витков в обмотках.

Во время работы трансформатора при нагрузке имеет место падение напряжения в его обмотках, напряжение на вторичной обмотке несколько уменьшается (по сравнению с напряжением при холостом ходе). Изменение напряжения в современных трансформаторах невелико (2—3%). Если пренебречь им, то, имея в виду установленное ранее соотношение между напряжениями на обмотках трансформатора и числом витков в них [равенства (I) и (VI)], а также равенство (VII), имеем

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{w_1}{w_2}; \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{w_2}{w_1}; \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{U_2}{U_1}. \end{aligned} \quad (\text{VIII})$$

Ток в обмотках трансформатора, работающего при нагрузке, обратно пропорционален напряжению на них.

Таким образом, во время работы при нагрузке, например, повышающего трансформатора, ток I_2 во вторичной обмотке во столько раз меньше тока I_1 в первичной обмотке, во сколько раз напряжение на вторичной обмотке больше напряжения на первичной обмотке. В понижающем трансформаторе ток I_2 во вторичной обмотке больше тока I_1 в первичной обмотке, во сколько раз напряжение на вторичной обмотке меньше напряжения на первичной обмотке. Следовательно, в любом трансформаторе в той обмотке, напряжение на которой выше, ток меньше и наоборот. Поэтому обмотки с более высоким напряжением (с большим числом витков) обычно делают из более тонкого провода, чем обмотки низкого напряжения (с меньшим числом витков).

Какого же происхождения энергия тока во вторичной обмотке? Откуда она берется? Из всего сказанного выше о работе трансформатора вытекает следующее. Ток во вторичной обмотке возникает в результате явления электромагнитной индукции (изменения магнитного потока, созданного током в первичной обмотке), т. е. за счет энергии магнитного поля. А на образование магнитного поля расходуется энергия тока в первичной обмотке. В итоге энергия тока в первичной обмотке переходит в энергию магнитного поля, а эта последняя — в энергию тока во вторичной обмотке. Так происходит непрерывная передача энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную. При этом, как указывалось выше, с увеличением или уменьшением тока, потребляемого приемниками энергии из вторичной обмотки, автоматически соответственно увеличивается или уменьшается ток в первичной обмотке, т. е. увеличивается или уменьшается потребление энергии из сети.

4. Потери энергии в трансформаторе. К. п. д. его

Мощность, отдаваемая трансформатором приемникам с зажимов вторичной обмотки, является полезной мощностью. Мощность, потребляемая первичной обмоткой трансформатора от сети, есть затраченная мощность. По-

лезная мощность всегда несколько меньше затраченной. Обусловлено это потерями энергии в трансформаторе.

Потери в трансформаторе состоят из потерь в меди проводов и потерь в стали сердечника.

Потери в меди проводов первичной и вторичной обмоток вызваны активным сопротивлением проводов току. В результате обмотки нагреваются. (Так как количество теплоты, выделяющееся в проводнике при прохождении по нему тока, пропорционально квадрату тока, то потери в проводах обмоток увеличиваются с увеличением нагрузки трансформатора.)

Потери в стали сердечника складываются из потерь на перемагничивание стали (явление гистерезиса) и из потерь на вихревые токи. Сердечник трансформатора тоже несколько нагревается. (Эти потери одинаковы как при холостом ходе трансформатора, так и при нагрузке.) Нагревание мощного трансформатора может быть весьма значительным, поэтому мощные трансформаторы устраивают с масляным охлаждением. У такого трансформатора сердечник с обмотками помещается в стальной бак, наполненный минеральным маслом. Концы обмоток изолируются от бака и выводятся к изоляторам на верхней крышке бака.

В связи с неизбежными потерями энергии соотношение между напряжением на обмотках и числом витков в них выполняется не абсолютно точно. Это значит, что если во вторичной обмотке трансформатора витков равно в два раза больше, чем в первичной, то напряжение на вторичной обмотке будет больше, чем напряжение на первичной обмотке не в два раза, а несколько меньше. По этой причине во вторичной обмотке трансформатора делают несколько большее число витков или в первичной несколько меньшее, чем это нужно по расчету.

В связи с этим, ставя опыт, описанный в п. 2 настоящего параграфа, мы в наших рассуждениях округляли числа витков в обмотках трансформатора, сводя их к отношению целых чисел (1:2, 10:1).

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется отношением полезной мощности к затраченной и обычно берется в процентах.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Так как в трансформаторе нет никаких движущихся (трущихся) частей, то механические потери в нем отсутствуют. Потери в меди проводов и в стали сердечника очень невелики. В связи с этим к. п. д. трансформаторов высок. У трансформаторов разной мощности он различен и колеблется от 80 до 99%.

5. Применение трансформаторов

Одно из наиболее важных применений трансформатора — использование его в линиях передач электрической энергии на дальние расстояния. В предыдущем параграфе было установлено, что для уменьшения потерь энергии в линии передач необходимо переделать ток под возможно более высоким напряжением. Эта задача решается с помощью трансформаторов. Ток от генераторов электростанции поступает на повысительную подстанцию, где с помощью трансформаторов его напряжение повышается до 110 000 — 220 000 в. Под таким напряжением ток поступает в линию передачи. На понизительной подстанции (в районе потребления энергии) напряжение тока с помощью понижающих трансформаторов уменьшается до нескольких десятков тысяч вольт. После двукратного последующего уменьшения напряжения на трансформаторных подстанциях ток низкого напряжения поступает к потребителям энергии.

Мы остановились на одном из наиболее важных применений трансформатора. Область применения трансформаторов в настоящее время чрезвычайно широка. Трансформаторы применяются во всех тех многочисленных случаях, когда необходимо приспособить имеющееся напряжение к нуждам того или иного производства. Широчайшее распространение трансформаторы получили в радиотехнике. Так например, ни один ламповый радиоприемник не обходится без трансформаторов.

В соответствии с назначением трансформаторов, они различаются по мощности. Изготавливаются трансформаторы мощностью от нескольких ватт до десятков тысяч киловатт.

В качестве примера использования трансформатора в быту можно сослаться на звонокный трансформатор (так называемый „гном“). Для приведения в действие электрического звонка нужно напряжение порядка 3—8 в. Ос-

ветительная сеть обычно имеет напряжение 127 в, иногда 220 в. Звонокный трансформатор — понижающий. Он снижает напряжение со 127—220 в до 3—8 в. Первичная обмотка трансформатора включается в осветительную сеть, а во вторичную включается звонок (рис. 100). Последовательно со звонком соединена кнопка.

6. Изобретение трансформатора

Впервые идея трансформатора была использована в 1876 г. русским ученым П. Н. Яблочковым (1847—1894) в связи с необходимостью „дробить свет“ при употреблении „свечей Яблочкова“, а затем в 1882 г. в Москве демонстрировалась установка свечей Яблочкова с трансформатором, сконструированным замечательным русским изобретателем И. Ф. Усагиным (1855—1919).

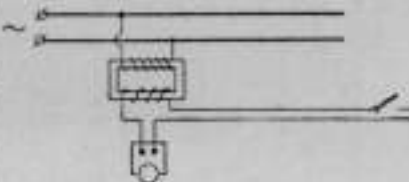


Рис. 100. Схема включения звонокного трансформатора в сеть.

Трансформатор И. Ф. Усагина отличался от трансформатора П. Н. Яблочкова своей конструкцией. Трансформатор П. Н. Яблочкова был типа индукционной катушки. Принципы действия их одинаковы. Честь изобретения трансформатора принадлежит русским физикам. Изобретение трансформатора быстро развивало электротехнику. Из всего сказанного выше о трансформаторах видно, насколько велико значение этого изобретения.

7. Трехфазный трансформатор

Рассмотренный нами трансформатор, предназначенный для сети однофазного тока, называют *однофазным трансформатором*. Трансформатор, предназначенный для сети трехфазного тока, называется *трехфазным трансформатором*. Назначение его — преобразование трехфазного тока одного напряжения в трехфазный ток другого напряжения.

Сердечник однофазного трансформатора (см. рис. 99) можно рассматривать как состоящий из двух стержней, верхние и нижние концы которых соединены ярмом. Сердечник трехфазного трансформатора (набранный также из

отдельных стальных листов) состоит из трех стержней, концы которых тоже соединены разом, так что сердечник оказывается замкнутым (рис. 101). На каждом стержне имеются одинаковые первичные обмотки и одинаковые вторичные обмотки. На каждый стержень надевается обмотка низкого напряжения (с меньшим числом витков), а поверх нее — обмотка высокого напряжения (с большим числом витков). На рис. 101 обмотки на каждом стержне для ясности показаны смещенными одна относительно

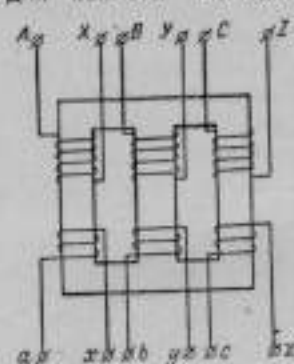


Рис. 101. Схематический чертеж трехфазного трансформатора.

другой. Первичная и вторичная обмотки на каждом стержне составляют одну фазу трансформатора. Начала обмоток высокого напряжения обозначаются буквами латинского алфавита A, B, C , а концы их X, Y, Z . Начала обмоток низкого напряжения a, b, c , а концы — x, y, z . Первичные и вторичные обмотки трансформатора соединяются или звездой (λ), или треугольником (Δ), или звездой с выведенной нулевой точкой (λ_0).

Первичные обмотки, соединенные звездой или треугольником, подключаются к трехфазной сети, а к соединенным звездой или треугольником вторичным обмоткам подключаются приемники электрической энергии так, как об этом было сказано в § 15 и 17. Схемы возможных соединений первичных и вторичных обмоток трехфазного трансформатора даны на рис. 102.

Физический процесс, протекающий в каждой фазе трехфазного трансформатора, совершенно такой же, как в уже рассмотренном нами однофазном трансформаторе.

Трехфазный трансформатор был изобретен М. О. Доливо-Добровольским. С помощью трехфазного трансформатора в 1891 г. Доливо-Добровольский впервые передал ток на расстоянии в 175 км.

Трехфазные трансформаторы широко применяются в промышленности.

Рассмотренная нами схема передачи электрической энергии на большие расстояния осуществляется трехфазным током с помощью трехфазных трансформаторов.

Можно образовать трехфазный трансформатор из трех одинаковых однофазных трансформаторов. Для этого нужно соединить первичные обмотки трансформаторов звездой или треугольником и подключить к генератору

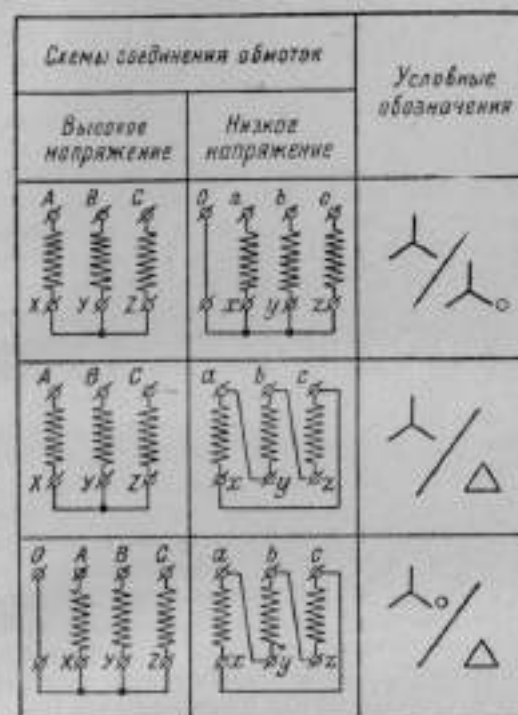


Рис. 102. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора.

трехфазного тока. Вторичные обмотки трансформаторов соединяются тоже звездой или треугольником и к ним подключаются приемники электрической энергии.

Методические указания

Изучение трансформатора может идти двумя путями. Можно начать ознакомление учащихся с основным свойством трансформатора изменять напряжение переменного тока с опыта, а затем обосновать теорией. Возможен

другой путь — соотношение между напряжением на обмотках и числом витков в них устанавливается теоретическим путем, а затем выводы проверяются экспериментально. Последний путь более целесообразен при достаточно хороших, осознанных знаниях учащихся, причем даже и в этом случае он несколько более трудоемок и требует больше времени, чем первый. В данном параграфе описывается первый путь.

Независимо от того, какая система построения учебного материала будет избрана учителем, одно несомненно — физическая сторона процесса трансформации должна быть изложена достаточно четко и ясно. Основное в ней — явление электромагнитной индукции и соотношение напряжения на обмотках в зависимости от числа витков в них. На это и следует обратить внимание при изложении п. 2 настоящего параграфа. Для понимания сути дела важно, чтобы учащиеся осознали, что магнитный поток в сердечнике трансформатора: 1) переменный, 2) замкнут сердечником, проходящим внутри обмоток; и 3) является общим для двух обмоток.

Знакомя учащихся с устройством трансформатора, следует показать его собранным, а затем разобрать его.

Из выпускаемых в настоящее время трансформаторов в школах обычно встречаются следующие.

В разборном трансформаторе (малом) указаний на число витков в катушках не дается ни на самом приборе, ни в брошюре, прилагаемой к нему. Трансформатор очень небольших размеров, неустойчивый, сердечник неудобной конструкции. Трансформатор универсальный (большой) — устойчивый, конструкция сердечника такова, что часть сердечника может быть изъята, данные о числе витков приведены в прилагаемой к прибору брошюре, а именно: катушка на 120 в имеет 570 витков, катушка на 220 в — 1100 витков и катушка на 12 в — 74 витка. С этим трансформатором с успехом могут быть осуществлены все нужные опыты.

Если по тем или иным причинам магнитные действия соленоида не демонстрировались, можно эту демонстрацию осуществить следующим образом.

Берем катушку с максимальным количеством витков. Ее можно включать прямо в сеть с напряжением 127 в, но лучше (катушка сильно греется) включить ее после-

довательно с реостатом, этим самым уменьшив несколько ток.

Включаем ток. Держа катушку горизонтально, подносим к торцу ее кусок стали, который резким рывком втягивается внутрь катушки.

Выключаем ток. Ставим катушку, на стол кладем полосу стали, так, чтобы она почти падала внутрь катушки.

Включаем ток. Сталь втягивается внутрь катушки. Поднимаем катушку над столом — кусок стали на столе нет.

Выключаем ток. Кусок стали падает из катушки на стол. Снимаем съемную часть сердечника (в малом трансформаторе вынуть одну половину сердечника). Пустим ток.

Поднося к сердечнику кусок стали, обнаруживаем, что сердечник сильно намагничивается. Напоминаем учащимся, что введя внутрь катушки стальной сердечник, мы в значительной степени усиливаем магнитные действия катушки (увеличиваем магнитную индукцию поля B).

Иногда может оказаться целесообразным начать ознакомление учащихся с трансформатором с постановки опыта по трансформации тока, питая обмотку первичной катушки от гальванического элемента (через ключ) сначала с одной парой катушек, потом с другой, сначала с разомкнутым сердечником, потом с замкнутым. После этого можно было бы перейти к рассмотрению того, что происходит при питании трансформатора переменным током.

К сожалению, на это обыкновенно не хватает времени. Если же время позволяет, можно пойти следующим путем, предлагаемым проф. М. Ю. Плотровским.¹

1. Включаем первичный ток и наблюдаем отклонение стрелки гальванометра, включенного во вторичную обмотку; замечаем величину и направление тока.

2. Выключаем первичный ток и наблюдаем отклонение стрелки гальванометра в обратную сторону.

3. Включаем первичный ток в обратном направлении; замечаем, что индукционный ток в случае (3) имеет то же направление, как и в случае (2), и заключаем, что

¹ Методический подход к изучению трансформатора представлялся бы удобным вести от классических опытов с «катушкой Фарадея». Выводящем первичную обмотку вместе с сердечником внутрь вторичной; концы вторичной обмотки отводим к гальванометру и, не изменяя относительного положения обмоток, пускаем в первичную постоянный ток через переключатель.

операции (2) и (3) могут быть объединены: одна может служить непосредственным продолжением другой. Проверим наше предположение опытом.

4. Одним движением переключателя включаем первичный ток и сразу же вновь включаем его в обратном направлении. Замечаем, что индукционный ток получился более сильный, чем в предыдущих опытах. Помогаем учащимся объяснить этот факт: сердечник не только размагничивается, но и переманичивается. Далее уже само собой напрашивается заключение, что вместо того, чтобы то включать, то выключать постоянный ток, удобнее использовать ток переменный. Осуществляем эту мысль на опыте, заменив гальванометр, непригодный для переменного тока, другим индикатором — маловольтной лампочкой, звонком, моторчиком, репродуктором. Удостоверяемся, что наше предположение подтверждается опытом.

Устанавливая экспериментально зависимость напряжения на вторичной обмотке от числа витков в ней, естественно привлечь внимание учащихся именно к числу витков в катушках, а не к надписям, имеющимся на них: „120 вольт“, „220 вольт“, о которых лучше и не говорить учащимся. (Не следует употреблять выражения: „Возьмем катушку на 120 вольт“ или „Возьмем катушку на 220 вольт“. Эти выражения лишены смысла для учащихся. Очевидно, нужно говорить: „Возьмем катушку с таким-то числом витков“.)

Число витков в обмотках нужно округлить, сведя их значения к таким, при которых отношение их станет отношением целых чисел. Наоборот, на него следует обратить внимание учащихся, сказав им о том, что соображения, по которым на катушки наносятся витки в таком „неудобном“ соотношении, будут установлены нами несколько позже. (К этому вопросу необходимо будет вернуться в связи с потерями энергии в трансформаторе.)

Ставя демонстрацию, нужно воспользоваться вольтметрами, шкала которых наиболее удобна для отсчета.

Кроме описанного в п. 2 опыта с вольтметрами, можно показать эффектный опыт с лампами накаливания. Берем две лампы, рассчитанные на напряжение в 220 в. Одну включаем прямо в осветительную сеть: горит недолго; другую — после повышающего трансформатора: горит ярко. Если нет ламп на 220 в, берем вместо каждой из них по 2 лампы на 127 в, соединенные последовательно.

Можно в этом случае воспользоваться двумя лампами на 127 в. Одну включаем в осветительную сеть, другую — после повышающего трансформатора. Первая горит нормально ярко, вторая значительно более ярко. При непродолжительном накале этой лампы она обычно не перегорает.

При постановке последнего опыта трудно делать какие-либо заключения о соотношении напряжений, которое приближенно может быть установлено на основе двух первых опытов с лампами. Это замечание особенно существенно учесть и более основательно его использовать, если, за неимением в кабинете физики вольтметра для напряжений до 240—250 в, придется ограничиться только опытами с лампами.¹

Надо сказать, что усвоение основ теории холостого хода трансформатора дается учащимся с большим трудом. Основные затруднения, по-видимому, связаны с тем, что в первичной обмотке, помимо напряжения, приложенного извне, существует противодействующий э. д. с. самоиндукции. Можно помочь учащимся преодолеть это затруднение, достаточно тщательно рассмотрев явление и, в частности, обратив их внимание на следующее. Благодаря приложенному к первичной обмотке напряжению, в этой обмотке возникает переменный ток, а в стальном сердечнике переменный магнитный поток. Магнитный поток — общий для двух обмоток. Естественно, что в *обеих обмотках* возбуждается э. д. с. индукции. Но для первичной обмотки эта э. д. с. есть э. д. с. самоиндукции, а для вторичной — э. д. с. индукции. Отсюда также вытекает, что э. д. с. самоиндукции в каждом витке первичной обмотки равна э. д. с. индукции в каждом витке вторичной обмотки.

Как известно, существует другой, упрощенный способ описания процесса трансформации. В общих чертах он сводится к следующему. На каждом витке первичной обмотки имеется некоторой величины напряжение, вызывающее в витке появление тока и магнитного потока. Так

¹ Напомним, что вольтметр на 150 в может быть легко превращен в вольтметр на 300 в, для чего достаточно ввести последовательно с ним реостат большого сопротивления и передвигать скользящий контакт этого реостата, пока показания вольтметра не снизятся до половины того, что он показывал без реостата. Можно также, имея два одинаковых вольтметра, включить в цепь повышенного напряжения оба последовательно.

как магнитный поток для обеих обмоток общий, то мы вправе ожидать, что на каждом витке вторичной обмотки возникнет напряжение такой же величины, какое имеется на каждом витке первичной обмотки. Отсюда легко устанавливается соотношение напряжений на обмотках трансформатора.

Такое рассуждение обычно, но в логическом отношении небезупречно. Дело в том, что напряжение, приложенное к каждому витку первичной обмотки, является причиной возникновения магнитного поля; напряжение же, возникающее в каждом витке вторичной обмотки, является следствием изменения этого магнитного поля. Количественное равенство этих двух напряжений, без более глубокого количественного изучения свойств магнитного поля и законов электромагнитной индукции, логически не вытекает из существующей между ними причинной зависимости. Кроме того, в этом толковании процесса трансформации отсутствует в. д. с. самоиндукции в первичной обмотке, ролью которой пренебрегать нельзя. Поэтому, по необходимости сохраняя указанное упрощенное объяснение явления в младших классах школы, в X классе желательно прибегнуть к описанию трансформации, в большей мере соответствующему истинному положению дел. Тем не менее возможно, что в отдельных случаях и в X классе придется прибегнуть к первому (упрощенному) варианту.

Физический процесс в трансформаторе неразрывно связан с сердечником. Поэтому краткое освещение роли сердечника (данное в конце п. 2) крайне желательно сохранить.

Вопрос о величине тока в обмотках трансформатора при нагрузке распадается на две части: а) автоматическое регулирование трансформатором энергии, потребляемой им от сети, и б) соотношение токов в обмотках трансформатора. Для пути, использованного в данном параграфе при рассмотрении работы нагруженного трансформатора, характерно следующее: 1) сначала устанавливается, что изменение тока I_2 вызывает соответствующее изменение тока I_1 ; 2) затем обоснованию утверждается, что намагничивающее действие (намагничивающая сила) токов I_1 и I_2 одинакова; 3) наконец, исходя из равенства числа ампер-витков в обеих обмотках, устанавливается соотношение токов I_1 и I_2 . (Кстати, приведенные три по-

ложения могут рассматриваться как план изложения на уроке материала, содержащегося в п. 3 настоящего параграфа. В целях достижения нужной последовательности и четкости в объяснении учебного материала, полезно иметь подобный план не только в данном случае, но и во всех остальных. Особенно существенно иметь такой схематичный план в том случае, если предполагается сократить материал, содержащийся в данном параграфе. В этом случае достигается нужная систематичность в изложении и полностью исключается возможность случайной ошибки, в результате которой из цепи рассуждений иногда выпадает принципиально важное звено.)

Усвоение этого вопроса — работы трансформатора при нагрузке — вызывает большие трудности у учащихся, особенно первая его часть: взаимосвязь изменений токов во вторичной и первичной обмотках.

Заметим, что и здесь возможен более простой вариант, сводящийся, в общих чертах, к следующему.

Рассказываем учащимся, как происходит передача энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную (см. последний абзац п. 3 настоящего параграфа). Вспоминаем закон сохранения энергии.

Сообщаем далее учащимся, что из-за отсутствия в трансформаторе движущихся (трещащих) частей потери энергии в нем незначительны. Чем вызываются имеющиеся все же в трансформаторе потери, мы узнаем позже. Приводим учащихся к выводу о том, что если откинуть незначительные в трансформаторе потери, можно считать, что мощности в обеих обмотках трансформатора одинаковы.

$$P_1 = P_2;$$

$$I_1 u_1 = I_2 u_2.$$

Отсюда:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{u_2}{u_1}. \quad (1)$$

Следовательно, в обмотке, в которой напряжение увеличено в несколько раз, ток меньше в то же число раз и наоборот. Приходим к выводу: *ток в обмотках трансформатора, работающего при нагрузке, обратно пропорционален напряжению на них.* (Краткий анализ полученного соотношения см. в п. 3.)

например, с коэффициентом трансформации 1:2, и, используя один из них как повышающий, а другой как понижающий, собрать установку, изображенную на рис. 104. Во вторичную обмотку понижающего трансформатора включаем лампу накаливания. Первичную обмотку повышающего трансформатора включаем в осветительную сеть.

Во время этой демонстрации чрезвычайно полезно вернуться к борьбе с потерями энергии в проводах, осуществленной путем уменьшения тока при соответствующем увеличении напряжения. Для этого в высоковольтную проводку нужно включить реостат большого сопротивления и показать, что увеличение сопротивления в высоко-

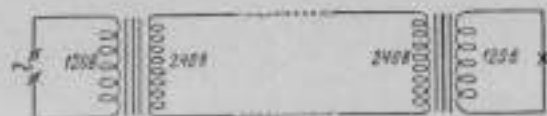


Рис. 104. Схема передачи электрической энергии на большие расстояния.

вольтной цепи очень мало влияет на накал лампы, так как потери энергии относительно невелики, тогда как такое же сопротивление, введенное в низковольтную цепь лампы, снижает напряжение (потери энергии значительно больше) весьма заметно. Перед экспериментом целесообразно предложить учащимся попытаться предсказать результаты опыта.

Выяснив роль трансформатора в передаче тока на большие расстояния, полезно хотя бы очень кратко рассказать учащимся об использовании трансформатора во всех тех случаях, когда нужно преобразовать имеющееся напряжение, приспособив его к нуждам каждого данного производства (см. методические указания к § 29). Звонковый трансформатор приведен в качестве наиболее простого примера использования трансформатора в быту.

Пункт 6 в замечаниях не нуждается.

Относительно п. 7 надо сказать, что трехфазный трансформатор в программе не упоминается. Однако политехническое значение его очень велико. Желательно изыскать возможность для того, чтобы сказать учащимся об устройстве трехфазного трансформатора. Имеющегося в п. 7 материала вполне достаточно. Схему рис. 102

можно не приводить или воспользоваться заранее подготовленной таблицей.

При желании легко продемонстрировать трехфазный трансформатор, составленный из трех одинаковых школьных (разборных) однофазных трансформаторов. Для этой цели нужно собрать три трансформатора, каждый с одной катушкой на 220 в и другой — на 120 в, или 6 и 6 в, в зависимости от того, какое пониженное напряжение желательно получить. Первичными обмотками трехфазного трансформатора следует сделать катушки с надписью „220 в“. Их нужно соединить *треугольником*, если линейное напряжение в сети 220 в (оно таково, если фазное напряжение осветительной сети 127 в), или *звездой*, если линейное напряжение сети 380 в (оно таково, если фазное напряжение сети 220 в). Катушки с надписью „120 в“ или „6 в“ и „6 в“ обращаем во вторичные обмотки трехфазного трансформатора, соединив их звездой или *треугольником*. Первичные обмотки включаем в трехфазную сеть, а во вторичные обмотки включаем (соединив звездой или *треугольником*) лампы накаливания на 127 в или мало-вольтовые, в зависимости от того, какие катушки использованы для вторичной обмотки. С помощью вольтметров измеряем линейное напряжение на первичной и вторичной обмотках собранного трехфазного трансформатора.

В ряде случаев (например, при изучении тока в газах) мы пользовались индукционной катушкой Румкорфа. Понадобится она и в дальнейшем. Индукционные катушки не отжили свое время и применяются довольно часто (в телефонии, в системе зажигания автомобиля и в других случаях). Здесь представлялось бы уместным, не рассматривая устройства индукционной катушки, только показать ее и сказать несколько фраз о ее действии. Очевидно, что индукционную катушку следует рассматривать как повышающий трансформатор, преобразующий не переменный, а прерывистый постоянный ток.

ГЛАВА VI

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СССР

§ 31. Физические основы электрификации

1. Преимущества электрической энергии

Электрическая энергия обладает рядом преимуществ перед другими видами энергии. В настоящее время это наиболее дешевый вид энергии. Себестоимость киловатт-часа электрической энергии, особенно на мощных гидроэлектростанциях, невелика. Электрическая энергия легко дробима: от электрических сетей питаются током приемники электрической энергии самых различных мощностей — от ничтожно малой до очень большой. Электрическая энергия может быть легко превращаема в другие виды энергии — во внутреннюю энергию тел (теплоту), в механическую, лучистую, химическую. И наконец, одно из наиболее важных достоинств электрической энергии состоит в том, что она может быть передана с относительно небольшими потерями на огромные расстояния.

Механическую энергию удавалось передавать лишь на несколько десятков метров (с помощью трансмиссий с ременным приводом). Тепло (пар, горячая вода) может быть передано на расстояние до 10 км. И только электрическую энергию удастся передавать на сотни километров. Это качество электрической энергии особенно существенно для СССР с его огромными просторами.

Как уже указывалось, электростанции выгодно располагать в местах, где имеются большие природные запасы энергии в виде энергии торфа, бурого угля, падающей воды. Используются топливо низких сортов и энергия падающей воды, что позволяет более рационально употребить топливо высокого качества и освободить транспорт от перевозки огромного количества топлива. Поэтому

возможность передавать электрическую энергию на большие расстояния приобретает в экономическом отношении решающее значение.

2. Электрификация СССР

Электрификация нашей страны является основой технического прогресса. В. И. Ленин придавал огромное значение электрификации СССР. По указанию В. И. Ленина в 1920 г. была создана Государственная комиссия по электрификации России (ГОЭЛРО), разработавшая план электрификации нашей страны. По этому плану намечалось в течение 10—15 лет построить 30 районных электростанций общей мощностью в 1,75 млн. *квт.* План ГОЭЛРО был перевыполнен. Уже в 1932 г. общая мощность районных станций была 2,9 млн. *квт.* За годы второй пятилетки мощность станций возросла до 8,1 млн. *квт.*, а к концу 1950 г. стала свыше 19,8 млн. *квт.* В соответствии с пятым пятилетним планом, мощность станций увеличилась примерно в 2,5 раза. Ведется строительство мощнейших станций — Куйбышевской (2 млн. 100 тыс. *квт.*) и других. В 1956 г. первые агрегаты Куйбышевской ГЭС введены в действие и дают ток.

Планом шестой пятилетки (1956—1960 гг.) намечено построить атомные электростанции общей мощностью в 2—2,5 млн. *квт.*, ввести в действие строящиеся и построить новые гидроэлектростанции на Волге, Каме, Днестре, Ангаре, Енисее и других реках. Общая мощность станций возрастет к концу шестой пятилетки больше, чем в 2,5 раза.

В 1960 г. станции нашей страны дадут 320 млрд. *квт-ч* электрической энергии, что составляет 188% от электроэнергии, выработанной в 1955 году.

3. Типы электростанций. Линии передач

Где же получается и как доводится до потребителей этот мощный поток электрической энергии? Основными, наиболее крупными станциями в настоящее время являются *районные центральные электрические станции*, дающие большую часть электрической энергии, вырабатываемой в СССР. С этих станций, расположенных в районах больших природных запасов энергии, выработанная

ими электрическая энергия по линиям передач поступает в места потребления энергии.

Другой тип электростанций — *теплоэлектростанции* (ТЭЦ). Эти станции дают электрический ток и тепло, переносимое водяным паром или горячей водой. Тепло используется для теплофикации жилых и рабочих помещений и для нужд промышленных предприятий. Теплоэлектростанции обычно строятся в районах потребления энергии.

Третий тип электростанций — *электростанции местного значения*. Эти станции, значительно меньшей мощности, удовлетворяют нужды отдельных предприятий, небольших городов, сельских местностей. Располагаются они в районах потребления энергии.

Все станции, кроме отдельных станций местного значения (вырабатывающих постоянный ток), генерируют трехфазный переменный ток.

По роду энергии, потребляемой электростанциями, они делятся на *гидроэлектростанции*, *тепловые электростанции* и *ветровые электростанции*.

Источником тока на гидроэлектростанциях является гидрогенератор — генератор трехфазного тока, ротор которого помещен на одном валу с гидротурбиной. Энергия движущейся воды в гидротурбине превращается в механическую энергию ее ротора, а в генераторе тока — в электрическую. Стоимость строительства гидроэлектростанций весьма высока, что обусловлено необходимостью возводить гидротехнические сооружения (плотины, подвод воды к турбинам). Но эти капитальные затраты возмещаются тем, что обслуживание гидроэлектростанций проще, а значит — дешевле. Обслуживающего персонала на гидроэлектростанциях во много раз меньше того, какой нужен на тепловых станциях. Так, на обслуживании Куйбышевской и Сталинградской станций, общая мощность которых 3 млн. 800 тыс. *квт*, будет занято около 1600—1800 человек. Если бы то же количество электрической энергии вырабатывалось на тепловых станциях, нужен был бы обслуживающий персонал в количестве 30—40 тыс. человек.

Гидротехнические сооружения исключительно долговечны, так же как и тихоходные гидрогенераторы. Срок службы гидрогенераторов до капитального ремонта порядка 100 лет. Поэтому в конечном счете гидроэлектростанции наиболее экономичны. Стоимость энергии, дава-

мой гидроэлектростанциями, в 4—5 раз меньше стоимости энергии, вырабатываемой на тепловых станциях. Именно поэтому строительству гидроэлектростанций у нас уделяется такое большое внимание.

Генератор трехфазного тока на тепловых станциях приводится во вращение чаще всего паровой турбиной (районные станции), реже — двигателем внутреннего сгорания (станции местного значения). На первых из указанных станций обычно применяются турбогенераторы (генераторы, ротор которых расположен на одном валу с турбиной). В котельных установках энергия топлива превращается в энергию пара. В турбине энергия пара превращается в механическую, а затем в генераторе — в электрическую. В теплоэлектростанциях пар, отработавший в турбинах, используется для целей теплофикации.

На станциях с двигателями внутреннего сгорания энергия топлива превращается сначала в механическую, а затем в генераторе, соединенном с двигателем, — в электрическую.

На ветровых электростанциях применяют ветровые двигатели, соединенные с генератором. Большого распространения такие станции пока еще не получили. Это — станции небольшой мощности, местного значения; часто обслуживают одну какую-либо установку.

Генераторы районных электрических станций дают ток под напряжением 6—10—15 *кв*. Далее ток поступает на повысительную подстанцию, где его напряжение повышается до 110 или 220 *кв*, под которым ток поступает в линию передачи. В районе потребления энергии на понизительных подстанциях напряжение снижается до 35 *кв*. Далее ток дважды поступает на трансформаторные подстанции, на первой напряжение понижается до 10—6 *кв*, а на второй — до напряжения 220 *в*, под которым ток поступает к потребителям.

Цель многократных преобразований напряжения — борьба с потерями энергии. По мере того как уменьшается расстояние, на которое передается ток (от одной подстанции до другой), можно уменьшать напряжение. Такое решение задачи оказалось возможным благодаря очень высокому к. п. д. трансформаторов и отсутствию необходимости в непрерывном обслуживании их. В настоящее время спроектированы линии передач от Куйбышевской и Сталинградской ГЭС на напряжение в 400 *кв*,

Линии передач высокого напряжения (35—220 кВ) являются воздушными линиями. Голые металлические провода крепятся на гирляндах изоляторов, подвешенных на металлических мачтах. Расстояние между мачтами порядка 200 м. В целях борьбы с атмосферными разрядами над проводами линии электропередачи (по вершинам мачт) подвешиваются металлические заземленные тросы. Для воздушных линий низкого напряжения мачты делаются деревянными. Подземная проводка осуществляется трехфазным кабелем. Он состоит из трех изолированных проводов (жил), заключенных в металлическую оболочку.

4. Энергетические системы

Ток, подаваемый потребителям электрической энергии, должен быть строго стабильным в отношении напряжения и частоты. Изменения напряжения ухудшают работу приемников тока и портят их. Например, уменьшение напряжения ухудшает работу двигателей, лампы накаливания дают меньше света, работа радиоприемников резко ухудшается и т. д. Увеличение напряжения ведет к перегрузке и к *быстрому износу* потребителей тока. Недопустимо изменение частоты напряжения и тока, так как все приемники электрической энергии рассчитаны на стандартную частоту в 50 Гц, и при другой частоте работа их нарушается.

Величина напряжения и частота напряжения и тока зависят от скорости вращения роторов в генераторах. Скорость же вращения роторов зависит от количества потребляемой от генераторов энергии. Если мощность генератора больше той, какая в данное время отбирается от генератора потребителями, то скорость вращения ротора увеличивается. В связи с этим растет напряжение и частота тока. Если же потребителям в данный момент нужна большая мощность, чем развиваемая генератором, то скорость вращения его ротора уменьшается. Напряжение и частота падают.

Оказывается, что *генератор работает в нормальных условиях только в том случае, если вся вырабатываемая им энергия потребляется приемниками тока.*

Осуществить такие условия в работе одной станции весьма затруднительно, так как потребление электроэнергии колеблется в широких пределах. Особенно трудно решение этой задачи на гидроэлектростанциях, работа которых зависит от количества воды в реке или в водохранилище. Количество воды в разное время года различно.

Несравненно легче создать нормальные условия для работы генераторов, объединив электростанции в одну систему. С этой целью электростанции соединяются высоковольтными линиями.

Совокупность электростанций, связанных между собой высоковольтными электрическими сетями, называется энергетической системой (энергосистемой).

В СССР созданы многочисленные энергосистемы, вырабатывающие огромное количество электрической энергии. Отдельные энергосистемы постепенно объединяют, соединяя их высоковольтными линиями и получая более крупные энергосистемы. Так, объединены энергосистемы Москвы, Горького, Иванова и Ярославля, а также Донбасса и Приднепровья.

Таким путем создается единая высоковольтная сеть европейской части СССР (ЕВС), которая в конечном счете станет единой огромной энергосистемой, обеспечивающей энергией всю европейскую часть СССР.

Методические указания

Материал данного параграфа имеет не только образовательное, но и воспитательное значение.

Рассказывая об электрификации СССР, необходимо показать грандиозный размах работ в нашей стране по строительству электростанций, призванных удовлетворить огромные потребности народного хозяйства в электрической энергии.

На уроке следует использовать последние сведения нашей периодической печати о ходе работ на строящихся станциях, о пущенных в ход станциях.

Общие сведения об условиях для нормальной работы генераторов и об энергосистемах представляют большой интерес с точки зрения физики. Программой они не предусмотрены.

§ 32. Применение электрической энергии в народном хозяйстве

В настоящее время *электрическая энергия является основным видом энергии, потребляемой нашей промышленностью*. Технологический процесс многих производств: электрометаллургии, электрохимии и других, основан на применении электрической энергии.

Всевозможные станки и машины на самых разнообразных производствах оборудованы электродвигателями.

Многие процессы в угольной промышленности электрифицированы. Электрическая энергия в широких размерах используется и в лесной промышленности: электропилы, электролебедки и другие механизмы, в основе которых — электродвигатели. Для обслуживания электромеханизмов созданы мощные передвижные электростанции. Электродвигатели в большом количестве применяются в мощных экскаваторах, в земных снарядах.

Появились новые способы обработки металлов с помощью электрической энергии: электронская обработка металлов, закалка деталей токами высокой частоты (а также сушка древесины). Электродвигатели находят все большее применение на транспорте: трамваи, троллейбусы, метро. Многие железные дороги электрифицируются.

Все в большей мере электрическая энергия проникает и в сельское хозяйство. Созданы электротракторы и электрокомбайны. В тысячах животноводческих ферм электрифицированы наиболее трудоемкие процессы: водоснабжение, кормоприготовление, доение и переработка молока, стрижка овец. Сконструированы и выпускаются кормоприготовительный агрегат (КЛК-1,5), универсальная дробилка кормов (ДКУ-1,2), приводимые в действие электродвигателями.

Электрификация сельского хозяйства характеризуется следующими данными.

В 1940 г. в колхозах СССР имелось 10 тыс. электроустановок общей мощностью в 270 тыс. *квт*, в 1951 г. количество установок увеличилось до 38 тыс., т. е. в 3,8 раза, а мощность увеличилась до 1320 тыс. *квт*, т. е. в 4,8 раза. В начале 1953 г. общая мощность сельских электростанций и обслуживающих сельское хозяйство трансформаторных подстанций от промышленных

энергосистем достигала 1500 тыс. *квт*. Число электрифицированных колхозов с 10 тыс. в 1940 г. увеличилось до 29,5 тыс. в 1951 г. В 1954 г. было электрифицировано 23% общего количества колхозов. Электрификация МТС практически была завершена в 1952 г.* (Д. Г. Жигерин. Электрификация народного хозяйства СССР. Изд-во „Знание“ М., 1954.)

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Попов, Н. Н. Мансуров, С. А. Николаев. Электротехника. Госэнергоиздат, М., 1956.
2. А. С. Мощевитин. Электротехника. Военное изд-во Министерства обороны Союза ССР, М., 1956.
3. К. А. Десяткин. Электротехника. Военное изд-во Военного Министерства СССР, М., 1950.
4. Н. Д. Пасечник. Элементарная электротехника. ГИТТЛ УССР, Киев, 1955.
5. Е. Н. Горичкин. Переменный ток. Учпедгиз, М., 1939.
6. Н. П. Жеребцов. Радиотехника. Связьиздат, М., 1953.
7. М. А. Ушаков. К изучению законов электрического тока. Учпедгиз, 1953.
8. М. А. Ушаков. Изучение трехфазного тока в школе. Учпедгиз, 1935.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	2
Введение	9

Глава I. Однофазный переменный ток

§ 1. Получение переменной э. д. с.	6
Методические указания	13
§ 2. Колебания э. д. с. График э. д. с.	16
Методические указания	19
§ 3. Переменный ток	20
Методические указания	27
§ 4. Методы исследования переменного тока	29
Шлейф-осциллограф	30
Электронный осциллограф	32
Методические указания	34
§ 5. Генератор переменного тока	43
Генератор с вращающимся якорем	44
Генератор с вращающимся индуктором	46
Методические указания	48
§ 6. Графические способы изображения переменного тока	49
§ 7. Сдвиг фаз. Векторные диаграммы	52
Методические указания	55
§ 8. Действующее значение переменного тока и напряжения	58
Методические указания	60
§ 9. Активное сопротивление	60
Методические указания	63
§ 10. Емкостное сопротивление	64
Методические указания	76
§ 11. Индуктивное сопротивление	79
Методические указания	99

Глава II. Трехфазный переменный ток

§ 12. Получение трехфазного тока	108
Методические указания	121
§ 13. Соединение обмоток генератора звездой. Четырехпроводная трехфазная система	133
Методические указания	135
§ 14. Фазные и линейные напряжения	138

Методические указания	140
§ 15. Соединение приемников энергии звездой	142
Методические указания	142
§ 16. Трехпроводная трехфазная система при соединении обмоток генератора звездой	145
Методические указания	146
§ 17. Соединение обмоток генератора и приемников энергии треугольником	150
Методические указания	154
§ 18. Генератор трехфазного тока	158
Методические указания	161
§ 19. Принцип действия асинхронного электродвигателя. Вращающееся магнитное поле	162
Методические указания	170
§ 20. Асинхронный электродвигатель трехфазного тока	174
Методические указания	179
§ 21. Михаил Осипович Добин-Добропольский	181
Методические указания	182

Глава III. Выпрямление переменного тока

§ 22. Преобразование переменного тока в постоянный	184
Методические указания	185
§ 23. Двухэлектродная электронная лампа	186
Методические указания	193
§ 24. Кенотронный выпрямитель. Ионные выпрямители	195
Методические указания	201
§ 25. Твердые (полупроводниковые) выпрямители	203
Купровый (меднозакисный) выпрямитель	205
Селеновый выпрямитель	—
Германиевый выпрямитель	207
Методические указания	—

Глава IV. Электрические машины постоянного тока

§ 26. Генератор постоянного тока	210
Методические указания	215
§ 27. Типы генераторов постоянного тока	216
Генератор с параллельным возбуждением (шунт-машина)	218
Генератор с последовательным возбуждением (серьес-машина)	220
Генератор со смешанным возбуждением (компаунд-машина)	221
Методические указания	222
§ 28. Электродвигатель постоянного тока	223
Методические указания	226

Глава V. Трансформация тока

§ 29. Передача электрической энергии. Потери энергии в линиях передачи и меры борьбы с ними	228
Методические указания	235
§ 30. Трансформатор	240
1. Устройство трансформатора	—
2. Соотношение между напряжением на обмотках трансформатора и числом витков в них	241

3. Соотношение между величиной тока в обмотках трансформатора и числом витков в них	247
4. Потери энергии в трансформаторе. К. п. д. его	250
5. Применение трансформаторов	252
6. Изобретение трансформатора	253
7. Трехфазный трансформатор	—
Методические указания	255

Глава VI. Электрификация СССР

§ 31. Физические основы электрификации	266
1. Преимущества электрической энергии	—
2. Электрификация СССР	267
3. Типы электростанций. Линии передач	—
4. Энергетические системы	270
Методические указания	271
§ 32. Применение электрической энергии в народном хозяйстве	272
Литература	274

Константин Николаевич Елизаров

Переменный ток в курсе физики
средней школы

Редактор *И. В. Барковский*

Худож. редактор *Н. Б. Михневич*

Техн. редактор *Л. А. Леонтьева*

Корректор *А. А. Морозова*

Сдано в набор 10/III 1967 г. Подписано к печати
22/IX 1967 г. Печ. л. 17,5 (14,86). Уч.-изд. л. 11,52.
Формат 84 × 109/32. Тираж 20 000 экз.
М-01900. Заказ № 243. Цена без пересылки 3 р. 70 к.
Переплет 80 к.

Ленинградское отделение Учпедгиз.
Невский пр., 28

Министерство культуры СССР. Главное
управление полиграфической промышленности.
2-я типография «Печатный Двор»
им. А. М. Горького. Ленинград, Гатчинская, 28