



---

М. А. УШАКОВ

ИЗУЧЕНИЕ  
ТРЕХФАЗНОГО  
ТОКА  
В ШКОЛЕ

---

УЧПЕДГИЗ

1 9 5 5



М. А. УШАКОВ

# ИЗУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА В ШКОЛЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР  
Москва 1955



## ВВЕДЕНИЕ

В программу средней школы 1954/55 учебного года введены основные представления о трёхфазном переменном токе и о принципе устройства электродвигателя трёхфазного тока.

В связи с этим ощущается острая необходимость в методической разработке этой темы применительно к имеющемуся оборудованию физических кабинетов или к такому оборудованию, которое без особых затруднений может быть создано силами кружков при физических кабинетах под руководством учителя.

Методическая разработка указанной темы осложняется тем обстоятельством, что значительное количество сельских школ не имеют ввода трёхфазного переменного тока, а следовательно, в этих школах нет возможности поставить необходимый эксперимент, предусмотренный программой.

Наличие в школе сети трёхфазного переменного тока даёт возможность поставить некоторый эксперимент по данной теме. Становится возможным с помощью осциллографа показать осциллограмму трёхфазного тока. Можно показать вращение магнитного поля при прохождении трёхфазного переменного тока по статорным обмоткам двигателя или обмоткам соответственно расположенных катушек, и, наконец, можно показать различные виды соединения нагрузок. Однако заметим, что применение осциллографических методов исследования трёхфазного тока с методической точки зрения мало ценно. Малая ценность этого метода (несмотря на применение дорогостоящего оборудования) объясняется тем обстоятельством, что учащиеся на данной ступени изучения физики недостаточно подготовлены к чтению осциллограмм и наблюдаемые ими на экране осциллографа «змейки» часто не ассоциируются с конкретными физическими процессами,

возникающими в цепях переменного тока. Точно так же и демонстрация вращающегося магнитного поля с использованием городской сети не представляет особой ценности. Этот опыт очень интересен по своему эффекту, но разобраться в существе наблюдаемого явления очень трудно в силу огромной скорости происходящих в нём процессов. При частоте тока в 50 гц скорость вращения магнитного поля (при одной катушке на фазу) будет равна  $3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ , и проследить синхронность вращения магнитной

стрелки или асинхронность вращения железного диска в таком поле не представляется возможным, а, кроме того, как может учитель говорить об асинхронности вращения диска, если скорость вращения поля ничем не регистрируется. Для убеждения учащихся в том, что диск во вращающемся магнитном поле вращается асинхронно, мы прибегаем к длинным рассуждениям, которые, не опираясь на зрительное наблюдение, быстро исчезают из памяти учащихся.

В некоторых школах по данной теме используются самодельные модели индукционных генераторов трёхфазного переменного тока. Конечно, такие приборы оставляют конкретные образы в памяти учащихся, что способствует прочности приобретаемых знаний, но использование подобных моделей в качестве источников тока невозможно по двум причинам: во-первых, работа таких генераторов — моделей — очень нестабильна, и, во-вторых, токи, даваемые подобными моделями, слишком слабы и не могут дать необходимого эффекта.

Учитывая все перечисленные выше затруднения, мы попытались разработать методику изучения трёхфазного переменного тока, пригодную для всех без исключения школ, в том числе и тех, которые не имеют не только сети трёхфазного переменного тока, но и сети однофазного тока. С помощью довольно простых самодельных приборов оказывается возможным с максимальной наглядностью и простотой продемонстрировать те сложные явления в цепях переменных токов, изучение которых предусматривается школьной программой.

В этой работе мы стремились разрешить наиболее сложные в методическом отношении вопросы, с которыми приходится сталкиваться при изучении трёхфазного переменного тока в школе.

В основе предлагаемой системы изучения трёхфазного переменного тока лежит создание модели генератора несколько необычного типа. По существу эта модель генератора является механическим преобразователем постоянного тока в трёхфазный переменный ток. Эта модель генератора может быть изготовлена силами любого физического кабинета. Правда, здесь нам могут возразить, сказав, что изучать физические явления следует не на моделях, а в их «натуральном» виде. Но такое возражение будет чисто формальным и глубоко ошибочным. В процессе обучения мы должны использовать все средства в целях достижения наибольшего эффекта, в том числе и моделирование. Там, где в настоящее время мы не в состоянии обеспечить демонстрацию физических явлений в их «натуральном» виде, там непременно следует прибегать к моделям, а не отказываться от наглядности совершенно. Никто не может отрицать той огромной роли, которую играют модели в учебном процессе. Они дают возможность рассматривать отдельные стадии быстро проходящих процессов, создавая при этом чёткие образы в сознании учащихся, что обеспечивает не только сознательность восприятия, но и прочность приобретаемых знаний. «Кто не замечал над собой, — писал К. Д. Ушинский, — что в памяти нашей сохраняются с особенной прочностью те образы, которые мы воспринимаем сами посредством созерцания, и что к такой врезавшейся в нас картине мы легко и прочно привязываем даже отвлечённые идеи, которые без того изгладились бы быстро...»<sup>1</sup>.

Следует иметь в виду, что применение моделей может дать надлежащий эффект только в том случае, если оно разумно сочетается с прочими видами демонстраций.

Считаем целесообразным наряду с вопросами трёхфазного тока рассмотреть и основные вопросы однофазного переменного тока, чёткое усвоение которых должно предшествовать изучению многофазных токов. Мы не ставили перед собой задачи систематического изложения вопросов переменных токов, а стремились по возможности ограничиться разрешением методических и экспериментальных затруднений, связанных с изучением этой темы.

---

<sup>1</sup> К. Д. Ушинский, Избр. соч., 1939, стр. 155—156.

## ПЕРЕМЕННЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ ТОК

При изучении однофазного переменного тока мы прежде всего сталкиваемся с затруднениями, связанными с наблюдением характера изменений значений тока и напряжения в цепях переменного тока. Правда, можно было бы воспользоваться действующей моделью индукционного генератора и, включив его на соответствующую нагрузку, показать характер изменения тока и напряжения в функции изменения угла поворота ротора (во времени), однако демонстрации подобного рода носят очень грубый характер и наблюдаемый эффект лишён стабильности, так как стрелка прибора (гальванометра) хорошо отклоняется только тогда, когда её собственная частота колебаний равна или очень близка к частоте индуктируемого тока. В противном случае мы наблюдаем биения: стрелка очень быстро успокаивается, после чего начинает колебаться снова и т. д. Из подобных наблюдений мы не можем установить зависимости между током (или напряжением) и углом поворота ротора, т. е. подобная демонстрация не обеспечивает чёткого зрительного образа наблюдаемого явления. Если же мы обратимся к осциллографу, то наблюдаемая нами осциллограмма с большим трудом воспринимается некоторыми учащимися, так как они ещё не подготовлены для чтения и анализа осциллограмм, а учить этому следует безусловно на приборах, в которых интересующие нас зависимости (зависимость тока и напряжения от угла поворота ротора) выступают с предельной ясностью.

Для разрешения указанного затруднения мы рекомендуем воспользоваться действующей моделью генератора переменного тока, которая по существу является преобразователем постоянного тока в переменный. Эта действующая модель может давать переменные токи большой силы с частотами от нуля до частот, ограничиваемых механической прочностью модели. Естественно, что получаемый переменный ток от такой модели обладает всеми свойствами индукционного переменного тока.

Принцип работы модели генератора разберём предварительно на схеме (рис. 1). Возьмём реостат и включим его концы на постоянный источник тока. Очевидно, что потенциал ползунка  $\Pi$  относительно средней точки реостата  $O$  может изменяться по нашему желанию. Если мы

будем ползунок реостата перемещать вверх относительно средней точки, то потенциал его будет отрицательным, а при перемещении вниз его потенциал станет положительным относительно той же средней точки  $O$ . Если мы теперь среднюю точку реостата и ползунок соединим с нагрузкой, как показано на схеме, то в цепи нагрузки при непрерыв-

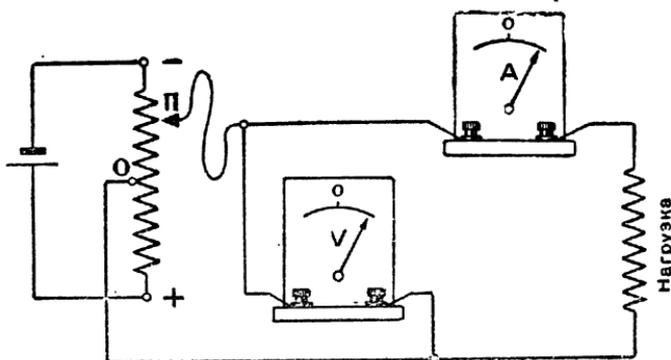


Рис. 1.

ном движении ползунка реостата будет существовать переменный ток, о чём мы можем судить по показаниям наших приборов. Закон изменения напряжения на клеммах нашего преобразователя тока точно соответствует закону движения ползунка реостата. Если ползунок реостата привести в колебательное движение при помощи кривошипно-шатунного механизма, то можно получить синусоидальное напряжение на клеммах преобразователя ( $O, P$ ). Разобраный принцип преобразования постоянного тока и лежит в основе создания действующей модели генератора переменного тока.

Модель генератора состоит из укрепленного на оси витка  $B$  (рис. 2), концы которого оканчиваются на скользящих кольцах. Скользящие кольца через посредство щёток и гибких проводов соединены с клеммами модели генератора. Виток вращается в пространстве между двумя брусками ( $N$  и  $S$ ), символизирующими собой полюсы генератора.

На оси витка с задней стороны прибора закреплён скользящий контакт  $CK$  и ползунок  $P$ , перемещающийся по сопротивлению  $R$ , намотанному на тонкую пластинку.

Кольцо скользящего контакта  $СК$  и ползунок  $П$  соединены между собой проводничком, изображённым на рисунке в виде спирали.

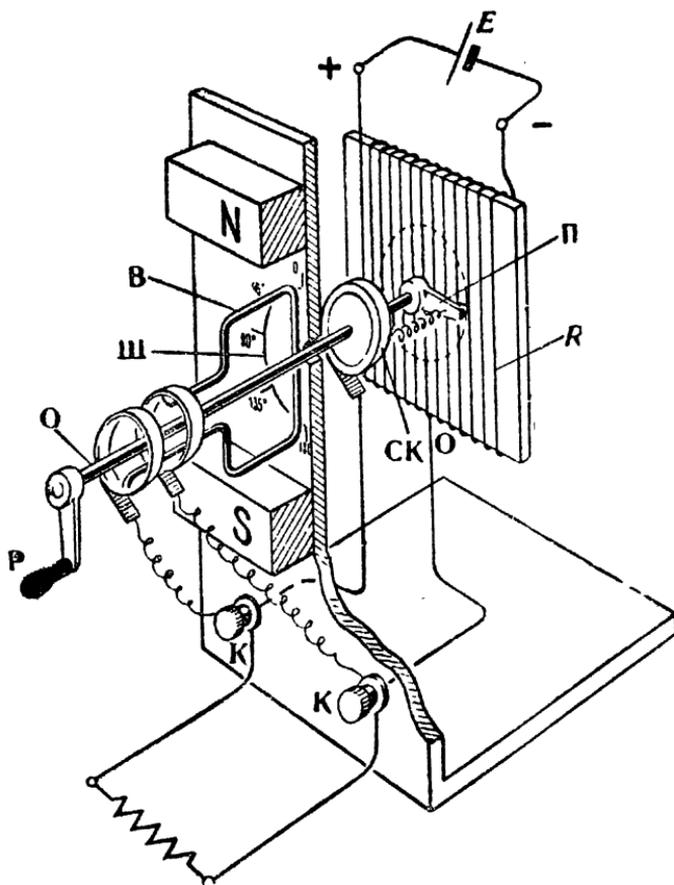


Рис. 2.

От середины сопротивления  $R$  в точке  $O$  имеется отпайка; таким образом, между скользящим контактом  $СК$  и средней точкой  $O$  сопротивления  $R$  будет существовать напряжение, которое при равномерном вращении рамки (и оси) за ручку  $P$  будет изменяться почти строго по синусоидальному закону (незначительные отклонения напряжения от синусоидального закона не имеют здесь практи-

ческого значения). Это напряжение и подаётся на клеммы модели генератора с задней стороны вертикальной панели. Передняя сторона прибора носит бутафорный характер и предназначена только для создания зрительного образа, и надо предусмотреть, чтобы соединения, выполненные на лицевой стороне прибора, не произвели бы закорачивание клемм прибора  $K, K$ .

Вполне очевидно, что во вращающемся витке не индуцируются никакие токи, но зато прибор обладает хорошими демонстрационными качествами, оставляя в памяти учащихся чёткий зрительный образ, и даёт возможность простыми средствами исследовать ряд интересных явлений в цепях переменного тока.

Основным недостатком этого прибора многие склонны считать наличие э. д. с. на клеммах модели генератора при отсутствии вращения витка, но этот недостаток одновременно является источником его важнейшего преимущества: величина э. д. с. на клеммах модели генератора при неподвижной рамке точно равна мгновенному значению э. д. с., которая должна существовать в витке при его прохождении через данное положение. Мгновенное значение э. д. с. переменного тока становится как бы доступно измерению обычным вольтметром. Чтобы избежать неправильных представлений, могущих возникнуть у учащихся в связи с этим положением, учитель должен непременно сначала показать явление в «натуральном виде», а затем, раскрыв принципы работы этой модели, перейти к демонстрациям с её использованием.

### ГРАФИК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Приключим к клеммам нашей модели генератора вольтметр и, поворачивая виток  $B$  путём вращения ручки  $P$ , станем измерять и записывать показания вольтметра в функции угла поворота витка. Углы измеряются по градусной шкале  $\mathcal{U}$ , нанесённой на передней стороне прибора. По полученным результатам можно построить график э. д. с.  $E$  в функции угла поворота витка  $\alpha$  и убедиться (конечно, с известной степенью точности), что любое мгновенное значение э. д. с.  $E$  равно максимальному её значению  $E_{\max}$ , умноженному на синус угла поворота витка:

$$E = E_{\max} \sin \alpha.$$

Построение графика э. д. с. (рис. 3) по произведённым измерениям является наилучшей подготовкой учащихся к чтению и анализу осциллографических кривых, с которыми они встретятся в процессе дальнейшего обучения.

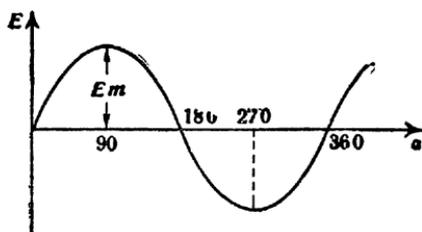


Рис. 3.

Точно таким же образом по результатам непосредственных измерений строится и график переменного тока (рис. 4). Для выполнения этой работы необходимо собрать внешнюю цепь модели генератора из активного сопротив-

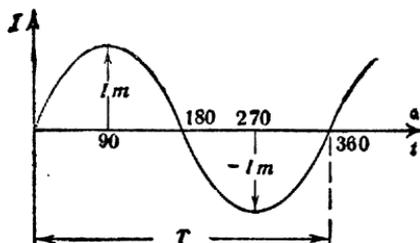


Рис. 4.

ления (любого реостата) с последовательно включённым амперметром. В процессе построения указанных графиков учащимися очень хорошо усваиваются понятия частоты, амплитуды, периода и мгновенного значения переменного тока, так как все эти понятия непосредственно связаны с их наблюдениями и измерениями.

### ЭФФЕКТИВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Понятие эффективного значения переменного тока относится к ряду трудных физических понятий, поэтому требуется особенно тщательный подход к введению этого понятия на уроке. Учитель должен избегать введения фор-

мальных соотношений между различными физическими величинами, которые не подтверждаются ни теоретическими выводами, ни экспериментом. Например, в учебнике физики даётся определение эффективного тока и соотношение между эффективным и максимальным значением переменного тока  $\left( I_{\text{эфф}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \right)$ , однако это соотношение не подтверждается опытом, а потому вызывает множество недоуменных вопросов со стороны учащихся. Используя нашу модель генератора переменного тока, мы можем чрезвычайно просто устранить затруднения в этом вопросе.

Мы обращаемся к графику переменного однофазного тока и указываем на тот факт, что сила переменного тока в различные моменты изменяется в пределах от  $+ I_{\text{max}}$  до  $- I_{\text{max}}$ .

Включив амперметр магнитоэлектрической системы с нулём посередине шкалы на клеммы модели генератора, мы наблюдаем периодическое изменение силы тока при равномерном вращении ручки генератора. Стрелка прибора последовательно занимает на шкале положение  $0; + I_{\text{max}}; 0; - I_{\text{max}}; 0$  и т. д. Затем магнитоэлектрический прибор заменяем тепловым школьным демонстрационным амперметром и снова наблюдаем движение стрелки. Теперь стрелка за один оборот рамки модели генератора, т. е. за один период тока, будет дважды отклоняться в одну сторону от  $0$  до  $I_{\text{max}}$ , так как тепловое действие тока, как известно, не зависит от направления тока, и отклонение стрелки прибора пропорционально температуре нити прибора. При медленных изменениях силы тока температура нити прибора будет успевать изменяться в соответствии с изменениями силы тока. При быстром же вращении рамки в силу тепловой инерции нити и механической инерции подвижных частей амперметра стрелка займёт некоторое постоянное положение на шкале прибора, которое будет несколько меньше максимального значения тока.

Чем выше частота тока, тем стабильнее устанавливается стрелка на шкале прибора.

Очевидно, что наблюдаемое нами явление отклонения стрелки прибора может быть вызвано и постоянным током

той же силы. Следовательно, переменный и постоянный токи на том же самом сопротивлении нити прибора выделяют одно и то же количество теплоты. Поэтому наблюдаемое установившееся отклонение стрелки теплового амперметра при прохождении через него переменного тока указывает нам так называемое эффективное значение переменного тока, которое в дальнейшем будет обозначать  $I_{\text{эфф}}$ . Если бы пустили через прибор постоянный ток силой, равной максимальному значению переменного тока, то, очевидно, его эффект (действие) был бы более значительным. Из приведённых рассуждений непосредственно следует определение эффективного значения переменного тока как тока, который на данном сопротивлении выделяет то же самое количество тепла за тот же промежуток времени, что и постоянный ток.

Обращаясь снова к опыту и устанавливая различные значения максимального тока и указанным образом измеряя соответствующие значения эффективного переменного тока, нетрудно найти, что эффективное значение переменного тока приблизительно меньше максимального значения в 0,7 раза, или в  $\sqrt{2}$  раз. Следовательно, можно написать соотношение:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

Что касается синусоидально изменяющегося напряжения, то путём аналогичного эксперимента очень легко ввести понятие эффективного напряжения и установить соотношение:

$$U_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

Выше мы ввели понятие эффективного значения тока, основываясь на тепловом действии тока, но, очевидно, измерение эффективного значения тока может быть основано и на других действиях тока. Этим и объясняется тот факт, что в цепях переменного тока работают приборы не только тепловых, но и различных других систем (электромагнитные, электродинамические и т. д.). На первый взгляд учащимся кажется, что с введением понятия эффективной величины тока и напряжения теряют практическую ценность понятия максимальных значений. Однако это не

так. Надо пояснить им, что величина максимального напряжения имеет важное значение при расчёте изоляции на пробы и т. д.

## СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 1. Активное сопротивление

Приключим к клеммам модели генератора активную нагрузку (например, реостат). Последовательно с нагрузкой включим амперметр, а параллельно вольтметр, как показано на рисунке 5,а. Вращая ротор модели, мы мо-

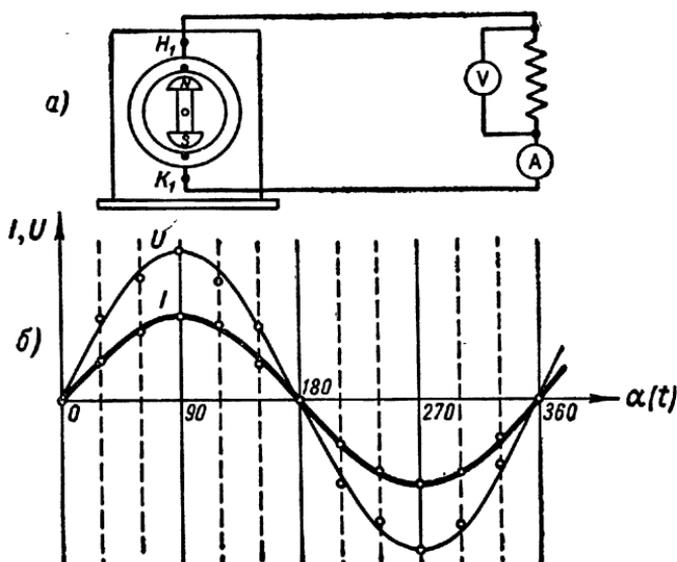


Рис. 5.

жем наблюдать по показаниям приборов, что ток и напряжение на нашей нагрузке одновременно достигают своих максимальных значений, одновременно обращаются в нуль, одновременно достигают максимальных отрицательных значений и т. д.

Измеряя последовательные значения тока и напряжения в функции угла поворота ротора генератора (через  $30^\circ$ ), можно по результатам измерений построить графики

тока и напряжения в одних и тех же координатных осях, что и представлено на рисунке 5, б.

Подобный метод графического изображения синусоидально изменяющихся величин чрезвычайно убедителен для учащихся, так как они непосредственно видят изменение угла поворота ротора (аргумента) и соответствующее значение напряжения или тока (функции).

Явление одновременного изменения тока и напряжения на активном сопротивлении принято определять словами: ток и напряжение находятся в фазе.

## 2. Индуктивное сопротивление

Индуктивное сопротивление, как известно, зависит от индуктивности участка цепи и от частоты переменного, проходящего по цепи, тока. Первая зависимость легко демонстрируется при наличии сети переменного тока. Вторая же зависимость экспериментального подтверждения в школе не имела. Демонстрация фазового сдвига между током и напряжением была возможна только путём применения осциллографа, что для многих школ было недоступно.

Применение модели генератора даёт возможность простыми средствами разрешить все экспериментальные затруднения, связанные с вопросом индуктивного сопротивления.

Для наблюдения интересующих нас явлений соберём цепь, представленную на рисунке 6, а. В качестве измерительных приборов в этой схеме используются два совершенно однотипных школьных демонстрационных гальванометра с нулём посередине шкалы. Потребность в однотипности применяемых приборов вызывается тем обстоятельством, что в указанных приборах подвижные системы должны обладать одним и тем же моментом инерции.

Один из указанных гальванометров шунтируем и используем в качестве амперметра, а другой гальванометр обращаем в вольтметр путём включения дополнительного сопротивления.

О зависимости индуктивного сопротивления от величины индуктивности мы судим по отношению амплитудного значения напряжения к амплитудному значению силы тока. Качественно наблюдая значение силы тока в цепи с катушкой без сердечника, мы легко заметим уменьшение си-

лы тока при вставлении сердечника в катушку (при неизменной частоте вращения генератора).

На этой же схеме чисто качественно можно показать влияние частоты переменного тока на величину индуктивного сопротивления. Для этого необходимо вращать генератор с различными скоростями и наблюдать за амплитудными отклонениями стрелок амперметра и вольтметра.

При демонстрации фазового сдвига между током и напряжением на индуктивном сопротивлении необходимо позаботиться о том, чтобы углы отклонения стрелок приборов в градусном измерении при максимальном значении тока и напряжения были одинаковы. Для соблюдения этого условия на схеме (рис. 6.а) параллельно исследуемому ин-

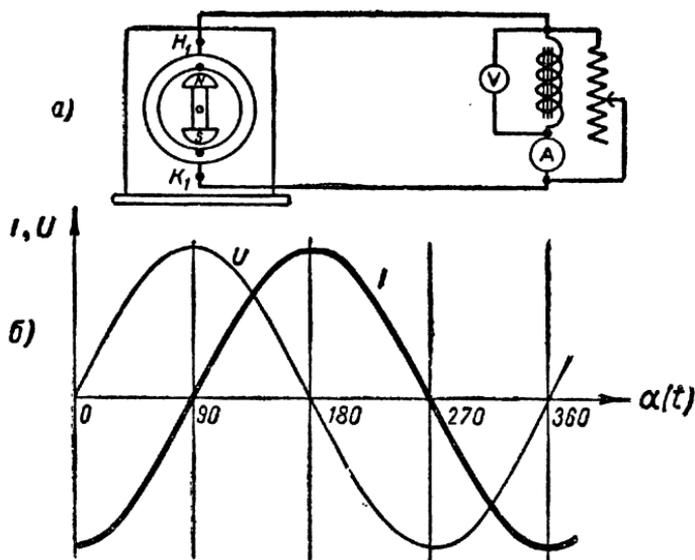


Рис. 6.

дуктивному сопротивлению стоит переменное активное сопротивление — реостат. Передвигая ползунок этого реостата, можно добиться требуемого положения стрелок приборов. Если теперь привести в движение модель генератора, то мы будем наблюдать очень интересное явление. Сначала стрелка вольтметра отклоняется на максимально возможный угол, а затем в ту же сторону начинает отклоняться стрелка амперметра. Стрелка вольтметра достигнет

наибольшего отклонения в тот момент, когда стрелка амперметра вернётся на нуль шкалы. Стрелка вольтметра возвратится на нуль тогда, когда стрелка амперметра отклонится на максимально возможный угол в противоположную сторону и т. д. На основании наблюдений мы можем сказать, что сначала напряжение достигает максимального положительного значения, а потом ток; сначала напряжение достигает нулевого значения, а потом ток и т. д. Следовательно, все изменения тока запаздывают от соответствующих изменений напряжения по фазе на  $\frac{1}{4}$  периода, или на  $90^\circ$ .

Так как ток и напряжение изменяются по синусоидальному закону, то запаздывание по фазе, наблюдаемое на опыте, можно графически изобразить в виде двух синусоид, сдвинутых относительно друг друга на  $90^\circ$ , как показано на рисунке 6,б.

Для более удобного наблюдения за движением стрелок приборов целесообразно приборы расположить один над другим.

В качестве индуктивного сопротивления можно использовать школьные разборные трансформаторы. Меняя катушки у этих трансформаторов или соединяя обмотки катушек последовательно между собой, можно всегда подобрать необходимую величину индуктивного сопротивления.

В силу того, что данный опыт является чисто качественным, оказывается возможным реостат в схеме этого опыта поставить последовательно с вольтметром, что облегчит подбор сопротивления реостата и не отразится значительно на угле сдвига фаз между током и напряжением на исследуемом индуктивном сопротивлении.

### 3. Ёмкостное сопротивление

Любой конденсатор (ёмкость) не является проводником постоянного тока. Однако если конденсатор включить в цепь с переменной э. д. с., то в цепи возникает ток, сила которого будет тем больше, чем больше ёмкость конденсатора. Эти положения легко подтверждаются экспериментально, если собрать последовательную цепь из конденсатора и амперметра (или лампочки накаливания) и подавать на концы этой цепи поочередно постоянное и переменное напряжение. Изменяя ёмкость конденсатора, легко качественно показать зависимость сопротивления цепи

с ёмкостью от величины ёмкости. При отсутствии переменного напряжения установление зависимости сопротивления от ёмкости конденсатора можно качественно показать с помощью модели генератора путём наблюдения максимальных отклонений стрелок вольтметра и амперметра, установленных в схеме, как показано на рисунке 7,а. Уменьшение амплитудного отклонения стрелки амперметра с уменьшением ёмкости цепи говорит о возрастании сопротивления цепи. Увеличение амплитудного тока (конечно, при неизменном напряжении) при увеличении ёмкости цепи говорит об уменьшении сопротивления цепи.

Зависимость ёмкостного сопротивления цепи от частоты переменного тока демонстрируется на той же схеме, только частота вращения генератора изменяется. По изменениям силы тока (при неизменном напряжении) опять качественно судим о величине сопротивления цепи.

В результате проделанного эксперимента легко сделать вывод, что ёмкостное сопротивление обратно пропорционально величине ёмкости нашей цепи и также обратно пропорционально частоте переменного тока, проходящего по цепи.

Демонстрация фазового сдвига между током и напряжением в цепи с ёмкостью осуществляется на той же самой схеме (рис. 7,а). Составив конденсаторную батарею ёмкостью в 20—30 мкф, включим те же самые приборы: вольтметр параллельно ёмкостной нагрузке, а амперметр со снятым шунтом, т. е. гальванометр, последовательно. Необходимость снятия шунта с амперметра при исследовании цепи с ёмкостью объясняется тем, что ёмкостное сопротивление при частоте тока, даваемого моделью генератора, будет очень велико, а уменьшить ёмкостное сопротивление путём увеличения ёмкости конденсаторной батареи не всегда представляется возможным.

Для установления одинакового отклонения стрелок приборов (в градусном измерении) перед началом демонстрации необходимо также воспользоваться ползунковым реостатом, который, в зависимости от конкретных условий (т. е. от величины ёмкостного сопротивления), можно включить либо в подводящую линию, либо последовательно с вольтметром. Последовательное включение реостата с вольтметром практически не отразится на изменении фазового сдвига между током и напряжением на исследуемом участке цепи.

Приводя во вращение генератор, мы наблюдаем за отклонениями стрелок приборов и приходим к выводу, что сначала ток достигает максимального положительного значения, а потом напряжение; сначала ток уменьшается

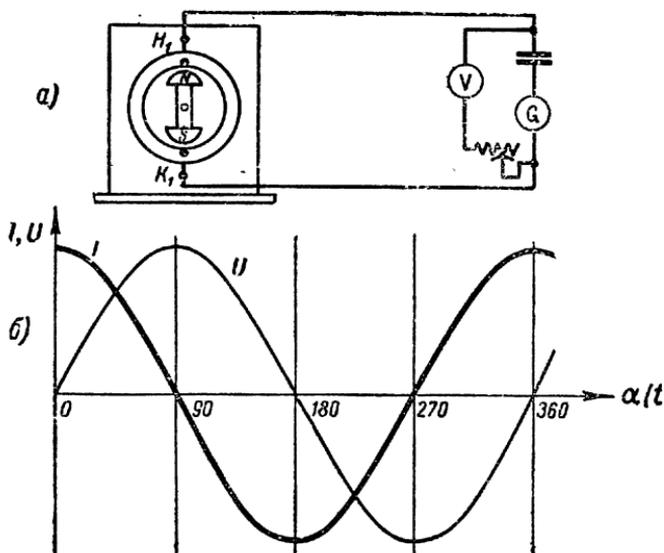


Рис. 7.

до нуля, а потом напряжение и т. д. На глаз будет нетрудно уловить, что в тот момент, когда стрелка амперметра имеет наибольшее отклонение, стрелка вольтметра проходит через нуль. Таким образом, становится совершенно ясным, что ток в своих изменениях опережает напряжение по фазе, причём фазовый сдвиг между ними равен  $1/4$  периода, или  $90^\circ$ .

Ранее мы уже установили, что ток и напряжение в цепи переменного тока изменяются по синусоидальному закону. Следовательно, наши наблюдения можно представить в виде двух синусоид, сдвинутых по фазе относительно друг друга на  $90^\circ$ , или  $1/4$  периода, как это и показано на рисунке 7,б.

Вполне очевидно, что волновые диаграммы для цепей переменного тока с индуктивным и ёмкостным сопротивлением не могут быть построены по результатам

измерений (по точкам); поэтому особое внимание при изучении цепи с активным сопротивлением следует обратить на синусоидальный характер тока в цепи, если к этой цепи подведено синусоидальное напряжение.

При построении всех волновых диаграмм (графиков) желательно использовать цветные мелки или различные кривые изображать линиями разной толщины, как это и сделано на наших рисунках.

## ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Описанный нами преобразователь тока находит себе чрезвычайно полезное применение при исследовании различных выпрямительных схем без применения осциллографа. Для этой же цели, правда с меньшим эффектом, можно воспользоваться одним реостатом со средней точкой, как это показано на рисунке 1. В последнем случае явление можно наблюдать только качественно, так как будет невозможно построить график выпрямленного тока.

Собирая схему купроксного выпрямителя (или содового) по рисунку 8 и подавая на клеммы *A* и *B* переменное

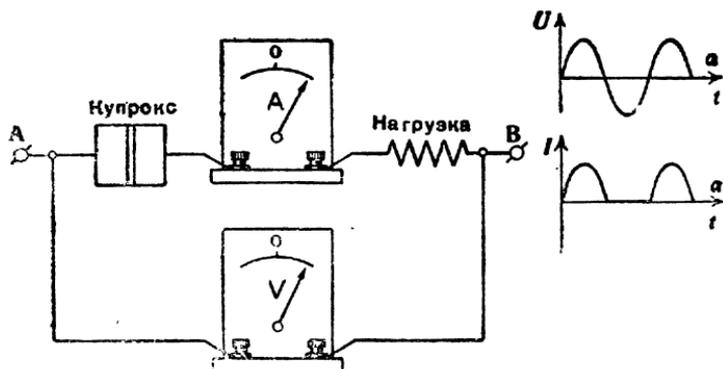


Рис. 8.

напряжение от генератора, можно опять вышеуказанным способом произвести измерения тока и напряжения в функции угла поворота рамки и построить графики напряжения и тока, доказав тем самым характер односторонней проводимости выпрямительного элемента.

Построение графиков выполнено на том же самом рисунке 8. По оси абсцисс вместо угла поворота рамки  $\alpha$  можно откладывать время  $t$ , так как угол поворота рамки при равномерном её вращении пропорционален времени.

Аналогичным образом можно исследовать и схему купроксного (или любого другого) двухполупериодного выпрямителя, изображённого на рисунке 9, где графически

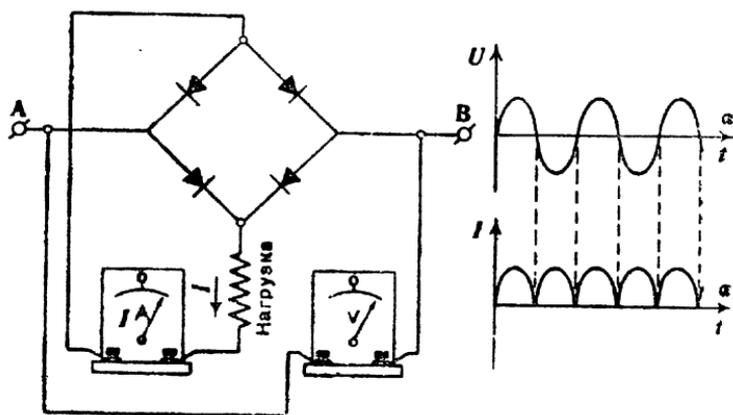


Рис. 9.

представлены и результаты исследования. В этой схеме, как и во всех последующих, напряжение от генератора подаётся опять на входные клеммы  $A$  и  $B$ . Схему не поясняем, так как её работа ясна из рисунка.

Заменяя в схеме рисунка 8 купроксный выпрямитель двухэлектродной лампой, как показано на рисунке 10, мо-

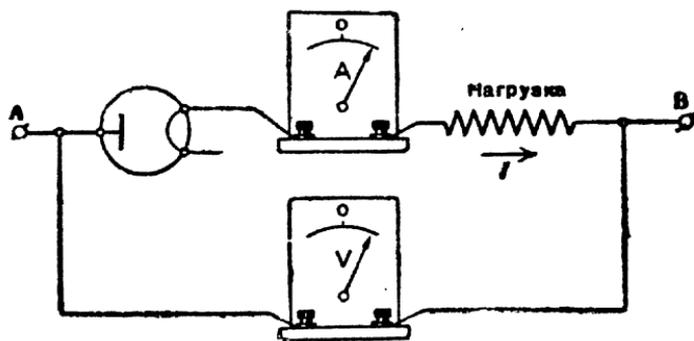


Рис. 10.

жно детально исследовать её одностороннюю проводимость и результаты исследования опять представить графически.

На рисунке 11 представлена обычная схема лампового двухполупериодного выпрямителя, только в этой схеме

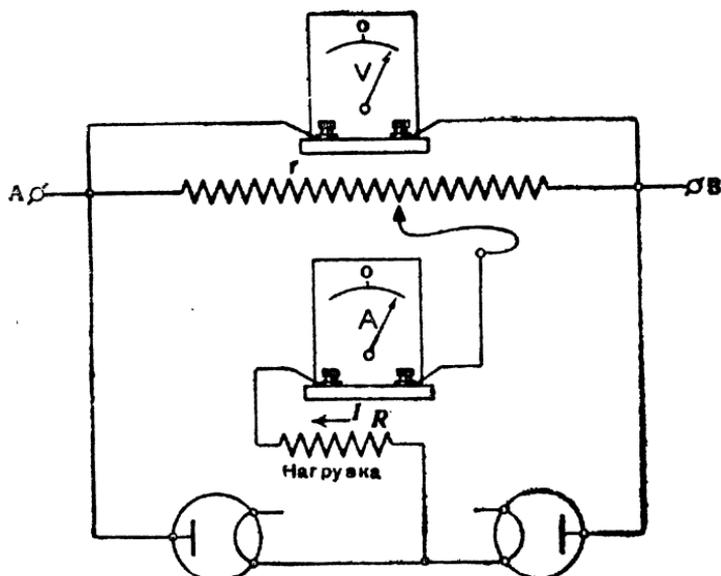


Рис. 11.

вместо трансформатора используется некоторое сопротивление  $r$ , величина которого порядка нескольких сотен омов. Это необходимо сделать потому, что э. д. с., индуктируемая во вторичной обмотке трансформатора ( $E_2$ ), при низкой частоте тока очень мала ( $E_2 = 4,44 \Phi \cdot f \cdot W_2 \cdot 10^{-8} b$ , где  $\Phi$  — магнитный поток, пронизывающий вторичную обмотку трансформатора,  $f$  — частота тока,  $W_2$  — число витков вторичной обмотки трансформатора). Кроме того, применяя трансформатор, мы теряем возможность измерять мгновенные значения тока и напряжения. Сопротивление нагрузки  $R$  включено между катодами ламп и средней точкой сопротивления  $r$ . Работа схемы тоже чрезвычайно проста и не требует пояснений. Результаты исследования аналогичны графикам рисунка 9.

Эта же модель генератора может оказаться чрезвычайно удобной и при различных видах других исследований,

например: при исследовании усилительного каскада, представленного на рисунке 12. Подаваемое от генератора слабое напряжение на промежуток сетка—катод трёхэлектродной лампы непрерывно измеряется вольтметром  $V_1$ . Амперметр, стоящий в цепи анода, измеряет силу тока, а

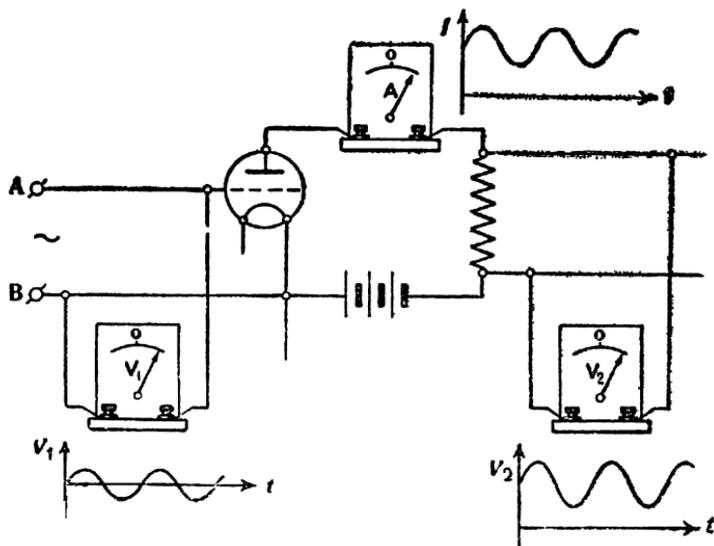


Рис. 12.

вольтметр  $V_2$  измеряет величину падения напряжения на анодном сопротивлении. Результаты наблюдений представлены графически соответственно около каждого прибора.

Можно, используя преобразователь тока, продемонстрировать зависимость величины э. д. с., возникающей в витке, от скорости вращения витка. Для этого необходимо данную модель дополнить трансформатором, укрепляемым с задней стороны панели. На первичную обмотку этого трансформатора следует подать напряжение от потенциометра, а вторичную обмотку надо соединить с клеммами  $K$  генератора. Теперь э. д. с. на клеммах генератора будет пропорциональна скорости вращения витка и полностью исчезать при его остановке. Для использования прибора в обоих указанных случаях необходимо поставить переключатель, используя для этой цели трёхполюсный рубиль-

ник, как это показано на рисунке 13. Правое положение рубильника соответствует работе с трансформатором, левое — без трансформатора.

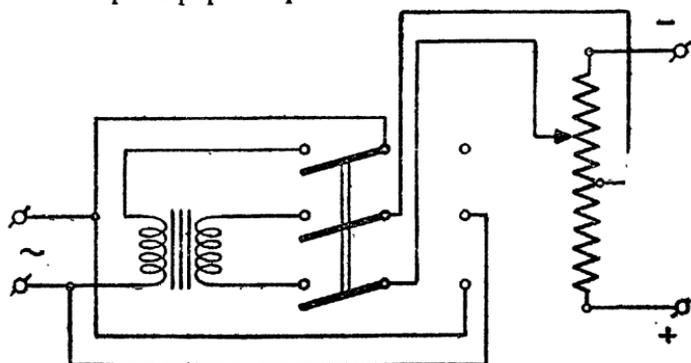


Рис. 13.

### ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Изучение трёхфазного синусоидального переменного тока целесообразно начать с демонстрации явления возникновения трёх э. д. с., сдвинутых по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Для этой цели можно воспользо-

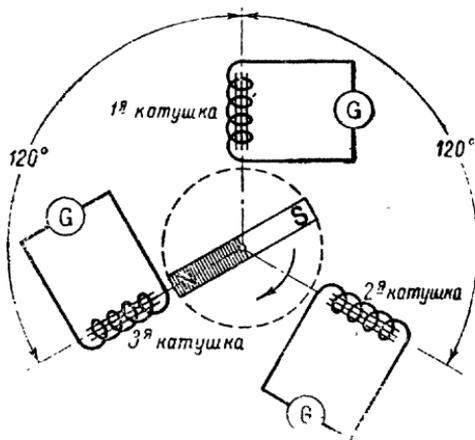


Рис. 14.

ваться катушками с железными сердечниками, расположенными своими осями под углом  $120^\circ$  друг к другу (рис. 14). В середине между ними помещается вращающийся постоянный магнит, который будет индуцировать в катушках электродвижущие силы индукции, о величинах которых можно будет судить по показаниям соответ-

ствующих гальванометров. Э. д. с., индуцируемые в катушках, будут переменной величины и достигать своих максимальных значений будут не одновременно.

Напомним, что э. д. с., индуцируемая в витке, достигает максимума в тот момент, когда центр полюса магнита проходит мимо активной стороны витка, и установив знак (направление) э. д. с., мы обращаем внимание учащихся на то, что один оборот ротора соответствует одному периоду изменения э. д. с. катушки и что максимумы электродвижущих сил в катушках последовательно сдвинуты по фазе на  $120^\circ$  или на  $1/3$  периода. После этого опыта с тремя катушками, которые имели разобъединённую магнитную систему, целесообразно перейти к опыту с более совершенной магнитной системой (рис. 15), которая по конструктивным формам ближе подходит к настоящему генератору.

Изготовление модели такого генератора не представит больших трудностей. Статор модели собирается из статорного железа от старого асинхронного двигателя либо собирается из пластин, изготовленных самими учащимися. Учитывая то обстоятельство, что частота тока, даваемого этим генератором, ничтожно мала, можно в качестве тела статора использо-

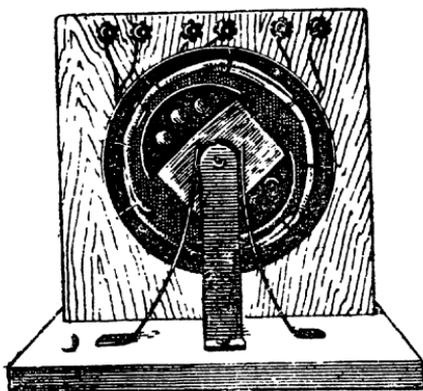


Рис. 15.

вать любое кольцо (шайбу) соответствующего размера, сделанную из электротехнической стали (мягкого железа). На внутренней поверхности статора необходимо иметь шесть пазов, предназначенных для укладывания обмоток. Обмотки изготовляются прямоугольного сечения, для чего целесообразно использовать шаблон. Учитывая, что неактивные стороны обмоток располагаются по торцу тела статора, необходимо опытным путём подобрать соответствующие размеры шаблона (рис. 16). Наилучшим проводом для изготовления обмоток следует считать провод с эмалевой изоляцией диаметром  $0,3-0,5$  мм. Если в теле статора уже имеются пазы, то число витков обмотки берётся из условия полного заполнения паза, если же пазы будут делаться заново, то целесообразно их сделать такого размера, чтобы могло уложиться  $500-800$  провод-

ников в каждый паз. Однако на практике могут быть значительные отклонения от указанных условий, и это не будет сильно сказываться на работе прибора. В качестве ротора этой модели генератора используется постоянный магнит или электромагнит, как показано на рисунке 15.

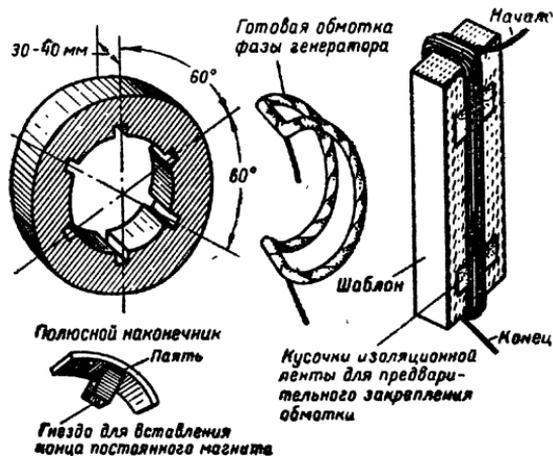


Рис. 16.

Целесообразно постоянный магнит снабдить полюсными наконечниками в целях увеличения времени практического существования э. д. с. в фазах генератора. Наконечники могут быть изготовлены из миллиметрового железа или просто из белой жести, что облегчит их обработку (пайку). Весь прибор следует смонтировать на вертикальной открытой панели. Такой прибор поможет учащимся воспринять конструктивные формы генератора трёхфазного тока. На этом приборе явление образования трёхфазного тока можно показать только с грубой качественной стороны, так как, во-первых, возникающие э. д. с. в обмотках, не синусоидальны, а во-вторых, они чрезвычайно нестабильны, что затрудняет их наблюдение, и, в-третьих, они столь малы, что не могут создать необходимого эффекта при демонстрации вращающегося магнитного поля.

Для устранения возникающих затруднений можно было бы перейти к трёхфазному току сети (если он, конечно, имеется), однако без осциллографа это не даёт соответствующего эффекта, а кроме того, осциллограммы не

только трёхфазного, но и однофазного тока с трудом воспринимаются учащимися.

Дальнейшее ознакомление учащихся с трёхфазным переменным током целесообразно вести на действующей модели генератора, которая по существу является преобразователем постоянного тока в трёхфазный переменный ток.

С помощью такого генератора можно получать переменный трёхфазный ток любой частоты, и, что очень важно при наших опытах, напряжение на фазах генератора не зависит от скорости вращения генератора, как это всегда имеет место в индукционных моделях генераторов. Что же касается токов, то они могут быть получены, вообще говоря, любой силы в зависимости от сопротивления нагрузки.

Конструктивно модель генератора может быть выполнена в двух вариантах, однако для работы модели это не имеет никакого существенного значения.

### Первый вариант генератора трёхфазного переменного тока

На передней стороне вертикального щитка собирается принципиальная модель генератора. Она состоит из стато-

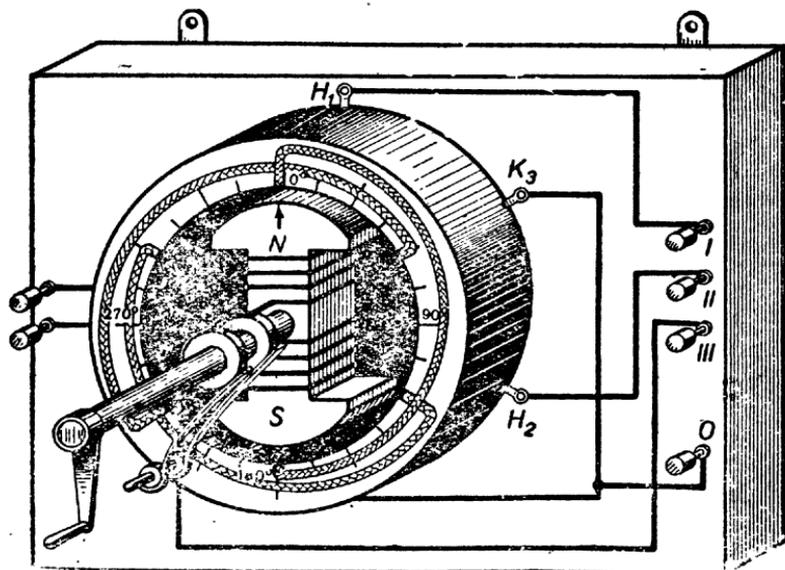


Рис. 17.

ра, в пазах которого уложены три обмотки, сдвинутые относительно друг друга на угол  $120^\circ$ , и якоря, укрепленного на оси. Якорь имеет обмотку, концы которой выведены к кольцам, укрепленным на оси (рис. 17).

Задача обмоток как статора, так и ротора сводится к созданию зрительного образа у учащихся. Обмотки должны быть окрашены в яркие, но разные цвета. Тело якоря и статора может быть выполнено из любого подходящего материала. Лучшим материалом для их изготовления следует считать фанеру. Концы фазных обмоток выводятся к клеммам, расположенным по окружности статора, причём надо твердо помнить, что фазные обмотки служат только для создания зрительного образа, т. е. они бутафорны, и они не должны замыкать клемм модели генератора. На продолжении оси якоря с задней стороны щитка укрепляется кривошип, который приводит в движение с помощью шатунов ползунки трёх реостатов, расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу (рис. 18). Радиус криво-

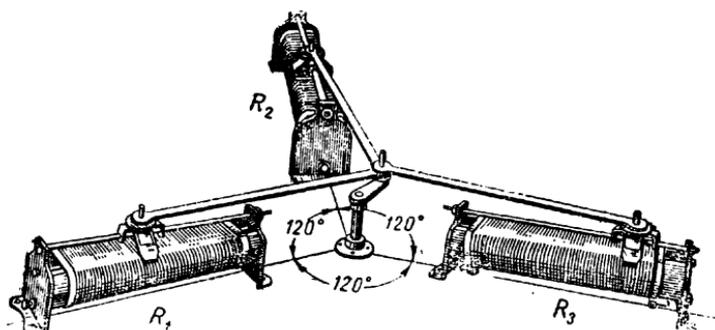


Рис. 18.

шипа должен быть равен или меньше половины хода ползунка реостата. Как кривошип, так и шатуны желательнее сделать из металла. К началам и к концам реостатов, которые все соединяются между собой, как показано на схеме (рис. 19), подаётся напряжение от постоянного источника тока (батарея элементов или аккумуляторов). Средняя точка каждого реостата и ползунков с задней стороны щитка подключаются к клеммам начала и конца соответственно каждой фазы генератора. Тогда при равномерном вращении ручки генератора ползунки реостатов будут находиться в гармоническом колебательном движении и на-

пряжение между средней точкой и ползунком каждого реостата будет изменяться по синусоидальному закону, а следовательно, и напряжения на клеммах модели генератора тоже будут изменяться по синусоидальному закону. Возникающие напряжения на клеммах генератора будут не только синусоидальными, но будут сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол  $120^\circ$  так же, как и реостаты.

Кривошип относительно ротора надо расположить таким образом, чтобы в тот момент, когда центр полюса со-

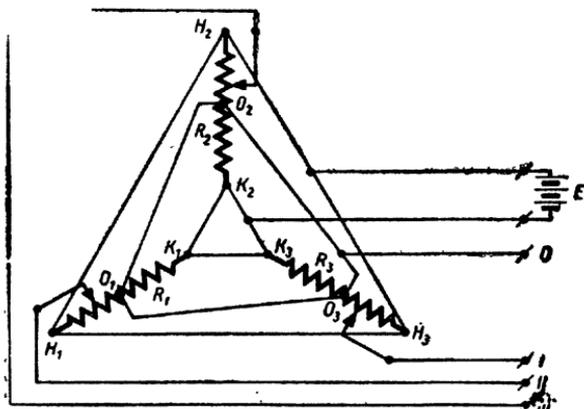


Рис. 19.

впадает с активными сторонами первой фазы обмотки, на клеммах этой обмотки должен быть максимум напряжения.

Размеры этой модели определяются, с одной стороны, размерами реостатов, а с другой стороны, — требованиями наглядности.

### Второй вариант генератора трёхфазного тока

Второй вариант генератора отличается только своей кинематической схемой. Вместо трёх реостатов устанавливается один потенциометр, специально изготовленный для этой цели<sup>1</sup>. Этот потенциометр выполняется плоским, как показано на рисунке 20.

Провод потенциометра наматывается на фанеру, размеры которой указаны на том же рисунке. Намотка провода должна производиться при сильном его натяжении. Витки

<sup>1</sup> «Физика в школе», 1952, № 1, стр. 75.

укладываются плотно друг к другу и концы закрепляются под винты. При выведении средней точки потенциометра нежелательно пользоваться пайкой, а лучше сделать петлю, как показано на рисунке.

Соединять среднюю точку потенциометра с проводом цепи следует стяжным винтом с гайкой. Для лучшей работы потенциометра при движении по нему щёток необходимо потенциометр со стороны рабочей части закрыть диском 3 и шайбой 2, которые должны плотно прилегать к

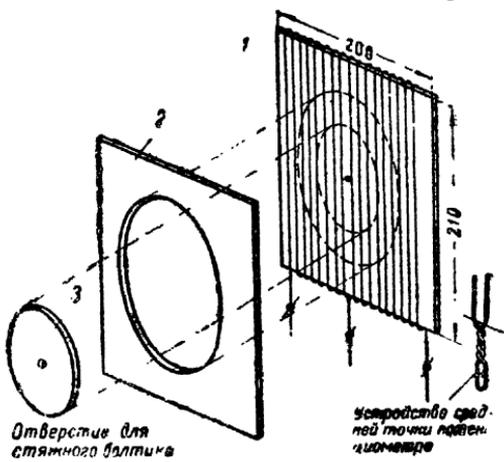


Рис. 20.

проводу потенциометра и обеспечить механическую устойчивость витков при скольжении щёток. Для придания потенциометру необходимой жёсткости он весь заключается в деревянную обойму, что хорошо видно на рисунке 21.

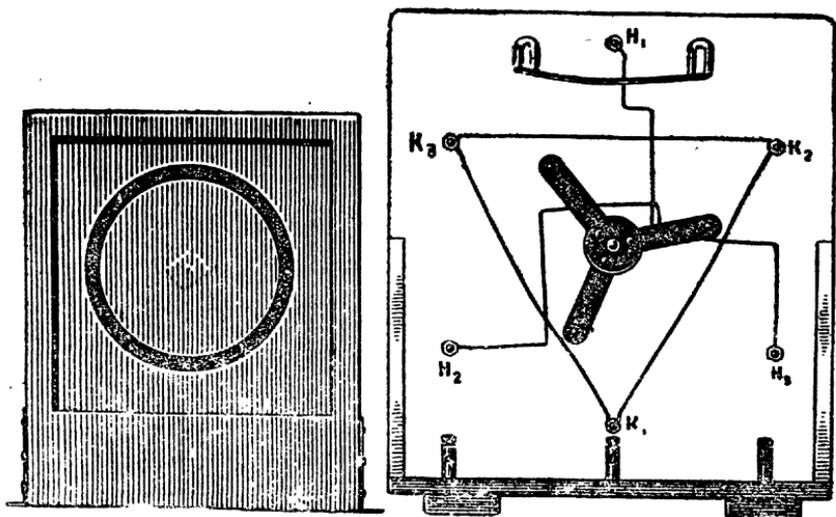


Рис. 21.

Развёрнутая электрическая схема потенциометра представлена на рисунке 22. Эта развёрнутая схема облегчает расчёт потенциометра по заданным фазовым нагрузкам. Из рассмотрения этой схемы также видно, что наиболее опасными местами потенциометра в смысле его перегруз-

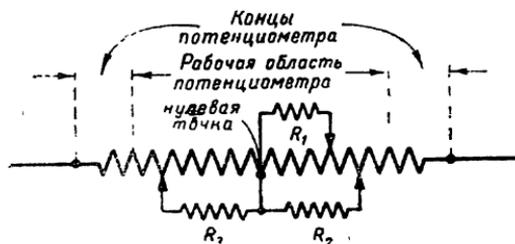


Рис. 22.

ки являются концы потенциометра, через которые проходит весь ток нагрузки. Именно эти концы и подвержены наибольшему нагреву. Однако следует иметь в виду, что прибор предназначается для кратковременной работы; поэтому можно допустить перегрузку провода потенциометра по сравнению с табличными нормами до двукратного значения. Желательно, хотя это и не является обязательным условием, иметь максимальное значение тока в каждой фазе нагрузки не ниже  $1,5 a$ .

Мы в своей работе использовали провод от реостата на  $120 \text{ ом}$  с предельным (номинальным) током  $1,3 a$ . Такой потенциометр, включаемый на напряжение  $60 \text{ в}$ , обеспечил все демонстрации по трёхфазному току, описанные ниже, без опасного нагревания, причём длительность демонстрации достигала  $5\text{—}10$  минут. Если прибор предназначается для работы от источника тока низкого напряжения (батарея элементов, аккумулятор), то необходимо будет для получения нужной силы тока изменить главным образом сопротивление фаз нагрузки, а сам потенциометр может остаться без изменения.

Концы потенциометра включаются на постоянный источник тока, а синусоидальные напряжения (или почти синусоидальные напряжения) снимаются между средней точкой потенциометра и соответствующим ползунком. Таких ползунков имеется три, и расположены они под углом  $120^\circ$  друг к другу.

Внешний вид ползунков (токоснимателей) показан на рисунке 21, а конструктивное выполнение представлено на рисунке 23. При рассмотрении последнего рисунка, несмотря на то что там размеры деталей не указаны, всё же можно составить себе полное представление о конструк-

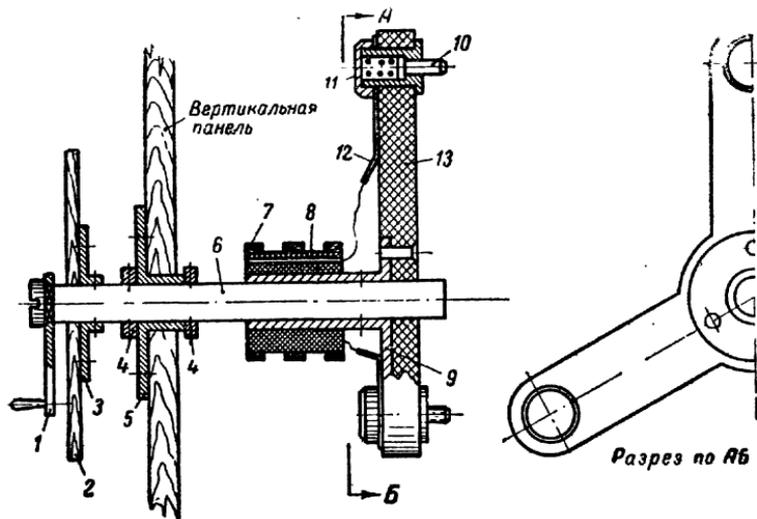


Рис. 23.

ции этого узла прибора. На концах звездообразной эбонитовой пластинки 13 установлены три медные щётки 10 под углом  $120^\circ$  друг к другу. Контакт медных щёток осуществляется за счёт работы спиральных пружин, установленных внутри щёткодержателей. Спиральные пружинки не являются токонесущими, так как каждая из медных щёток соединяется с крышкой щёткодержателя 11 специальным мягким многожильным проводничком, который не виден на чертеже рисунка 23. Этот проводничок на чертеже должен был совпасть с осевой линией, проходящей через пружинку и щетку 10. Соединение проводничка со щёткой и крышкой щёткодержателя осуществляется путём пайки. Звездообразная эбонитовая пластинка вместе со щёткодержателями укрепляется винтами на втулке с фланцем 9. Эта втулка крепится на оси прибора 6 стопорным винтом. С другого конца указанной втулки с помощью эбонитового изолятора 8 укрепляются три медных кольца 7. Крепление изолятора на втулке и медных колец на изо-

ляторе осуществляется путём тугой посадки. Соединение щёткодержателей с медными кольцами осуществляется мягкими проводничками, которые с одного конца с помощью наконечников 12 закрепляются под крышки щёткодержателей, а с другого конца, будучи продетыми через каналы внутри эбонитового изолятора, припаиваются к медным кольцам 7. Над каждым медным кольцом устанавливается медная плоская щётка. Все эти три медные щётки соединяются в один общий блок, как показано на рисунке 24. Крепление щёток к эбонитовому изолятору осуществляется заклёпками. Крепление самого изолятора к вертикальной панели прибора выполняется сквозными винтами.

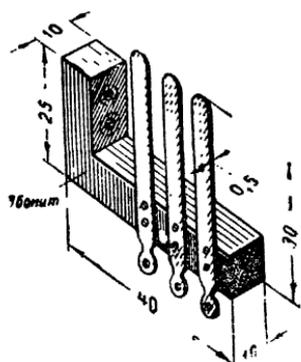


Рис. 24.

Каждая плоская щётка соединяется монтажным про-

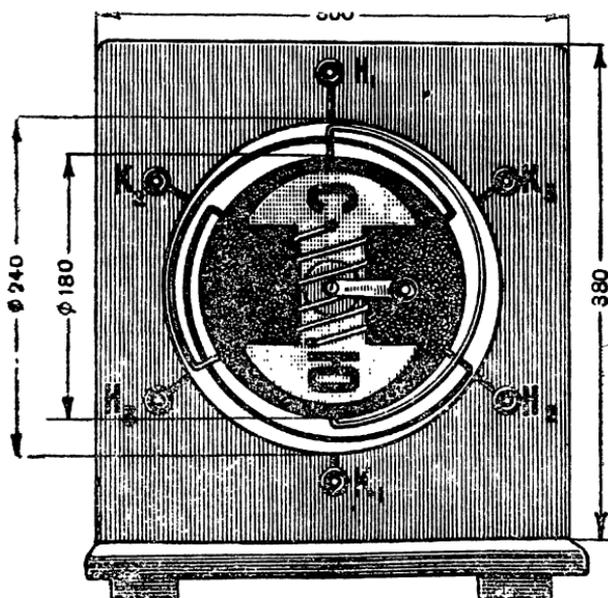
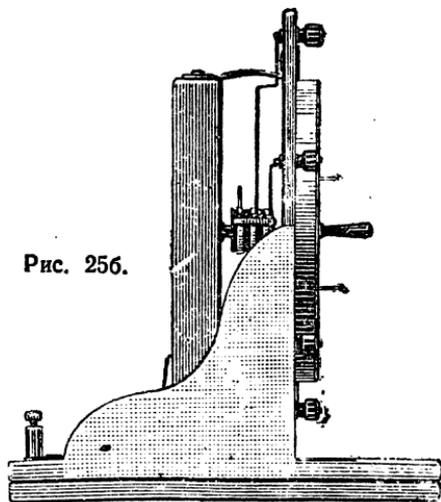


Рис. 25а.

водником с клеммами генератора, обозначенными буквами  $H_1, H_2, H_3$  (рис. 21). К этим же клеммам с передней стороны прибора присоединяются начала фазных бутафорных обмоток (рис. 25). Концы бутафорных обмоток соединяются с клеммами, обозначенными буквами  $K_1, K_2, K_3$ . С задней стороны прибора эти клеммы соединяются между собой и с нулевой точкой потенциометра. Следует строго помнить о том, что бутафорные обмотки не должны замыкать клемм генератора. Эти обмотки существуют только для создания конструктивного образа и никакой другой роли не играют.

Ось прибора  $б$  через втулку  $5$ , укрепленную винтами в вертикальной панели прибора (рис. 23), проходит на лицевую сторону. Крепление оси от радиального перемещения во втулке  $5$  осуществляется запорными кольцами  $4$ , которые укрепляются на оси стопорными винтами. На свободный конец оси надевается втулка  $3$ , которая крепится также стопорным винтом. К фланцу этой втулки привинчивается фанерное тело бутафорного якоря с обмоткой возбуждения. Одна половина якоря окрашивается в синий цвет, а другая в красный. Обмотка возбуждения якоря красится в яркий жёлтый цвет. Точно так же непременно следует окрасить в разные цвета бутафорные обмотки статора. Наилучшими цветами для них являются: красный,

Рис. 256.



зелёный и жёлтый. Ротор нашего генератора необходимо на оси закрепить таким образом, чтобы в тот момент, когда центры его полюсов совпадают с активными сторонами первой фазы статорной обмотки, вольтметр, включённый на клеммы этой обмотки, должен показывать максимальное напряжение. Соответственно следует проверить и остальные фазы подобным же образом. Для приведения генератора во вращение слу:

жит ручка  $I$  (см. рис. 23). Внешний вид генератора в полностью собранном виде с указанием основных габаритных размеров представлен на рисунке 25а.

### ВОЛНОВАЯ ДИАГРАММА ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Изучение трёхфазного тока естественно начать с получения волновой диаграммы напряжений, возникающих в обмотках статора трёхфазного генератора. С помощью рекомендуемой нами модели генератора волновые диаграммы строятся на основе непосредственных измерений напряжений, производимых самими учащимися. Для этой цели к началу и концу каждой фазы генератора включаем школьные демонстрационные вольтметры, как показано на рисунке 26. Включение вольтметров должно произ-

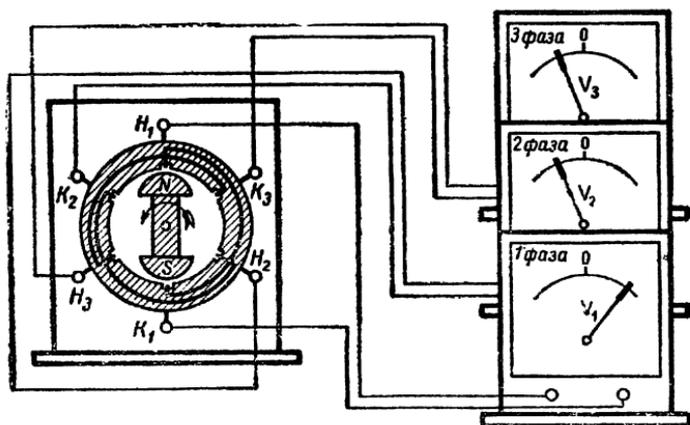


Рис. 26.

водиться симметричным образом, т. е. если левая клемма вольтметра первой фазы соединяется с началом, а правая с концом фазы генератора, то остальные вольтметры следует включать подобным же образом. Для лучшего восприятия движения стрелок вольтметров последние целесообразно расположить в вертикальной плоскости один над другим.

Установив нулевое значение напряжения в первой фазе, что соответствует горизонтальному положению ротора, мы начинаем медленно его вращать в левую сторону и

записывать показания вольтметров каждой фазы через  $30^\circ$  поворота ротора. Используя данные измерений, мы можем построить волновую диаграмму напряжений, представленную на рисунке 27.

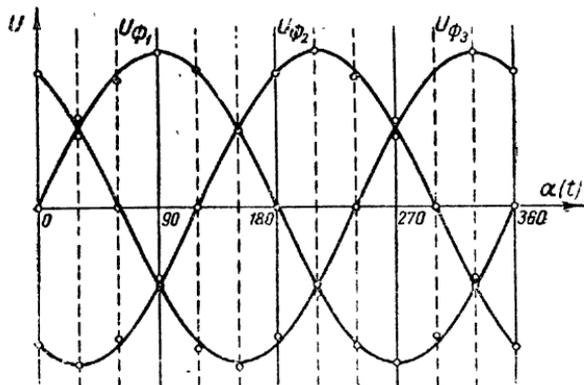


Рис. 27.

Включая одинаковые нагрузки в каждую фазу генератора, можно аналогичным образом построить волновую диаграмму токов.

Подобная демонстрация убеждает нас в том, что в генераторе переменного трёхфазного тока существуют три электродвижущие силы одинаковой частоты и амплитуды, но сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$ .

Если мы попытаемся изобразить схему соединения данного генератора с нагрузкой, то мы получим три замкнутые цепи, не имеющие электрической связи между собой. Такая система получила название шестипроводной электрически не связанной системы трёхфазного тока (рис. 28). Стрелки, стоящие на проводах, соединяющих фазы генератора и фазы нагрузки, показывают не мгновенное значение токов, а направление передачи энергии от генератора к приёмнику.

Далее следует перейти к показу и рассказу о связанных системах трёхфазного тока, которые дают возможность уменьшить число проводов, соединяющих генератор

с приёмниками. Как известно, соединение фаз генератора и нагрузки, образующее связанную систему трёхфазного тока, может быть осуществлено двумя способами, кото-

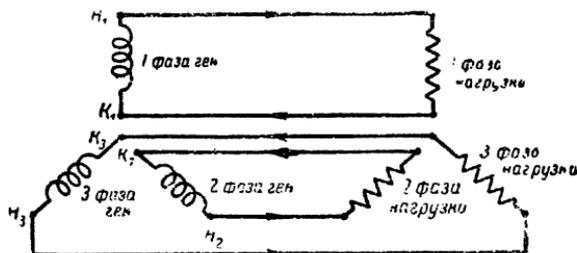


Рис. 28.

рые носят названия: соединение звездой и соединение треугольником.

### СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕЗДОЙ (Y)

Если все три конца (или начала) фаз генератора (или нагрузки) соединить в одну общую точку, называемую нулевой точкой генератора (или нагрузки), то полученное соединение называется соединением звездой (рис. 29). Соединение концов фаз генератора на модели производится условно, так как эти клеммы уже замкнуты между собой с задней стороны прибора.

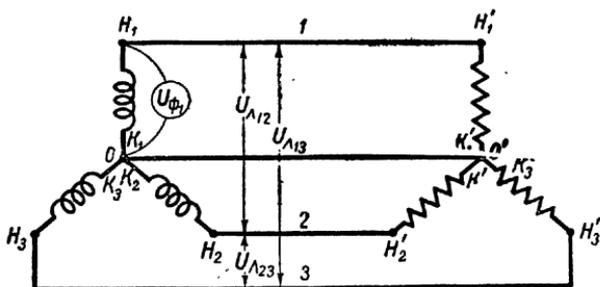


Рис. 29.

Провода линии, соединяющие начала фаз генератора и нагрузки, называются линейными проводами, а провод, соединяющий нулевые точки генератора и нагрузки, — нулевым проводом.

При таком соединении фаз генератора мы должны различать два напряжения. Первое напряжение, измеряемое между началом и концом любой фазы генератора, или, что то же самое, измеряемое между любым линейным проводом и нулевым проводом, называется фазным напряжением, а второе напряжение, измеряемое между началами двух любых фаз или между двумя любыми линейными проводами, — линейным напряжением.

Очевидно, что мы будем иметь три равных фазных напряжения ( $U_{\phi_1}$ ;  $U_{\phi_2}$ ;  $U_{\phi_3}$ ) и три равных линейных напряжения, которые будем обозначать с индексами соответственно тем проводам, между которыми мы измеряем напряжение ( $U_{л_{12}}$ ;  $U_{л_{23}}$ ;  $U_{л_{31}}$ ). Конечно, равенство токов и напряжений будет при условии равенства нагрузок в фазах.

Измерив максимальные значения линейных и фазных напряжений, мы найдём с точностью до десятых долей единицы известное соотношение между ними, а именно:

$$\frac{U_{л \max}}{U_{\phi \max}} = 1,7, \text{ или } U_{л \max} = \sqrt{3} U_{\phi \max}.$$

Используя ранее установленное соотношение между максимальными и эффективными значениями напряжения, можно написать, что:

$$\frac{U_{л \text{ фаз}}}{U_{\phi \text{ эфф}}} = 1,7 \text{ или } U_{л \text{ фаз}} = \sqrt{3} U_{\phi \text{ эфф}}$$

Обычно принято эффективное значение тока и напряжения писать без всякого индекса; тогда окончательно получим, что:

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi},$$

т. е. линейное напряжение больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз.

Что касается соотношения между фазными токами  $I_{\phi}$  (токами, идущими по фазам генератора) и линейными токами  $I_{л}$  (токами, идущими по проводам линии), то вполне очевидно, что:

$$I_{\phi} = I_{л}.$$

При наличии городской сети трёхфазного тока целесообразно на вертикальном щите смонтировать девять ламповых патронов, как показано на рисунке 30. Ламповые

патроны соединяются параллельно по три в три группы, каждая из которых является соответствующей фазой нагрузки. Все концы фаз нагрузки соединяются в общую точку — нулевую точку нагрузки ( $o'$ ). В нулевой провод следует поставить амперметр. При одинаковой нагрузке (при горении одинакового числа ламп равной мощности в каждой фазе) ток в нулевом проводе будет равен нулю и в этом случае его, очевидно, можно отбросить. Если мы создадим неравномерную нагрузку, т. е. оставим горящими в первой фазе три лампы, во второй две, а в третьей одну, то мы будем наблюдать появление тока в нулевом проводе.

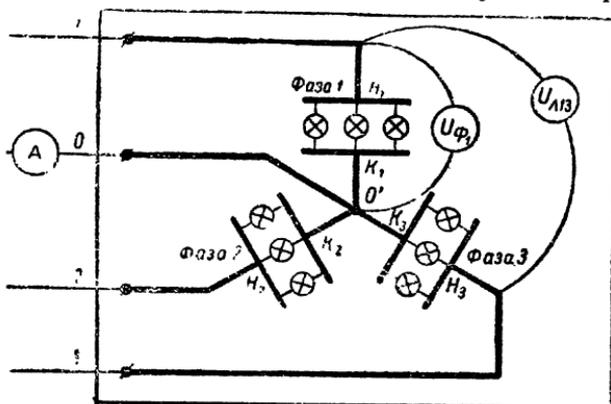


Рис. 30.

Чем больше неравномерность нагрузки фаз, тем больше сила тока в нулевом проводе. Если мы теперь отбросим нулевой провод, то будет наблюдаться неравномерное горение ламп в фазах. Там, где в фазе большее число ламп, там будет наиболее слабое их горение, так как сопротивление этой фазы наименьшее и в ней будет наименьшее падение напряжения. В ряде случаев трёхфазная сеть не имеет нулевого провода. В этом случае для создания нулевой точки можно рекомендовать схему, представленную на рисунке 31. На этой схеме изображены три реостата, начала которых включены в сеть, а концы замкнуты между собой, образуя искусственную нулевую точку, с которой и соединяется нулевая точка нагрузки. Начала фаз нагрузки проводами соединяются с ползунками реостатов. Эта схема даёт возможность не только получить нулевую точку, но и любые линейные напряжения (от нуля до номи-

нального линейного напряжения сети) при одновременном перемещении всех трёх ползунков. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно в том отношении, что становится возможным использовать лампочки и вольтметры любого номинального напряжения, лишь бы оно было меньше номинального напряжения сети.

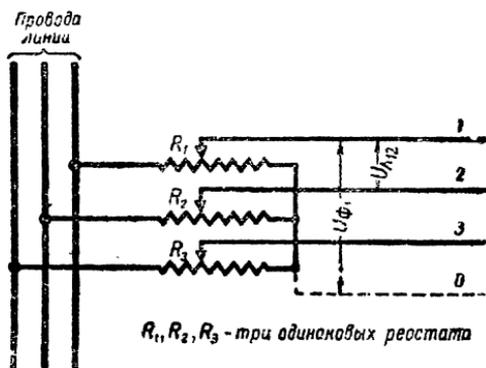


Рис. 31.

При отсутствии сети трёхфазного тока можно эти демонстрации проделать и с действующей моделью генератора трёхфазного переменного тока; однако следует иметь в виду, что в этом случае нельзя обеспечить равномерного свечения лампочек, так как трудно создать нужную скорость вращения генератора, но остальные рассмотренные выше явления всё же можно совершенно отчётливо наблюдать при любой скорости вращения генератора.

Из этих демонстраций следует сделать два вывода:

- 1) при равномерной нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю, и его в этом случае можно отбросить;
- 2) при неравномерной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю и его нельзя отбрасывать, так как это поведёт к неравномерному распределению напряжения в фазах нагрузки.

### СОЕДИНЕНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ ( $\Delta$ )

Если конец первой фазы генератора (или нагрузки) соединить с началом второй фазы, конец второй фазы с началом третьей и конец третьей фазы с началом первой, получим соединение, называемое соединением треугольником.

Соединение обмоток генератора треугольником практического распространения не имеет, так как в замкнутом контуре обмоток генератора в случае малейшего неравенства э. д. с. возникает внутренний ток, который снижает к. п. д. генератора, а кроме того, при одном и том же напряжении на клеммах генератора, у генератора, обмотки которого соединены треугольником, должно быть в  $\sqrt{3}$  раз большее напряжение на фазах, что, естественно, требует усиления изоляции фаз, а это в свою очередь увеличивает габариты машины и удорожает стоимость её производства. Соединение же треугольником фаз нагрузки представлено на схеме (рис. 32). Эта схема собирается на вер-

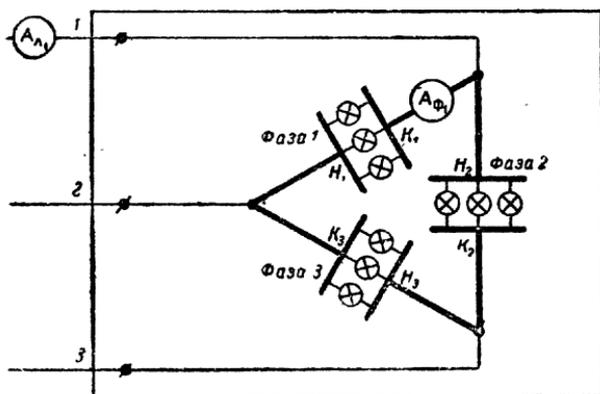


Рис. 32.

тикальной панели из девяти ламповых патронов, как и предыдущая схема. Ламповые патроны включаются параллельно по три штуки в каждую фазу. На этой схеме можно показать, что накал лампы не зависит от нагрузки в фазах, а также, включая амперметры в фазы нагрузки и в линейный провод, можно найти соотношение при равномерной нагрузке между максимальными значениями токов, идущих по проводам линии (линейных токов:  $I_{л_1}$ ,  $I_{л_2}$ ;  $I_{л_3}$ ), и токов, идущих по фазам нагрузки (фазовых токов:  $I_{ф_1}$ ;  $I_{ф_2}$ ;  $I_{ф_3}$ ). Из наблюдений получаем, что линейный ток больше фазового тока примерно в 1,7 раза или, более точно, в  $\sqrt{3}$  раз, т. е.

$$I_{л \max} = \sqrt{3} I_{ф \max}$$

Из рассмотрения схемы вполне очевидно, что линейные и фазовые напряжения в этом случае одинаковы, т. е.

$$U_{л\ max} = U_{ф\ max}.$$

Вспоминая соотношение между максимальными и эффективными значениями тока и напряжения, можно написать что:

$$I_{л\ эфф} = \sqrt{3} I_{ф\ эфф};$$

$$U_{л\ эфф} = U_{ф\ эфф},$$

или, опуская индекс «эфф», эти уравнения перепишем так:

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{ф};$$

$$U_{л} = U_{ф},$$

т. е. линейный ток при соединении треугольником больше фазового в три раза, а фазовые и линейные напряжения равны между собой.

При наличии сети трёхфазного тока эти самые соотношения можно проверить ещё раз.

Так как яркость горения лампочек при включении их треугольником во всех фазах одинаковая и практически не зависит от сопротивления фаз нагрузки, то мы можем сделать окончательный вывод, что ламповая нагрузка должна включаться либо звездой с нулевым проводом, либо треугольником.

В заключение рассмотрения вопроса о видах включения нагрузки целесообразно рассмотреть известные схемы электропроводки большого здания.

## БЕГУЩЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

К вопросу о вращающемся магнитном поле целесообразно подходить последовательно. Прежде всего следует показать опыт, представленный на рисунке 33. Идея этого опыта проста и хорошо всем известна. Если мы возьмём алюминиевый диск толщиной 0,5 мм и диаметром 200 мм и, сделав в его центре небольшое углубление керном, наденем на остриё иголки, то при движении магнита над диском последний приходит в движение в сторону перемещения магнита, т. е. в сторону движения магнитного поля. Для уменьшения трения между диском и иголкой целесообразно использовать подпятник от любой магнитной стрелки. Точно так же крайне целесообразно в целях

уменьшения магнитных потерь, под диском укрепить железный якорь. При наличии якоря магнит можно приводить в движение не только центробежной машиной, но и вращая рукой.

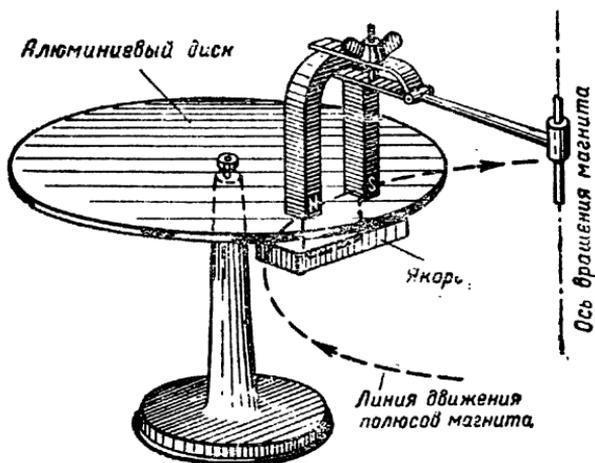


Рис. 33.

Можно этот опыт поставить и иначе — воспользовавшись круглой пластиной от раздвижного конденсатора и укрепив её в центрах (на иголках), как показано на рисунке 34. В этом опыте магнит располагается горизонтально, и его полюсы охватывают диск с двух сторон. Вращение диска в этом опыте наблюдается только при вращении магнита от центробежной машины.

Чрезвычайно хорошего эффекта можно добиться с диском от счётчика переменного тока в силу высокого качества применяемых там подшипников (рисунок 35), но диск от счётчика очень тонкий, а потому с большого расстояния его плохо заметно. Однако это затруднение легко устранить, если по окружности диска прикрепить белую бумажку с чёрными полосами.

В каком бы варианте ни был осуществлён этот вводный опыт, его демонстрация преследует цель показать, что вращение диска вызывается движением магнитного поля.

Затем следует показать, что движущееся (бегущее) магнитное поле может быть получено при прохождении переменного тока по трём катушкам.

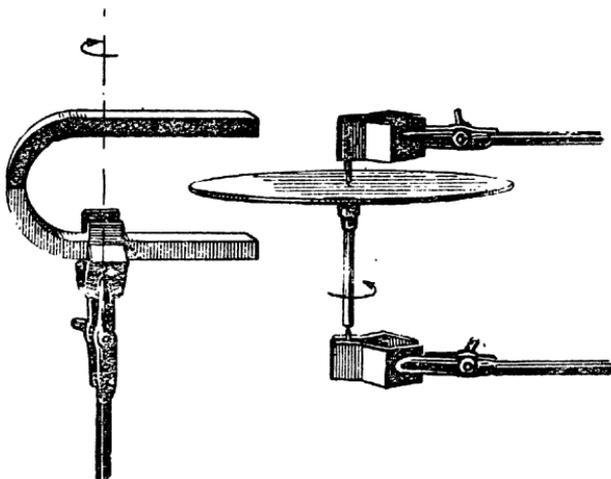


Рис. 34.

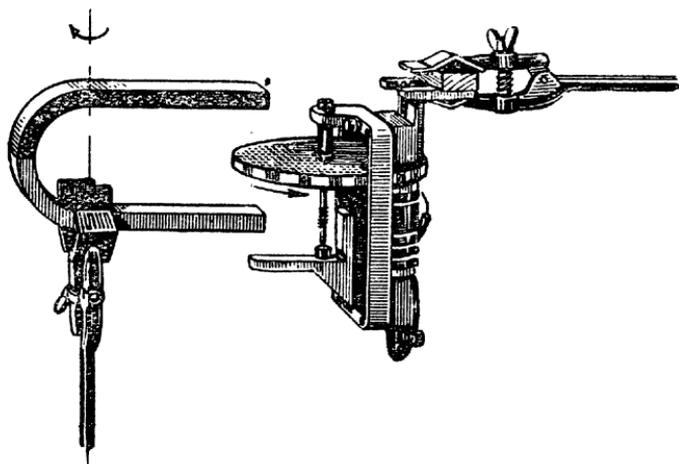


Рис. 35.

Движение магнитного поля при механическом движении магнитных полюсов учащиеся воспринимают совершенно ясно, но движение магнитного поля при прохождении переменного трёхфазного тока по катушкам представить вообще трудно, и здесь необходимо добиться, чтобы это «невидимое» движение поля или магнитных полюсов стало «видимым». Для этой цели мы предварительно по-

казываем следующий опыт. Берём соленоид (катушку) и с каждой его стороны укрепляем по две лампочки. Одна лампочка окрашена в красный цвет (*к*), а другая в синий цвет (*с*). Эти лампочки питаются через выпрямительные элементы, как показано на рисунке 36. Последовательно

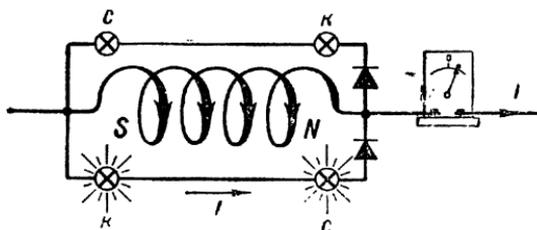


Рис. 36.

с соленоидом включается амперметр с нулём посередине шкалы. При отклонении стрелки амперметра вправо у соленоида образуются магнитные полюсы, изображённые на рисунке. Расположение полюсов у соленоида может быть проверено магнитной стрелкой. При этом у южного полюса загорается красная лампочка, а у северного полюса соленоида—синяя лампочка. При изменении направления тока меняются полюсы у соленоида и загораются верхние лампочки. Таким образом, не прибегая к каким-либо правилам, а только наблюдая за горением лампочек, мы всегда можем точно знать расположение полюсов у нашего соленоида, причём яркость свечения лампочек будет характеризовать интенсивность этих полюсов.

После этой предварительной демонстрации мы показываем образование магнитных полюсов на концах Ш-образного сердечника, собранного из пластин от трансформатора. Для этого необходимо на стержни сердечников надеть три катушки и питать их переменным током от ранее описанного генератора трёхфазного тока. К каждой катушке подключены по две цветные лампочки (рисунок 37). При вращении генератора интенсивность магнитного поля и его направление в каждой катушке будут непрерывно меняться. Допустим, что в некоторый момент времени у левого сердечника был слабый северный полюс (синяя лампочка горела слабо), затем с возрастанием тока интенсивность полюса возрастает, лампочка достигает наибольшей яркости, а затем постепенно яркость уменьшается и

наступает такой момент, когда лампочка гаснет. Но после того как ток, пройдя через нуль, изменил своё направление и стал снова возрастать, у того же сердечника загорается красная лампочка, яркость свечения которой проходит те же самые стадии.

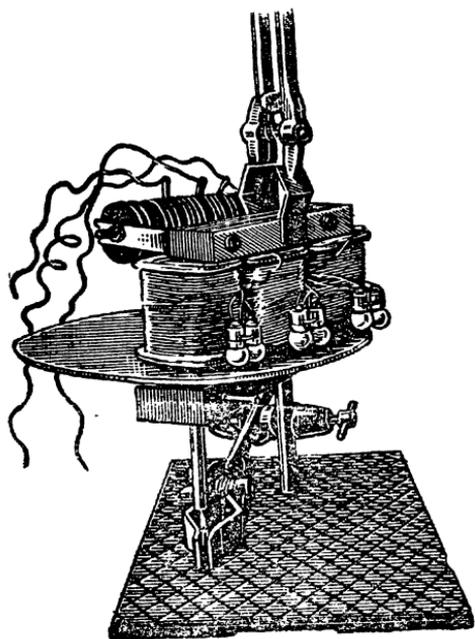


Рис. 37.

Точно такие же изменения яркости свечения лампочек происходят и у других сердечников, только изменения яркости лампочек у последующих сердечников запаздывают относительно предыдущих по времени на  $\frac{1}{3}$  периода тока, даваемого генератором, а так как время одного периода тока может быть неограниченно большим, то световой эффект очень удобен для наблюдения.

Обращаясь к графику трёхфазного тока, мы видим, что сначала наступит положительный максимум тока в первой фазе, затем во второй и, наконец, в третьей. Следовательно, свечение синей лампочки будет «перемещаться» от левого края Ш-образного сердечника к правому. Точно так же будет «перемещаться» и свечение красных лампочек от левого края к правому. Таким образом, перемещение магнитных полюсов при обтекании катушек переменным трёхфазным током стало «видимым». Если перемещаются магнитные полюсы, то по аналогии с механическим примером, разобранным выше, должно перемещаться и магнитное поле; а следовательно, должен вращаться, как и прежде, диск, введённый в это поле. Конечно, и в этом случае не следует забывать устанавливать якорь под диском и стремиться к наименьшим воз-

душным зазорам. Установка для демонстрации этого явления, собранная из деталей штативов, Ш-образного сердечника и катушек, представленная на рисунке 37, может быть значительно упрощена, если воспользоваться счётчиком переменного тока (рис. 35). Однако у счётчика переменного тока необходимо перемотать катушки, сделав их

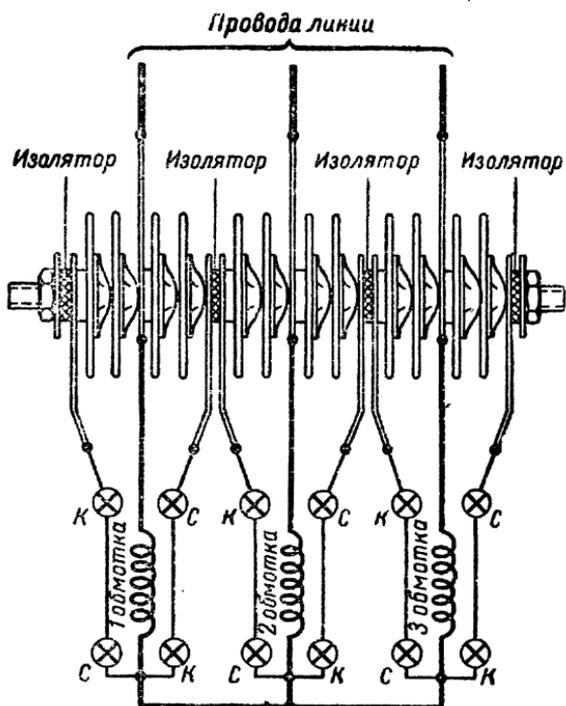


Рис. 38.

равными по числам витков. Указывать точное число витков катушек не имеет смысла, так как оно зависит от сердечника, воздушных зазоров, тока, идущего по обмоткам катушек, и трения в осях диска. Но ориентировочно можно сказать, что оно колеблется от 300 до 800 витков на каждую катушку.

Полная электрическая схема этой установки показана на рисунке 38. Из этого рисунка видно, что выпрямительный столбик изоляционными шайбами разделён на три самостоятельные секции. Средняя точка каждой секции соединяется с проводами линии, а крайние точки с цепя-

ми лампочек. Красные лампочки на схеме обозначены буквами *k*, а синие буквами *c*. Обмотки электромагнитов на этой схеме соединены звездой.

На этой же установке целесообразно показать и принцип реверсирования асинхронного двигателя. Для этой цели следует воспользоваться трёхполюсным перекидным рубильником или просто поменять местами два любых линейных провода. Меняя местами два линейных провода, мы по световому эффекту заметим, что движение магнитных полюсов будет происходить в противоположную сторону, что вызовет и противоположное вращение диска.

Понятие бегущего магнитного поля является не только необходимой предпосылкой для изучения вращающегося магнитного поля, но и играет колоссальное самостоятельное значение при изучении работы индукционных приборов однофазного тока — счётчиков электрической энергии и ваттметров, электрическая часть которых принципиально одинакова. Известно, что счётчик электрической энергии имеет также три катушки, расположенные на Ш-образном сердечнике. Две катушки на крайних стержнях соединяются последовательно и выполняются из толстого провода с относительно малым числом витков. Эти катушки образуют амперную часть прибора и включаются в сеть последовательно. Средняя катушка выполняется из тонкого провода с большим числом витков, представляет собой вольтовую часть прибора, включается в цепь параллельно нагрузке. Для увеличения угла сдвига фаз между токами в амперных и вольтовой катушках последовательно с вольтовой катушкой может ставиться дополнительное индуктивное сопротивление с тем, чтобы довести угол сдвига фаз между током и напряжением вольтовой катушки до  $90^\circ$ . Таким образом, в катушках будут существовать токи, сдвинутые на фазе относительно друг друга на угол, приблизительно равный  $90^\circ - \varphi$ , где  $\varphi$  — угол сдвига между токами и напряжением в самой сети. На рисунке 39 дана принципиальная схема счётчика переменного тока и волновые диаграммы токов в амперной и вольтовой обмотках прибора. Следует обратить внимание на схему включения амперных катушек между собой. Они включаются таким образом, чтобы на двух крайних стержнях образовывались противоположные полюсы. Пользуясь волновой диаграммой или световым эффектом, нетрудно проследить за схемой движения магнитных полюсов.

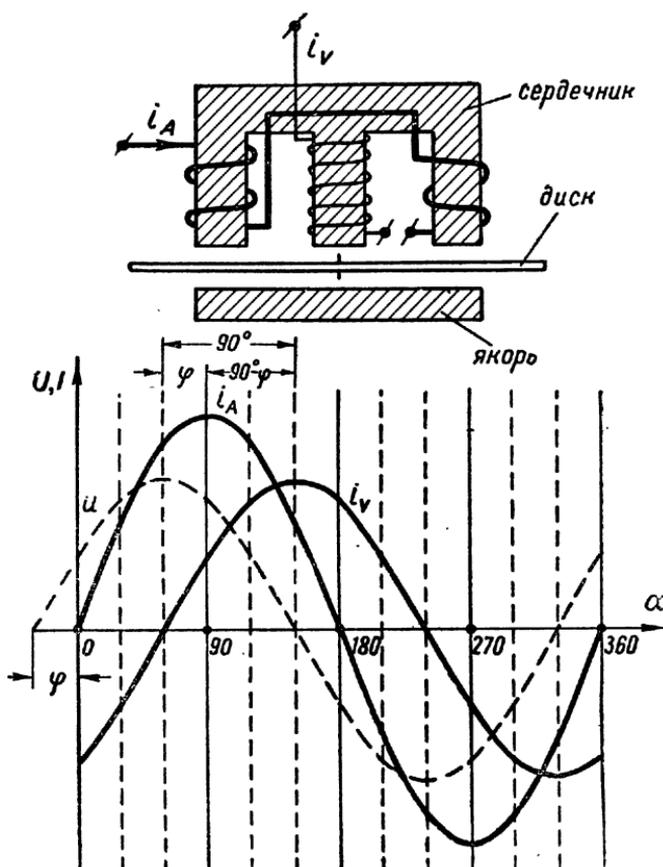


Рис. 39.

### ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Создать ясную картину вращающегося магнитного поля в сознании учащихся довольно трудно. Эта трудность заключается в том, что использование сети трёхфазного переменного тока создаёт магнитные поля, вращающиеся со скоростью сотен и тысяч оборотов в минуту (в зависимости от системы обмотки). Такая высокая скорость вращения не даёт возможности сделать его наглядным. Судить же о вращении магнитного поля на основании графического анализа волновых диаграмм тока или на основа-

нии наблюдаемых эффектов, которыми может сопровождаться вращение магнитного поля, в условиях школы нельзя признать достаточно убедительным. Подобные методы не обеспечивают создания яркого, легко запоминающегося

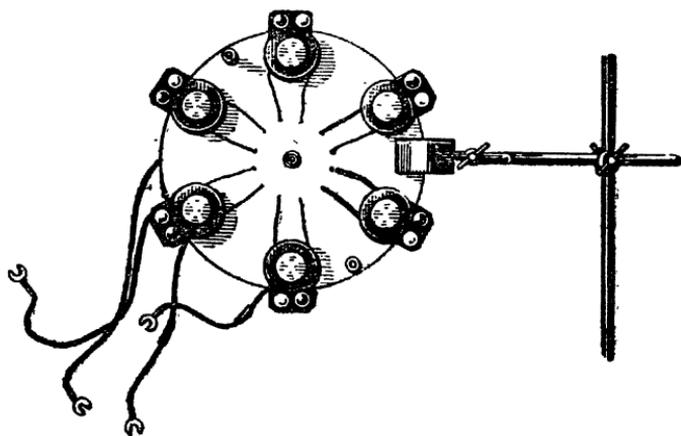


Рис. 40.

образа в сознании учащихся, а следовательно, не обеспечивают и прочности приобретаемых знаний.

Выход из создавшегося положения можно легко найти.

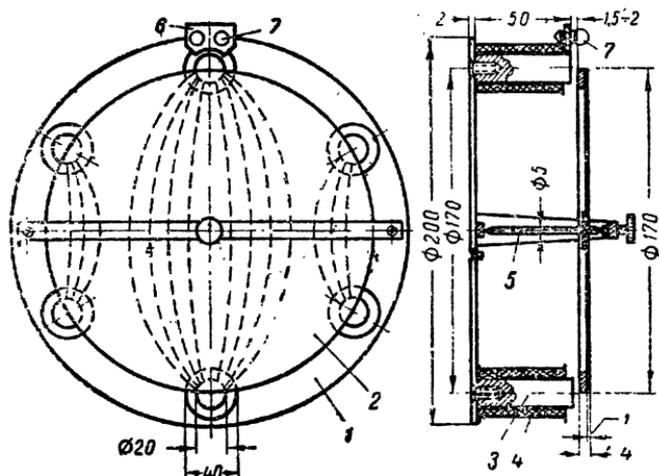


Рис. 41.

если использовать трёхфазный переменный ток чрезвычайно низкой частоты, но так как подобных генераторов в широкой практике не существует, то мы опять будем использовать в качестве источника тока нашу действующую модель генератора переменного трёхфазного тока.

Крайне целесообразно рассмотреть образование вращающегося магнитного поля на своеобразной модели асинхронного двигателя, внешний вид которой показан на рисунке 40, а конструктивное её выполнение с основными размерами на рисунке 41. Особенностью этой модели является наличие явно выраженных магнитных полюсов. Модель состоит из шести катушек 4 с железными сердечниками 3, укрепленными на железном диске 1. Обмотки противоположных сердечников соединяются между собой последовательно, как это показано на полной электрической схеме этой модели (рис. 43), образуя три фазы двигателя ( $H_1K_1$ ;  $H_2K_2$ ;  $H_3K_3$ ). Около каждого магнитного полюса устанавливается по две лампочки 7, одна лампочка красная ( $\kappa$ ), а другая синяя ( $c$ ). Лампочки ввёртываются в тоненькую эбонитовую пластинку 6, приклеенную к каркасу катушки. Провода к лампочке при употреблении такого «патрона» следует припаивать. Включение лампочек показано на схеме рисунка 43. На этой же схеме показано, как надо перебрать выпрямительный элемент, чтобы он обслуживал лампочки во всех трёх фазах. Фазовые обмотки между собой соединяются звездой. Каждая обмотка выполнена эмалевым проводом 0,35 мм и имеет 1200 витков. Конечно, данные обмотки в широких пределах могут изменяться в зависимости от конкретных условий.

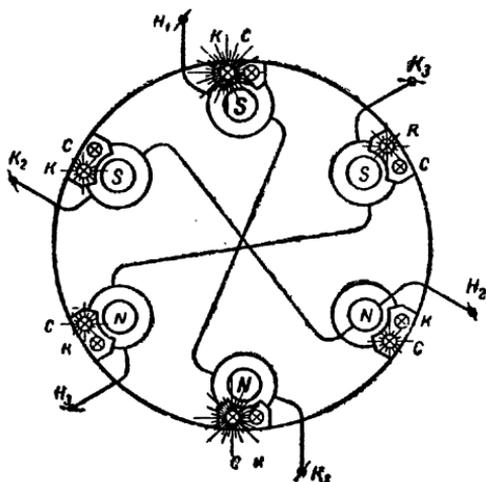


Рис. 42.

Подключив двигатель к генератору, мы получаем свечение лампочек, причём при неподвижном роторе генератора свечение двух диаметрально противоположных лампочек разного цвета будет самым ярким. Лампочки, стоящие у соседних катушек (справа и слева), будут светить-

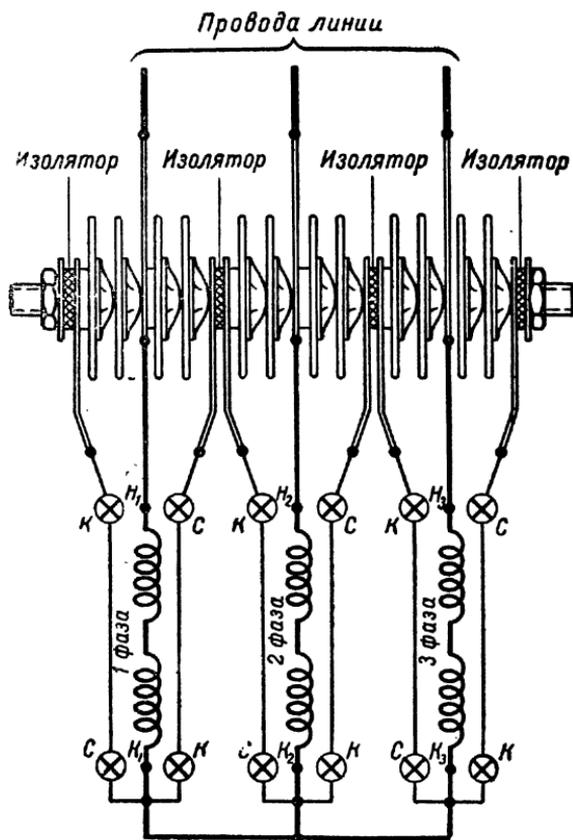


Рис. 43.

ся тем же цветом, но значительно слабее, так как напряжение в этих фазах, а следовательно, и ток будут значительно слабее (см. рис. 42). Таким образом, три последовательных сердечника имеют одинаковые полюсы, допустим южные, а три других последовательных сердечника имеют противоположные полюсы, причём средний полюс сердечника в каждой группе имеет наибольшую

интенсивность. Для того чтобы разобраться в подобном световом эффекте, необходимо обратиться к диаграмме

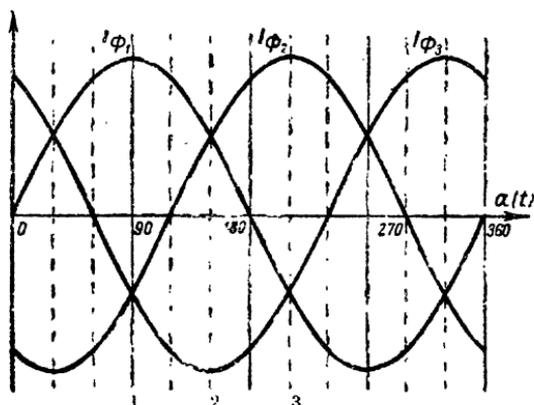


Рис. 44.

токов (рис. 44) и схеме распределения токов в статорных обмотках двигателя (рис. 45).

Мы знаем, что статор асинхронного двигателя аналогичен со статором генератора трёхфазного тока. Допустим мысленно, что статор нашего генератора будет рассечён плоскостью, параллельной вертикальной панели, на которой он укреплён. Примем за положительное направление тока в статорных обмотках направление тока от начала каждой фазы к её концу. Тогда для

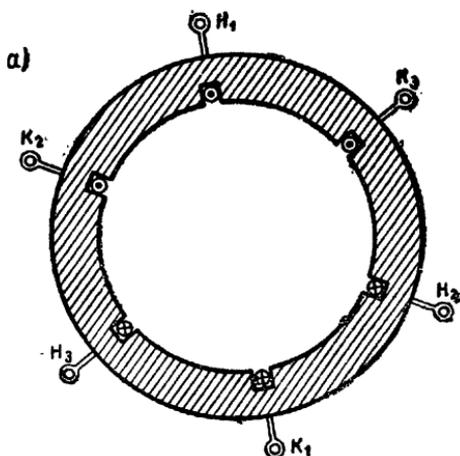


Рис. 45а.

момента времени, обозначенного на волновой диаграмме (рис. 44) цифрой 1, мы будем иметь максимальное и положительное значение тока в обмотке первой фазы, а это

означает, что в этот момент ток в первой фазе будет направлен от начала фазы обмотки к её концу, и в верхнем сечении провода мы должны поставить точку ( $\cdot$ ), а в нижнем крестик ( $\times$ ) (рис. 45а). В тот же самый момент времени ток во второй и третьей фазах будет меньше максимального значения и отрицательный, а следовательно, в фазах обмотки он будет направлен от конца фазы к её началу. Применяя прежнее обозначение, мы должны в верхних сечениях проводов второй и третьей фаз поставить точки, а в нижних сечениях крестики. Таким образом, мы получим картину распределения токов в статорных обмотках двигателя для данного момента времени. Если ток имеет максимальное значение в обмотке какой-либо фазы; то в обмотках соседних фаз он имеет то же направление, но значительно меньше по своей силе. Аналогичная картина имеет место и в модели нашего двигателя, что и подтверждается световым эффектом и может также быть рассмотрено на соответствующей схеме.

При вращении ротора генератора будут изменяться токи в фазах двигателя. Допустим, что ротор генератора повернулся на угол  $60^\circ$ . Это соответствует моменту времени,

обозначенному на волновой диаграмме цифрой 2. В этот момент времени ток третьей фазы имеет максимальное отрицательное значение и будет направлен от конца фазы к её началу. Токи в двух соседних фазах будут иметь положительное значение, но меньше максимального значения, и будут направлены от начала фаз обмоток к их концам.

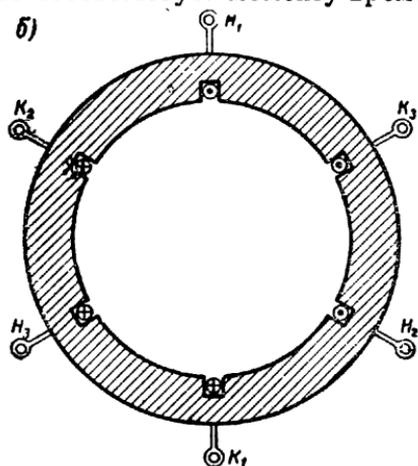


Рис. 45б.

Распределение токов в сечении статорных обмоток представлено на рисунке 45б. В силу данного перераспределения токов (напряжений) у нас и происходит явление перемещения яркого свечения красной лампочки вправо, а синей—влево, что соответствует перемещению полюсов по

окружности статора (рис. 46). Продолжая вращение ротора генератора, мы будем иметь непрерывное перемещение полюсов по окружности статора и непрерывное вращение магнитного поля между полюсами. Чрезвычайно убедительно можно показать, что повороту ротора на  $60^\circ$  соответствует поворот магнитного поля также на  $60^\circ$ , а одному обороту ротора соответствует один оборот магнитного поля.

На основе этой демонстрации необходимо сделать вывод, что при прохождении переменного тока по системе определённым образом расположенных катушек возникает вращающееся магнитное поле.

После этого следует перейти к получению вращающегося магнитного поля в системе катушек, представленной на рисунке 47. Эта система катушек ближе подходит к системе обмоток настоящего двигателя; однако в ней, как и в асинхронном двигателе, нет явно выраженных магнитных полюсов, что, естественно, осложняет восприятие. Анализатором вращающегося магнитного поля в этом опыте является магнитная стрелка; магнитную стрелку следует демпфировать, приклеивая к её концам флажки. Только после демонстрации вращения магнитного поля в статоре с явно выраженными полюсами целесообразно перейти к демонстрации вращения магнитного

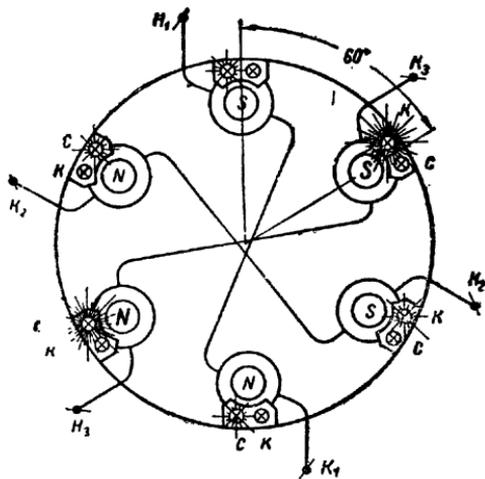


Рис. 46.

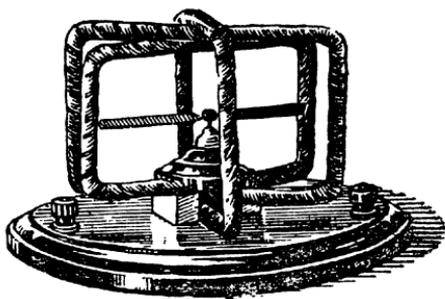


Рис. 47.

поля в статоре с неявно выраженными полюсами, причём это сначала следует сделать на модели с сосредоточенными фазовыми обмотками, а не с распределёнными по всей внутренней поверхности статора (см. рис. 15).

Схематический разрез такого статора с распределением токов в сечении обмоток для случая, когда ток в первой фазе имеет максимальное и положительное значение (момент времени  $t$  на волновой диаграмме) (рис. 44), представлен на рисунке 48. На этом рисунке показаны соответ-

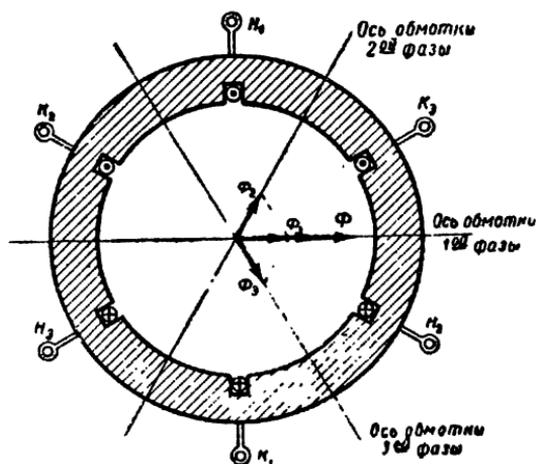


Рис. 48.

ствующие направления и величины векторов магнитных потоков отдельных фаз ( $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ ) и дан вектор результирующего магнитного потока ( $\Phi$ ). Направление магнитных потоков отдельных фаз определяется правилом буравчика и совпадает с осью катушки соответствующей фазы. Результирующий магнитный поток  $\Phi$  совпадает с осью катушки той фазы, ток в которой имеет максимальное значение. Картина магнитного поля статора, изображённая с помощью магнитных силовых линий, для данного случая представлена на рисунке 49. На внутренних, противоположных сторонах статора возникают два магнитных полюса, которые и будут перемещаться с течением времени по

поверхности. По истечении времени  $\frac{T}{6}$  наступит максимум тока в третьей фазе, и вектор результирующего магнитного потока должен совпадать с осью катушки этой фазы, а следовательно, он должен повернуться за это время на  $60^\circ$ . Точно на такой же угол должны переместиться и магнитные полюсы на внутренней поверхности статора. Очевидно, что за время, равное  $T$ , вектор результирующего магнитного поля повернется на  $360^\circ$ , т. е. магнитное поле делает один полный оборот. Если бы мы на осях катушек всех фаз укрепили рядом красную и синюю лампочки (рис. 50) и включили их соответствующим образом, как о том говорилось ранее, то мы получили бы световой эффект, точно соответствующий характеру изме-

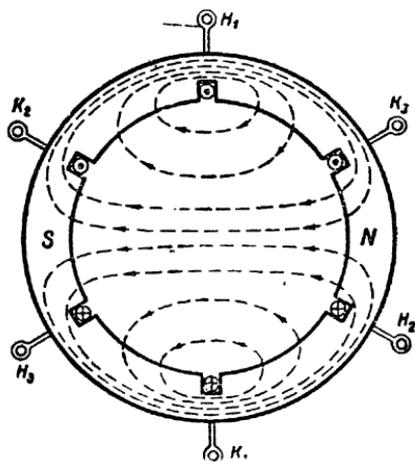


Рис. 49.

Рис. 50

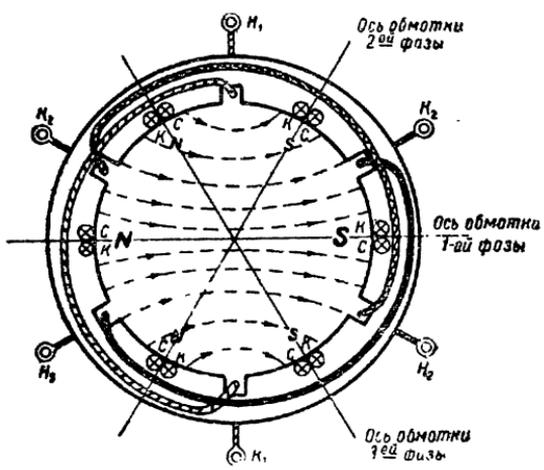


Рис. 50.

нения магнитного поля статора. Световым эффектом можно сопровождать и вращение магнитного поля настоящего двигателя. Для этой цели следует использовать статор, который даёт скорость вращения магнитного поля от сети трёхфазного переменного тока, равную  $3600 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ , т. е. статор, не имеющий параллельных обмоток в фазах. Оси обмоток фаз проще всего следует установить с помощью магнитной стрелки.

### СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Для демонстрации принципа работы синхронного двигателя опять обратимся к нашей модели асинхронного двигателя с явно выраженными полюсами. Укрепив стержневой магнит, как показано на рисунке 51 (или магнитную

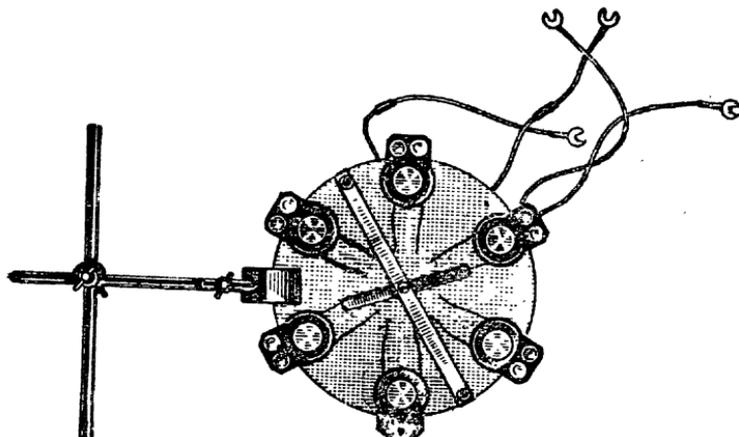


Рис. 51.

стрелку), мы можем наблюдать, что этот магнит-ротор будет вращаться одновременно с магнитным полем. Если ротор генератора мы повернём на угол  $60^\circ$ , то и ротор-магнит двигателя повернётся на  $60^\circ$ . За один оборот якоря генератора магнит повернётся точно на один оборот. Одновременное движение магнитного поля и магнита (ротора) получило название синхронного движения, а двигатели, работающие по этому принципу, называются синхронными двигателями.

Следует сказать, что применение постоянных магнитов

в роторах промышленных двигателей встречается крайне редко и то только в маломощных двигателях. Во всех синхронных двигателях, применяемых на производстве, ротор представляет собой электромагнитную систему, питаемую от постороннего источника постоянного тока. Конструкция данного двигателя аналогична конструкции синхронного генератора трёхфазного переменного тока. Используя в качестве синхронного двигателя модель синхронного генератора, показанную на рисунке 15, можно показать влияние возбуждения синхронного двигателя на  $\cos \varphi$  цепи. Для этой цели надо воспользоваться вольтметром и амперметром, как это было описано при исследовании сдвига фаз на различных сопротивлениях, и наблюдать изменение угла относительно сдвига стрелок этих приборов в зависимости от возбуждения ротора. На этом опыте изучается роль синхронного двигателя в качестве фазокомпенсатора.

Чрезвычайно интересно исследовать тем же самым способом влияние ёмкости на угол сдвига фаз в цепи с индуктивной нагрузкой. Для этой цели следует использовать ранее описанную (стр. 14) схему цепи с индуктивной нагрузкой и, параллельно подключая к индуктивному сопротивлению различные конденсаторы, проследить за изменением угла относительного сдвига стрелок приборов.

## АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Очень удобно и чрезвычайно наглядно изучать работу асинхронного двигателя, используя статор с явно выраженными полюсами (рис. 52). Укрепим в центрах ротор 2 (см. рис. 41), сделанный из железного круга толщиной в 1 мм и имеющий с наружной стороны белые радиальные полосы. Для увеличения вращающего момента ротора необходимо с его внутренней стороны приклепать алюминиевый диск или кольцо, как показано на рисунке. Наличие алюминиевого кольца усиливает ток в роторе, а следовательно, и его вращающий момент. Зазор между ротором и полюсами статора должен быть как можно меньше. Однако и с зазором 1,5—2 мм двигатель очень хорошо работает. Соединив модель двигателя с моделью генератора и приведя последний во вращение, мы наблюдаем по световому эффекту скорость вращения магнитного поля, а по радиальным белым полосам на роторе — скорость вращения

ротора. Скорость движения ротора будет меньше скорости вращения магнитного поля, т. е. они вращаются не синхронно. Такое движение получило название асинхронного, а двигатели, использующие этот принцип движения, называются асинхронными двигателями.

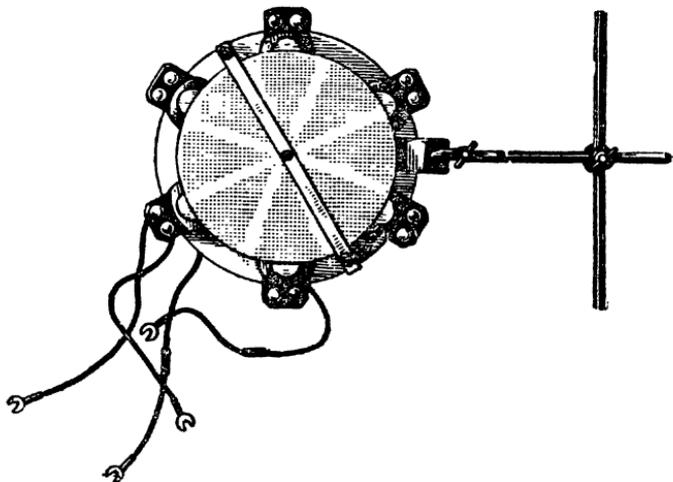


Рис. 52.

Очень интересно в настоящем статоре показать асинхронное движение консервной банки, надетой на ось и вставляемой внутрь статора (рис. 53). При этой демон-

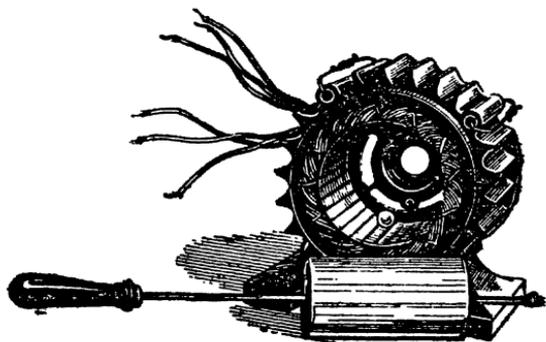


Рис. 53.

страции целесообразно задний подшипниковый щиток не снимать, и он будет служить опорой для оси вставляемой консервной банки, так как в противном случае требуется

очень большое усилие рук для удержания оси посередине статора. Напомним, что в статоре с вынутым ротором, в силу отсутствия противоэлектродвижущей силы, возникает очень большой ток, могущий повредить обмотку статора. Для уменьшения тока в статорных обмотках необходимо в цепь каждой фазы поставить соответствующие (одинаковые) реостаты или, если возможно, произвести переключение статорных обмоток с треугольника на звезду. Последний способ включения будет эффективен, например, для маломощных двигателей (до 1—1,5 кВт), на паспорте которых написано «Y/ $\Delta$ ; 220/127 в» и при номинальном напряжении сети 127 в. Если же номинальное напряжение сети 220 в, то переключением обмоток такого двигателя нельзя добиться необходимого снижения тока в статоре.

В заключение рассмотрения вопроса об асинхронных двигателях следует рассмотреть конструкцию настоящего асинхронного двигателя либо в натуре, либо на учебной таблице и выяснить физические принципы, лежащие в основе этой конструкции.

При разработке эксперимента по этой теме мы в большей степени стремились к обеспечению максимальной наглядности эксперимента и в меньшей степени уделяли внимание созданию наиболее простых установок. Поэтому предлагаемые нами схемы установок и моделей в процессе работы с ними могут быть ещё более упрощены. Например, вместо того чтобы изготавливать алюминиевые диски и устанавливать их на центрах, можно воспользоваться диском от раздвижного конденсатора и подвесить его на тонкой длинной нитке. Чем больше будет длина нитки, тем меньше сопротивление будет иметь диск при своём вращении. Диск, подвешенный указанным образом, показан на рисунке 54. Этот диск хорошо приводится во вращение как постоянным магнитом, укрепленным на центробежной машине, так и от модели генератора. При демонстрации этого опыта многое зависит от качества нити. Нить должна быть тонкой и некрученной. Предварительно диску надо дать повисеть некоторое время на нити с тем, чтобы нить могла полностью раскрутиться под действием силы тяжести.

Все наши приборы могут работать как от модели генератора, так и от сети переменного тока; однако при этом световой эффект, конечно, исчезает.

Не весь описанный эксперимент в этой работе нужен учителю на уроке при прохождении учебной программы. Некоторую часть его следует использовать на кружковых занятиях по физике и электротехнике. Попытаемся отобрать эксперимент, необходимый учителю для урока, по-

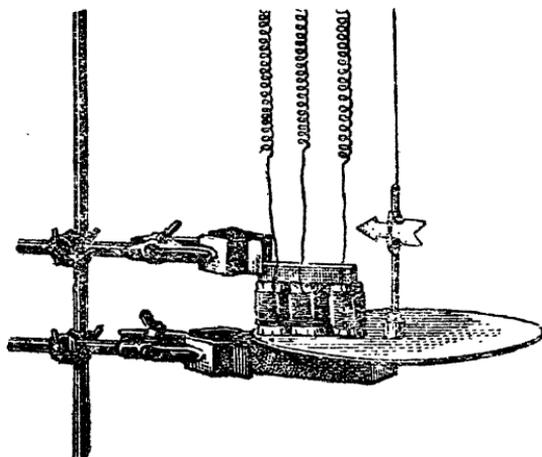


Рис. 54.

казать его роль в учебном процессе и дать распределение материала по урокам.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА ПО УРОКАМ

На прохождение темы «Переменный электрический ток» программой предусмотрено 16 часов. Распределение этого времени по темам программы мы проводим следующим образом:

- 1-й урок. Получение переменного напряжения (§94, 95<sup>1</sup>):
- а) получение переменной синусоидальной э.д.с. (построение графика);
  - б) конструкция генераторов переменного тока.
- 2-й урок. Получение переменного тока (§ 96):
- а) получение графика переменного тока;
  - б) эффективное значение переменного тока.
- 3-й урок. Сопротивление в цепи переменного тока (§ 97):
- а) активное сопротивление;

<sup>1</sup> Нумерация параграфов и рисунков дана по первому изданию учебника физики Пёрышкина, ч. III.

- б) индуктивное сопротивление;
  - в) ёмкостное сопротивление.
- 4-й урок. Получение трёхфазного переменного тока (§ 98):
- а) получение графиков э.д.с.;
  - б) получение графиков тока;
  - в) конструкция генераторов трёхфазного тока.
- 5-й урок. Соединение звездой (Y) и треугольником ( $\Delta$ ) (§ 99, 100).
- Материал этой темы непосредственно не предусмотрен действующей программой; однако без рассмотрения этих вопросов (хотя бы в самой общей форме) нельзя дать учащимся ясного представления о системе трёхфазного тока. В учебнике этот материал имеется, но он набран петитом.
- 6-й урок. Закрепление пройденного материала:
- а) решение качественных задач;
  - б) решение количественных задач.
- 7-й урок. Получение вращающегося магнитного поля и понятие о синхронных двигателях (§ 101).
- 8-й урок. Асинхронные двигатели (§ 101):
- а) принцип действия;
  - б) конструктивное выполнение.
- 9-й урок. Выпрямление переменного (однофазного) тока (§ 104).
- 10-й урок. Генераторы постоянного тока (§ 105).
- 11-й урок. Производство и передача электрической энергии (§ 102):
- а) тепловые электрические станции (конденсационные и ТЭЦ);
  - б) гидроэлектростанции;
  - в) ветроэлектростанции.
- 12-й урок. Трансформатор (§ 103).
- 13-й урок. Закрепление пройденного материала:
- а) решение качественных задач;
  - б) решение количественных задач.
- 14-й урок. Распределение электрической энергии и её применение в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте.
- 15-й урок. Успехи электрификации СССР (§ 106).
- 16-й урок. Контроль знаний учащихся.
- Рассмотрим построение некоторых уроков.

## Построение 1-го урока

Тема: «Получение переменного напряжения».

Первый урок по новой теме может быть построен таким образом, что он будет являться уроком сообщения новых знаний, т. е. в таком уроке будет отсутствовать контроль ранее приобретённых знаний (опрос), что значительно увеличивает время на изложение новой темы.

Содержание этого урока определяется в основном учебником (§ 94, 95), где эта тема раскрыта с достаточной полнотой. Однако для учащихся материал этой темы не является убедительным по той причине, что, с одной стороны, график тока записывается с помощью осциллографа, который пока ещё отсутствует в подавляющем количестве школ, а с другой стороны — осциллограммы, записанные прибором, трудно воспринимаются учащимися. Для облегчения сложного материала этой темы мы поступаем следующим образом. Сначала рассматриваем аналитически вращение витка в равномерном магнитном поле (как в учебнике) и приходим к выводам, которые затем проверяем на витке, вращающемся в равномерном поле и замкнутом на гальванометр. На этом опыте показываем, что напряжения и токи действительно носят переменный характер, и только после этого переходим к демонстрации действующей модели генератора переменного тока, предварительно раскрыв её содержание. Здесь было бы целесообразно использовать две модели. Одна модель должна быть с вращающимся витком и неподвижной магнитной системой в соответствии с рисунком учебника (рис. 180), а другая модель должна быть в соответствии с рисунком учебника, отражающую принципиальную схему генератора переменного тока (рис. 181). Если же пользоваться одной моделью, то первой модели следует отдать предпочтение, так как она теснее связана с материалом учебника. Вращая ручку сконструированной нами модели генератора, мы записываем показания вольтметра в функции угла поворота рамки (через  $30^\circ$  поворота ротора) и по результатам измерений строим график напряжения (э.д.с.). Такое построение волновой диаграммы обеспечивает её понимание всеми учащимися класса, что неоднократно проверялось в течение длительного периода времени и в ряде школ. Кроме того, демонстрации дей-

ствующих моделей генераторов, которые обладают большой наглядностью, дают яркий, прочно запоминающийся образ этих машин.

### Построение 2-го урока

**Т е м а:** «Получение переменного тока».

Второй урок безусловно должен быть типовым и содержать все пять основных этапов урока. Содержание нового материала урока также определяется учебником (§ 96); однако мы вводим эксперимент, который устраняет догматизм этого параграфа. Используя модель генератора и включая её на сопротивление нагрузки, мы измеряем ток и напряжение на нагрузке в функции угла поворота ротора и строим волновые диаграммы тока и напряжения на активном сопротивлении, которые представлены в учебнике на рисунке 183. Роль подобного эксперимента вполне очевидна; мы дополняем трудные и недостаточно последовательные математические выводы убедительными наблюдениями.

Особенно полезной оказывается демонстрация по определению эффективного тока и его соотношения с максимальным током. В учебнике это соотношение даётся в готовом виде, а мы имеем возможность получить его экспериментально, используя прибор тепловой системы, включённый на клеммы модели генератора. Конечно, это соотношение может быть получено и другими путями, но более простого, более наглядного и убедительного пути, чем тот, который был ранее описан, указать невозможно.

### Построение 3-го урока

**Т е м а:** «Сопротивление в цепи переменного тока».

Этот урок также должен быть типовым уроком. Выяснив прочность усвоения основных положений пройденного материала, мы переходим к изложению нового материала, объём которого только в основном определяется § 97. Мы считаем необходимым говорить о четырёх видах сопротивлений: омическом, активном, индуктивном и ёмкостном. Отличие активного сопротивления от омического мы даём путём логических объяснений. Приводим опыты, описанные в учебнике для разъяснения природы индуктивного и ёмкостного сопротивлений, однако дополнительно

ставим опыты по демонстрации фазового сдвига на указанных сопротивлениях, а также показываем влияние частоты на величину индуктивного и ёмкостного сопротивлений, т. е. подводим учащихся к пониманию роли величины индуктивности, ёмкости и частоты на соответствующие виды сопротивлений, но математической зависимости

$R_L = \omega L$  и  $R_c = \frac{1}{\omega c}$ ) не даём. При введении материала,

который не отражён в учебнике, мы непременно прибегаем к очень кратким записям на уроке. Здесь же показываем влияние ёмкости на угол сдвига фаз в цепи с индуктивной нагрузкой.

### Построение 4-го урока

**Т е м а:** «Получение трёхфазного тока».

Этот урок мы посвящаем полностью сообщению новых знаний. Содержание темы целиком определяется § 98 учебника. Однако использование модели генератора трёхфазного тока даёт нам возможность создать необходимую наглядность по этой теме, которая не обеспечивается другими, доступными для нас средствами. Включая вольтметр на клеммы модели генератора, мы измеряем напряжения в функции угла поворота ротора и по результатам измерений строим графики электродвижущих сил в одной координатной системе. Используя прежние знания учащихся, что ток и напряжение на активном сопротивлении находятся в фазе, можно путём логических рассуждений от графиков электродвижущих сил перейти к графикам токов или графики тока построить по результатам непосредственных измерений. Работа, связанная с построением графиков, очень трудоёмкая и занимает 20—25 минут времени. Для ускорения построения графиков следует рекомендовать проводить измерения не через 30° поворота ротора, а через 60°, причём начинать измерения следует с максимума тока в какой-либо фазе. При построении графиков крайне желательно использование цветных мелков. Указанная модель генератора поможет и при рассмотрении конструкций генераторов, так как даёт крайне наглядный образ схемы генератора. Желательно при рассмотрении конструкции генератора показать статор настоящего асинхронного двигателя, так как статоры этих машин совершенно одинаковы.

Показу модели генератора должна предшествовать демонстрация самого явления получения трёхфазного тока в натуральном виде, и только после этого имеет смысл переходить к модели генератора, предварительно раскрыв принципы её работы перед учащимися. Если перед учащимися были ранее достаточно полно раскрыты принципы работы модели однофазного генератора, то объяснение работы генератора трёхфазного тока не вызывает затруднений и почти не отнимает времени.

## Построение 5-го урока

**Т е м а:** «Соединение звездой и треугольником».

Урок по этой теме является типовым уроком. Содержание нового материала определяется полностью учебником (§ 99, 100). Экспериментальную часть урока значительно расширяем. Мы используем панели, на которых предварительно собрана ламповая нагрузка звездой и треугольником. Включая эту нагрузку на клеммы генератора, мы экспериментально показываем соотношение между линейными и фазовыми токами при соединении звездой и треугольником, после чего устанавливаем соотношение между эффективными значениями указанных величин. Затем эти же самые значения проверяем с помощью сети трёхфазного переменного тока. С помощью модели генератора показываем отсутствие тока в нулевом проводе при равномерной нагрузке (этот опыт является подтверждением того же вывода, сделанного из анализа волновых диаграмм для каждого последовательного момента времени). При наличии сети следует подтвердить тот же вывод, включая нагрузку на сеть. Желая быть объективным, следует признать, что применение модели генератора на этом уроке не даёт каких-либо преимуществ по сравнению с использованием сети, а следовательно, можно обойтись и без него; однако для школ, не имеющих сети трёхфазного переменного тока, модель генератора оказывает неоценимую услугу, особенно если она позволит путём устройства соответствующей передачи довести частоту переменного тока до 10—15 гц. В заключение урока рассматриваем схемы электропроводки большого здания. При рассмотрении этих схем обращаем внимание главным образом на включение нагрузок.

## Построение 6-го урока

Этот урок посвящаем целиком закреплению пройденного материала. Закрепление проводим путём выяснения основных моментов теории, решения качественных и количественных задач.

Примерами качественных задач являются следующие:

1) К чему ведёт обрыв нулевого провода при ламповой нагрузке, включаемой звездой?

2) Могут ли гореть лампы в одной фазе, если они включены в других фазах и нулевой провод оборван?

3) Каким образом можно создать искусственную нулевую точку?

4) В каждой фазе по одной лампе разных мощностей и одинакового номинального напряжения. Объяснить, как они будут гореть при включении их звездой без нулевого провода. Как они будут гореть при включении нулевого провода?

5) Как будут гореть те же лампы (задача 4) при включении их треугольником?

6) Как изменится волновая диаграмма токов в обмотках генератора при включении неравномерной нагрузки?

7) Почему нулевой провод в линии делается тоньше остальных проводов?

Примерами количественных задач являются:

1) Определение эффективного напряжения по заданному максимальному напряжению.

2) Определение максимального напряжения по заданному эффективному.

3) Определение линейного напряжения по заданному фазному при соединении звездой.

4) Определение линейного тока по заданному фазному току при соединении треугольником.

5) Определение линейного тока по фазному напряжению и нагрузке. Например, в каждой фазе нагрузки имеется по 10 ламп сопротивлением по 200 *ом* с номинальным напряжением 127 *в*. Определить ток в линии, если фазы нагрузки включены треугольником, а лампы между собой включены параллельно.

## Построение 7-го урока

Тема: «Получение вращающегося магнитного поля и понятие о синхронном двигателе».

Этот урок мы строим как урок общего типа со всеми основными этапами урока. Однако основной упор следует сделать на изложении нового материала. Изложение нового материала базируется на содержании учебника (§ 101), но содержание учебника существенно дополняется экспериментом, который раскрывает полностью природу вращающегося магнитного поля, устраняет известный догматизм учебника и делает содержание этого параграфа безусловно более доступным. Сначала демонстрируется движение диска (любым способом) как следствие механического движения магнита (магнитного поля). Затем показываем бегущее магнитное поле со световым эффектом, предварительно объяснив сущность светового эффекта как результат прохождения трёхфазного тока по трём рядом расположенным катушкам, и только после этого переходим к получению вращающегося магнитного поля со световым эффектом в статоре с явно выраженными полюсами. На этом же статоре мы демонстрируем принцип синхронного двигателя, помещая магнит или магнитную стрелку во вращающееся поле. После этого можно перейти к демонстрации вращающегося магнитного поля в статоре настоящего двигателя. Анализатором вращения поля в этом случае может служить магнитная стрелка. Во всех этих опытах источником трёхфазного переменного тока является действующая модель генератора.

### Построение 8-го урока

**Т е м а:** «Асинхронные двигатели».

По этой теме мы даём урок общего типа. Содержание урока опять определяется тем же параграфом учебника (§ 101), но принцип асинхронного двигателя поясняем на модели двигателя с явно выраженными полюсами и со световым эффектом. Асинхронность движения ротора на этой демонстрации выступает с предельной ясностью путём сопоставления вращающегося светового эффекта со скоростью вращения ротора.

### Построение 9-го урока

**Т е м а:** «Выпрямление переменного тока».

Урок по этой теме является также уроком общего типа. Его содержание определяется учебником (§ 104); однако, используя модель генератора в качестве источника

тока и включая приборы (амперметр последовательно с нагрузкой, а вольтметр в обхват нагрузки и выпрямительному элементу), можно произвести измерения тока и напряжения в функции угла поворота ротора модели генератора. Результатом измерений является график, представленный на рисунке 200 учебника физики. Такая демонстрация освобождает от осциллографических методов исследования и приучает учащихся к построению и чтению волновых диаграмм. Последнее обстоятельство играет большое значение при изучении физики в X классе.

Содержание остальных уроков мы не дополняем каким-либо новым демонстрационным материалом, а потому построение этих уроков не рассматриваем.

### Заключение

Мы глубоко убеждены в том, что создание индукционных генераторов, или преобразователей, которые давали бы возможность получать из постоянного тока переменный однофазный и трёхфазный ток любой частоты, намного способствовало бы улучшению преподавания раздела физики «Переменный ток» в школе.

Учитывая трудности создания индукционных генераторов, дающих токи любых частот и достаточной силы, очевидно, следует пойти по линии создания преобразователей указанного типа<sup>1</sup>. Перед настоящей работой и стояла цель показать, какой эксперимент можно поставить, работая с подобным преобразователем.

---

<sup>1</sup> Преобразователи подобного типа и методика работы с ними изложены в авторском свидетельстве № 90 934 с приоритетом от 19 июня 1950 года, выданном на имя автора.



## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение . . . . .	3
Переменный однофазный ток . . . . .	6
График переменного тока . . . . .	9
Эффективное значение переменного тока . . . . .	10
Сопротивление цепи переменного тока . . . . .	13
Выпрямление переменного тока . . . . .	19
Трёхфазный переменный ток . . . . .	23
Волновая диаграмма трёхфазного тока . . . . .	34
Соединение звездой . . . . .	36
Соединение треугольником . . . . .	39
Бегущее магнитное поле . . . . .	41
Вращающееся магнитное поле . . . . .	48
Синхронный двигатель . . . . .	57
Асинхронный двигатель . . . . .	58
Распределение материала по урокам . . . . .	61

*Михаил Алексеевич Ушаков*  
Изучение трёхфазного тока в школе  
Редактор *Ю. В. Басов*  
Технический редактор *М. Д. Петрова*  
Корректор *В. А. Соловова*.

\* \* \*

Сдано в набор 6/IV 1955 г. Подписано  
к печати 15/IX 1955 г. 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>  
Печ. л. 4,5 (3,69). Уч.-изд. л. 3,33.  
Тираж 30 тыс. экз. А05257.  
Заказ № 2495. Цена 90 к.

Учпедгиз, Москва, Чистые пруды, 6.

\* \* \*

Воронеж, типография изд-ва «Коммуна»

Цена 90 к.