

621.313.32

ВОЕННАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ РККА И 20
ИМ. Т. БУДЕННОГО

621.313.32

И 20

В. И. ИВАНОВ

ДЕО

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

45726

2

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

ВЭТА



изд. 89, 96, 08

ЛЕНИНГРАД
1934

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Поскольку все современные электрические системы работают на переменном токе, а следовательно, питаются синхронными генераторами, естественно, что все процессы, протекающие в этих системах, в сильной степени зависят от характеристик синхронных машин. Правильная эксплуатация или проектирование электрических систем в настоящее время возможны лишь при отчетливом понимании явлений, происходящих в синхронных машинах при работе. В особенности от характеристик синхронных машин зависят такие исключительно важные проблемы, как короткие замыкания и устойчивость параллельной работы; в области применения электрических машин в промышленности проблема повышения коэффициента мощности также связана с вопросами работы синхронных машин. Интересно привести слова P. L. Alger'a (G. E. R., 1932, стр. 553): „Дайте мне значения реактивностей синхронных машин и я укажу вам поведение системы“.

Указанные выше обстоятельства поставили перед каждым электротехником, занимающимся вопросами эксплуатации или проектирования электрических систем, необходимость ясного представления теории работы синхронных машин. Заслуживающим внимания является то обстоятельство, что большое количество статей по синхронным машинам в американской периодической литературе написано инженерами, работающими в области передачи энергии, проектирования станций и сетей и т. п. (работы C. F. Wagner'a, E. J. Burnham'a, C. J. Feschheimer'a, W. M. Nap'a). В результате повышенного интереса к неустановившимся режимам, представляющим наибольшие трудности в отношении количественного учета, теория синхронных машин за последнее время достигла уровня, позволяющего вычислять протекание переходных процессов с точностью, практически равной 100%.

Однако, все современные достижения получили отражение, главным образом, в периодической литературе. Книг, удовлетворяющих современному состоянию теории синхронных машин и в то же время способных служить учебниками, в настоящее время в технической литературе как в русской, так и в иностранной нет. Между тем, потребность в книге по синхронным машинам, касающейся вопросов работы их в электрических системах, чувствуется давно.

Настоящая книга имеет целью заполнение указанного пробела. Однако, принимая во внимание полное отсутствие в настоящее время книг по синхронным машинам и учитывая задание, полученное автором от кафедры электрических машин Военной электротехнической академии РККА им. т. Буденного (ВЭТА), посвятить целиком книгу вопросам работы синхронных машин в сложных системах было нецелесообразно. Автору было предложено составить учебник по синхронным машинам для слушателей ВЭТА. Поэтому необходимо было в книге дать и общие вопросы теории (обмотки, э. д. с., реакция якоря), вместе с тем некоторые вопросы специального характера пришлось опустить. Первоначально автору было предложено составить учебник, строго соответствующий числу часов, отведенных в учебном плане на синхронные машины. Уже в процессе работы над настоящей книгой автор, учитывая приведенные выше соображения, расширил несколько задачу с тем, чтобы книга могла служить пособием для инженеров, специализировавшихся в области эксплуатации или проек-

тирования электрических установок, содержащих синхронные машины. Таким образом, настоящая книга является учебником по общему курсу синхронных машин, но все вопросы освещаются в ней, главным образом, с точки зрения эксплуатации машин в системах. Соответственно с этим курс охватывает только теорию нормальных синхронных машин; необходимо отметить, что теория дана в объеме, вполне достаточном и для специалистов в области динамостроения. Вопросы конструкции и расчета синхронных машин в книге почти не затронуты; эти вопросы представляют интерес только для динамостроителей и обычно изучаются в отдельных курсах. Вопросы испытания синхронных машин требуют большого объема и будут выпущены отдельной книгой другими авторами. В настоящей книге затронуты лишь некоторые вопросы испытания, главным образом, для того, чтобы лучше оттенить природу параметров, подлежащих опытному определению.

Стремлением удовлетворить одной книгой разные категории учащихся, проходящих синхронные машины в разном объеме при разном числе учебных часов, объясняется своеобразное распределение материала по отдельным параграфам. Вся книга разбита на параграфы основные и параграфы специальные (последние отмечены в тексте звездочками). Все вопросы, являющиеся несущественными для общего ознакомления с работой синхронных машин и представляющие интерес только для отдельных узких кругов специалистов, вынесены в специальные параграфы. Основные параграфы составляют вполне законченный курс, при изучении которого нет необходимости просматривать специальные, отмеченные звездочками, параграфы, которые, следовательно, можно свободно пропускать. Этим объясняется некоторое повторение материала: так, в одних параграфах рассматривается явление с чисто физической точки зрения, в следующих за ними параграфах, отмеченных звездочками, разбирается то же самое явление, но либо более углубленно, либо чисто математически. При просмотре книги можно заметить, что в основных параграфах имеются ссылки на параграфы, отмеченные звездочками. Целью этих ссылок является лишь указание, где можно найти более углубленное рассмотрение вопроса.

Спешность выпуска книги не позволила дать ряд специальных глав, представляющих несомненный интерес для многих электротехников; так, пришлось отказаться от первоначальной мысли поместить главу о магнитной цепи синхронных машин и о быстродействующих возбудителях и главу о потерях в синхронных машинах. По техническим условиям пришлось отказаться от помещения в книгу фотографий. Несомненно, книга не свободна от недостатков, и за все указания на недочеты автор будет весьма благодарен.

В заключение автор приносит глубокую благодарность проф. В. А. Толвинскому, исключительно ценными советами которого автор пользовался при составлении книги, и начальнику кафедры электрических машин ВЭТА проф. В. К. Попову, проредактировавшему рукопись, а также инж. Г. А. Аглицкому, прочитавшему книгу в рукописи и сделавшему ряд ценных указаний. Главы XI и XII, посвященные коротким замыканиям, представляют собою переработку статьи автора в журнале "Электричество" 1932 г., стр. 171 (Реактивности синхронных машин), написанной под непосредственным руководством инж. Н. Н. Щедрина; в переработанном для книги виде эти главы также были просмотрены Н. Н. Щедриным; автор выражает ему глубокую благодарность.

Ленинград.
15/VII 1933.

В. И. Иванов.

ВВЕДЕНИЕ.

1. Подразделение электрических машин переменного тока.

Все вращающиеся машины переменного тока можно разделить на два класса: 1) синхронные машины и 2) асинхронные (т. е. несинхронные) машины.¹⁾ Синхронная машина характеризуется тем, что частота тока в ней γ и скорость вращения ее n жестко связаны уравнением (§ 24):

$$\gamma = -\frac{pn}{60}; \quad (1)$$

здесь γ выражено в пер./сек., n в об./мин., p — число пар полюсов машины. Вследствие этого при постоянной частоте скорость вращения синхронной машины не может быть изменена и, наоборот, для получения постоянной частоты скорость вращения должна быть строго постоянной. Скорость вращения, удовлетворяющая уравнению (1), называется синхронной скоростью. В асинхронных машинах скорость вращения не имеет жесткой связи с частотой, вследствие чего каждую из этих величин можно изменять независимо.

2. Синхронные машины.

Синхронной машиной называется электрическая машина переменного тока, возбуждаемая постоянным током. При возбуждении постоянным током частота получаемого переменного тока оказывается жестко связанной со скоростью вращения машины (§ 24). При изменении скорости вращения одновременно изменяется в той же степени и частота, откуда и происходит название этих машин (синхронное — греческое *συν/ρόνως* — одновременное). Несколько синхронных машин с одинаковым числом полюсов, включенных на одну и ту же сеть, должны иметь строго одинаковую (синхронную) скорость вращения; машины с разным числом полюсов имеют скорости вращения, относящиеся обратно пропорционально числу полюсов.²⁾ Синхронная машина, как и всякая другая электрическая машина, обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Вышеприведенное определение синхронной машины охватывает все обычные типы синхронных машин, но необходимо иметь в виду, что существуют синхронные машины, не имеющие возбуждения постоянным током (реактивные синхронные машины).

¹⁾ Асинхронные машины делят на индукционные и коллекторные. У нас обычно асинхронной машиной называют индукционную.

²⁾ Некоторые типы асинхронных двигателей (индукционные двигатели двойного питания) работают при синхронной скорости: хотя они возбуждаются переменным током, их по режиму работы следует относить к классу синхронных машин.

Иногда синхронные генераторы называют а л ь т е р н а т о р а м и (от французского слова *alternatif* — переменный). Однако, термин альтернатор охватывает как синхронные, так и асинхронные генераторы, поэтому во избежание недоразумений необходимо прибавлять слово „синхронный“.

3. Области применения синхронных машин.

Наибольшее распространение синхронная машина получила в качестве генератора переменного тока; для получения переменного тока в настоящее время применяются почти исключительно синхронные машины. Если принять во внимание, что почти все линии передачи и распределительные сети работают на переменном токе, то становится ясной исключительная роль синхронной машины как источника электрической энергии. Сети постоянного тока в настоящее время имеют лишь местное значение. Однако, постоянный ток имеет целый ряд преимуществ как для передачи энергии на большие расстояния, так и для питания двигательной нагрузки; малое распространение сетей постоянного тока объясняется отсутствием экономичного и практически надежного трансформатора постоянного тока и невозможностью генерировать постоянный ток высокого напряжения. В последнее время в связи с большими успехами в области техники электронных и ионных приборов явилась возможность трансформировать переменный ток в постоянный или обратно при любом напряжении и частоте и трансформировать постоянный ток одного напряжения в постоянный ток другого напряжения. Поэтому в будущем, возможно, первенствующее значение для передачи энергии и для питания двигателей займет постоянный ток. Несмотря на это, в качестве генераторов будут иметь значение и синхронные машины, так как в системах передачи постоянным током мыслится генерировать переменный ток синхронными машинами с последующим преобразованием в постоянный ток высокого напряжения помощью электронных или ионных приборов.¹⁾

В качестве двигателя синхронная машина до последнего времени имела значительно меньшее распространение, что объясняется, главным образом: 1) невозможностью регулировать скорость вращения, 2) недостаточной перегрузочной способностью при резких толчках нагрузки, 3) некоторой сложностью пуска в ход, требующей обязательной синхронизации. Второй и третий недостатки в настоящее время можно считать преодоленными, поэтому во всех случаях, где не требуется регулирования скорости, синхронные двигатели начинают входить в практику. Наибольшее распространение в настоящее время синхронные двигатели получили в США, в Европе они распространены меньше.

¹⁾ М. М. Ситников и А. А. Чернышев. Современное состояние передачи энергии постоянным током и перспективы дальнейшего развития. Сборник „Вопросы электропередачи больших мощностей на большие расстояния“ М.-Лгр., 1932. См. также „Электричество“, 1931, стр. 614.

ГЛАВА I.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ В ПРИМЕНЕНИИ К СИНХРОННЫМ МАШИНАМ.

4. Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея).

В проводнике, находящемся в магнитном поле и движущемся относительно магнитных линий, возникает электродвижущая сила, величину и направление которой можно определить на основании закона Фарадея. В электрических машинах проводники, в которых индуцируется э. д. с., движутся обычно перпендикулярно к направлению магнитных линий, поэтому закон Фарадея для них может быть написан в следующем виде:

$$e_x = B_x l v \cdot 10^{-8} \text{ вольт}; \quad (2)$$

здесь e_x — мгновенное значение э. д. с. в одном проводнике, B_x — индукция, т. е. число магнитных линий, проходящих на 1 см^2 в том месте, где находится проводник, l — активная, т. е. подверженная действию магнитного потока, длина проводника в см, v — скорость движения проводника относительно магнитных линий в см/сек. Таким образом, э. д. с. прямо пропорциональна скорости перерезывания магнитных линий проводником. Так как в большинстве случаев проводник, в котором индуцируется э. д. с., представляет собою неизменяющийся замкнутый контур, то в этом случае удобно пользоваться формулировкой закона Фарадея, предложенной Максвеллом:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}; \quad (3)$$

здесь Φ — полный магнитный поток, сцепляющийся с данным контуром; $\frac{d\Phi}{dt}$ представляет собою скорость изменения этого потока. Знак минус показывает, что возникающая в контуре э. д. с. имеет такое направление, при котором создаваемый ею ток стремится воспрепятствовать производимому изменению потока, сцепляющегося с контуром (§ 8). Обычно определяют направление э. д. с. по мнемоническим правилам (§ 5).

На законе Фарадея основано генераторное действие электрических машин.

5. Правило правой ладони.

Для определения направления индуцированной э. д. с. удобно пользоваться мнемоническим правилом правой ладони.¹⁾ Подставляют правую ладонь навстречу магнитным линиям (как бы под струи дождя), большой

¹⁾ E. Arnold. Die Gleichstrommaschinen. T. I, Berlin, 1906. Здесь приводим это правило в формулировке, данной В. А. Толвинским (Электрические машины постоянного тока. Ленинград, 1929).

палец, отогнутый в плоскости ладони на 90° , располагают в направлении движения проводника, тогда остальные пальцы, вытянутые в плоскости ладони, дают направление индуцированной э. д. с. (рис. 1). В синхронных машинах обычно проводник неподвижен, а магнитный поток движется вместе с полюсами. Эту картину можно мысленно заменить

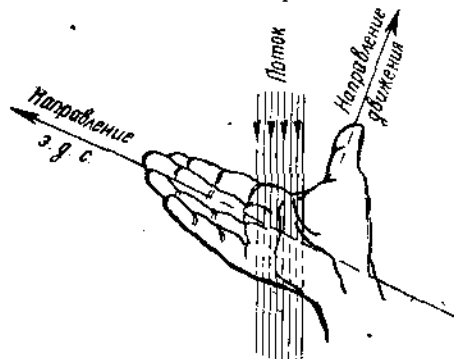


Рис. 1. Правило правой ладони.

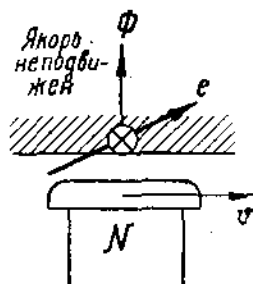


Рис. 2. Направление э. д. с. в проводнике якоря синхронной машины.

эквивалентной, в которой поток неподвижен, а движется проводник в сторону, обратную действительному движению потока; соответственно этому необходимо применять правило правой ладони, располагая большой палец в направлении относительного движения проводника, т. е. в сторону, обратную действительному движению полюсов.

Полезно запомнить следующее мнемоническое правило применительно к синхронным машинам: при вращении полюсов по часовой стрелке э. д. с., индуцированная в проводнике, имеет над Северным полюсом направление от нас (рис. 2). На чертежах направление э. д. с. отмечают крестиком — направление от нас (задний конец стрелки), точкой — к нам (передний конец стрелки).

6. Закон Био-Савара.

Находящийся в магнитном поле проводник с электрическим током испытывает механическую силу (так называемую электромагнитную силу), величину которой можно определить по закону Био-Савара. В электрических машинах обычно угол между проводником и направлением магнитных линий равен 90° , поэтому закон Био-Савара можно написать в виде:

$$f_x = B_x I l 10^{-7} \text{ дин}; \quad (4)$$

здесь B_x — индукция, т. е. число магнитных линий, приходящихся на 1 см^2 , в месте расположения проводника, I — активная, т. е. подверженная действию магнитного поля, длина проводника в см, i — ток в проводнике в амперах. Для того чтобы выразить силу f_x в кг, необходимо ввести переводный множитель $0,981 \times 10^8$:

$$f_x = \frac{1}{0,981 \times 10^8} B_x I l 10^{-7} = 1,02 B_x I l 10^{-1} \text{ кг}. \quad (4a)$$

На законе Био-Савара основано двигательное действие электрических машин.

7. Направление электромагнитной силы.

Направление электромагнитной силы можно определить по правилу левой руки или левой ладони; однако, в применении к синхронным машинам, эти правила мало удобны. Лучше всего пользоваться картиной механизма электромагнитной индукции, данной В. Ф. Миткевичем.¹⁾ При прохождении по проводнику тока вокруг проводника образуются замкнутые кольцевые магнитные линии, направление которых определяется по правилу штопора: если ввинчивать штопор с правой нарезкой в направлении тока, то направление вращения дает направление окружающих проводник магнитных линий. Эти магнитные линии взаимодействуют с линиями основного магнитного поля: с одной стороны проводника в результате наложения противоположно направленных магнитных линий поле ослабится, с другой стороны проводника одинаково направленные магнитные линии увеличат магнитное поле (рис. 3). Магнитные линии всегда стремятся сократить свою длину (как упругие растянутые нити), поэтому проводник будет испытывать от магнитных линий силу, направленную со стороны сгущения магнитных линий в сторону разрежения. Таким образом, на рис. 3 проводник будет выталкиваться влево. Так как по принципу Ньютона действие всегда равно противодействию, то такую же силу, но направленную в обратную сторону, будут испытывать магнитные линии со стороны проводника с током.

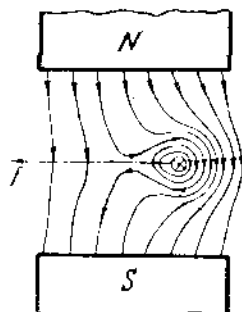


Рис. 3. Направление электромагнитной силы.

8. Закон Ленца.

В обобщенном виде закон Ленца говорит, что всякая электромагнитная система стремится сохранить неизменным связанный с ней магнитный поток. При всяком изменении внешнего магнитного потока, сцепляющегося с проводящим контуром, в последнем возникают силы как электрического, так и механического характера, стремящиеся сохранить величину магнитного потока.¹⁾ Силы электрического характера (электродвижущие силы) вызывают токи, создающие свои магнитные потоки, направленные таким образом, что результирующий поток остается неизменным. Силы механического характера (электромагнитные силы) вызывают передвижение контура таким образом, чтобы новый охватываемый им магнитный поток остался равным прежнему значению. Пользуясь законом Ленца, можно определять направление как э. д. с., так и электромагнитной силы.

На законе Ленца основан принцип обратимости работы электрических машин, т. е. возможность работы их как в качестве генератора, так и в качестве двигателя.

9. Закон магнитной цепи.

Для получения в какой-либо магнитной цепи заданной величины потока Φ необходима определенная величина магнитодвижущей силы M . Как показал Гопкинсон, эта м. д. с. связана с магнитным потоком Φ зави-

¹⁾ В. Ф. Миткевич. Физические основы электротехники. Ленинград, 1932.

симостью, формально аналогичной закону Ома для электрической цепи постоянного тока:

$$\Phi = \frac{M}{R}, \quad (5)$$

здесь R — магнитное сопротивление. Величина м. д. с. выражается формулой:

$$M = 0,4 \pi w i; \quad (6)$$

здесь w — число витков, i — сила тока в амперах; произведение wi называется ампер-витками. Так как одна и та же м. д. с. может быть получена при любом соотношении w и i , дающем требуемое произведение wi , то для последнего вводят общее обозначение $iw = AW$; тогда м. д. с. равна:

$$M = 0,4 \pi AW. \quad (6a)$$

Магнитное сопротивление равно:

$$R = \frac{L}{\mu S}; \quad (7)$$

здесь L — длина магнитной цепи в см, S — площадь сечения в см², μ — магнитная проводимость, или проницаемость. Если магнитная цепь состоит из неоднородных участков, то общее магнитное сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных участков. Таким образом, м. д. с., требуемая для создания потока Φ , равна:

$$M = \Phi R = \frac{\Phi}{S} \frac{L}{\mu} = \frac{B}{\mu} L; \quad (8)$$

здесь $B = \Phi/S$ — магнитная индукция — число магнитных линий, приходящееся на 1 см² площади сечения, перпендикулярного к магнитному потоку.

В отличие от электрической цепи, проницаемость μ при заданном сечении магнитной цепи зависит не только от материала, из которого выполнена магнитная цепь, но и от величины магнитного потока:

$$\mu = f(B).$$

Следовательно, м. д. с. может быть найдена только в том случае, если известна для материала, из которого состоит магнитная цепь, зависимость $\mu = f(B)$. Эта зависимость может быть определена опытным путем. Практически пользуются не этой зависимостью, а так называемыми кривыми намагничивания, дающими связь между магнитной индукцией B и намагничивающей силой H :

$$B = f(H).$$

Так как $H = B/\mu$, то формулу (8) можно написать в виде:

$$M = \frac{B}{\mu} L = HL. \quad (9)$$

Задавшись индукцией B , находим по ней из кривой намагничивания для данного материала соответствующее значение H , а тогда по формуле (9) определяем и M . Так как практический интерес представляет не м. д. с. M , а ампер-витки AW , то по формулам (6a) и (9) находим:

$$AW = \frac{M}{0,4 \pi} = \frac{1}{0,4 \pi} HL \approx 0,8 HL. \quad (10)$$

Полагая длину пути магнитного потока L равной 1 см, получаем, что величина $0,8H$ представляет собою ампер-витки, необходимые для проведения заданного потока на пути, длиной 1 см:

$$0,8H = aw; \quad (11)$$

тогда, получаем

$$AW = awL. \quad (12)$$

При расчете обычно пользуются не кривой $B = f(H)$, а кривой $B = f(0,8H) = f(aw)$.

Если в какой-либо магнитной цепи, выполненной из железа, действуют несколько м. д. с., то величина результирующего магнитного потока, создаваемого этими м. д. с., не равна сумме потоков, вызываемых каждой м. д. с. в отдельности, а должна подсчитываться по результирующей м. д. с. При действии каждой м. д. с. в отдельности имеем значение индукции, не равное индукции результирующего потока, а следовательно, имеем и магнитное сопротивление, отличающееся от сопротивления для результирующего потока; поэтому сумма потоков, вызванных каждой м. д. с. в отдельности, не равна результирующему потоку.

10. Свойства синусоиды.

Мгновенное значение синусоидально изменяющейся величины равно:

$$a = A_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t; \quad (13)$$

здесь $A_{\max}$ — максимальное значение, или амплитуда, T — период изменения синусоидальной величины, выражаемый в секундах. Число периодов в секунду, или частота, равно:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad (14)$$

следовательно:

$$a = A_{\max} \sin 2\pi \nu t = A_{\max} \sin \omega t; \quad (13a)$$

здесь $\omega = 2\pi \nu$ — угловая частота.

Действующее значение синусоидальной величины представляет собою среднее квадратичное за период:

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2 dt} = \frac{A_{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (15)$$

Среднее значение синусоиды за период равно нулю. Среднее значение синусоиды за половину периода от 0 до $T/2$ равно:

$$A_{\text{med}} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} a dt = \frac{2}{\pi} A_{\max}. \quad (16)$$

11. Построение синусоиды.

Синусоиду легко построить по семи точкам. Подставляя в формулу (13) значения t , отличающиеся друг от друга на $1/12 T$, получаем:

$t = 0$	$\frac{1}{12} T$	$\frac{2}{12} T$	$\frac{1}{4} T$	$\frac{4}{12} T$	$\frac{5}{12} T$	$\frac{1}{2} T$
$a = 0$	$0,5A_{\max}$	$0,87A_{\max}$	$A_{\max}$	$0,87A_{\max}$	$0,5A_{\max}$	0

(Величина 0,87 представляет собою $\sin \pi/3 = \sqrt{3}/2$). Разбивая половину периода $T/2$ на шесть частей, откладываем приведенные выше значения α и получаем кривую (рис. 4).

12. Векторная диаграмма.

Синусоидально изменяющиеся величины удобно изображать в виде векторов. Возьмем некоторый отрезок $\overline{OB} = A_{\max}$ и будем вращать его вокруг точки O с равномерной угловой скоростью $\omega = 2\pi/T$ в сторону, обратную движению часовой стрелки (рис. 5). Проекция вектора $\overline{OB}$ на ось ординат равна:

$$\overline{Ob} = \overline{OB} \sin \alpha = A_{\max} \sin \omega t,$$

так как угол α , на который повернулся вектор $\overline{OB}$ за время t , равен $\alpha = \omega t$. Следовательно, проекция вектора $\overline{OB}$ на ось ординат дает мгновенное значение синусоидальной величины. Повороту вектора $\overline{OB}$ на

угол 2π , или 360° , соответствует один период изменения величины α . Связь между векторной диаграммой и синусоидальной кривой видна из рис. 5. Очевидно, на оси абсцисс кривой можно откладывать не только время t , но и угол поворота вектора α , выраженный в радианах или в градусах.

Векторные диаграммы служат обычно не для определения мгновенных значений синусоидальных величин, а для определения взаимных положений различных синусоидальных величин относительно

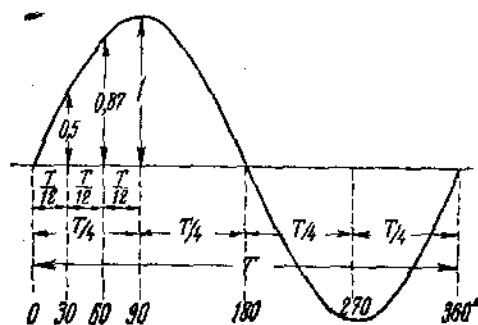


Рис. 4. Построение синусоиды.

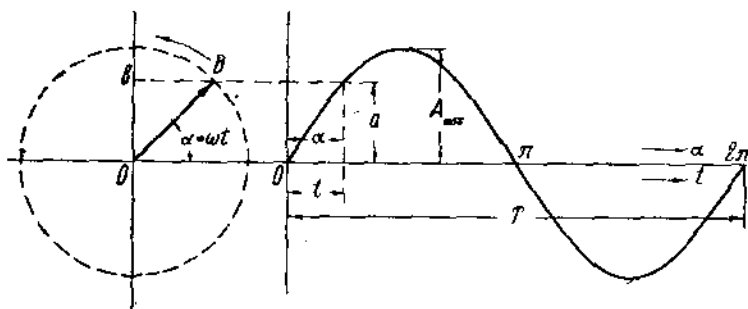


Рис. 5. Векторное изображение синусоидальной величины.

друг друга (§ 13). Так как в электротехнике большую часть приходится оперировать с действующими значениями величин, то длину вектора берут равной действующему значению синусоиды:

$$\overline{OB} = A_{\max} / \sqrt{2} = A.$$

13. Сдвиг фаз синусоидальных величин.

Если две синусоидальные величины имеют одинаковый период, но проходят через нуль не одновременно (рис. 6, а), то говорят, что эти величины сдвинуты по фазе. На рис. 6 для общности взяты неодинаковые амплитуды. Для синусоид на рис. 6, а имеем выражения:

$$a = \sqrt{2} A \sin \omega t,$$

$$b = \sqrt{2} B \sin \omega(t - t_1);$$

здесь A и B — действующие значения синусоид. Величина b достигает максимума позже, чем величина a на время t_1 , поэтому говорят, что b отстает от a на время t_1 . Обозначая постоянную величину ωt_1 через β_1 , получаем

$$b = \sqrt{2} B \sin(\omega t - \beta_1).$$

β_1 представляет собою угол, на который вектор поворачивается за время t_1 , и носит название угла сдвига фаз. Очевидно, что этот угол представляет собою угол расхождения векторов A и B в векторной диаграмме (рис. 6, а): вектор B отстает от вектора A на угол β_1 .

Если величина b опережает величину a , т. е. b достигает максимального значения раньше, чем a (рис. 6, б), то имеем:

$$a = \sqrt{2} A \sin \omega t,$$

$$b = \sqrt{2} B \sin \omega(t + t_2) = \sqrt{2} B \sin(\omega t + \beta_2).$$

В векторной диаграмме векторы A и B вращаются синхронно, т. е. одинаково во времени, так как период изменения обеих величин одинаков; поэтому угловой сдвиг фаз между ними остается при вращении их постоянным.

На векторной диаграмме положительными углами будем считать углы, откладываемые в сторону вращения векторов (против часовой стрелки), отрицательными — откладываемые против вращения векторов. Поэтому, если вектор B отстает от вектора A на угол β_1 (рис. 6, а), то угол β_1 необходимо считать отрицательным и, следовательно, брать с минусом: $b = \sqrt{2} B \sin(\omega t - \beta_1)$. Углы опережения следует брать с плюсом: так для рис. 6, б имеем $b = \sqrt{2} B \sin(\omega t + \beta_2)$. Из рис. 6 видно, что при этом получается неувязка с синусоидой: отрицательные углы приходится откладывать в положительную сторону оси абсцисс, положительные —

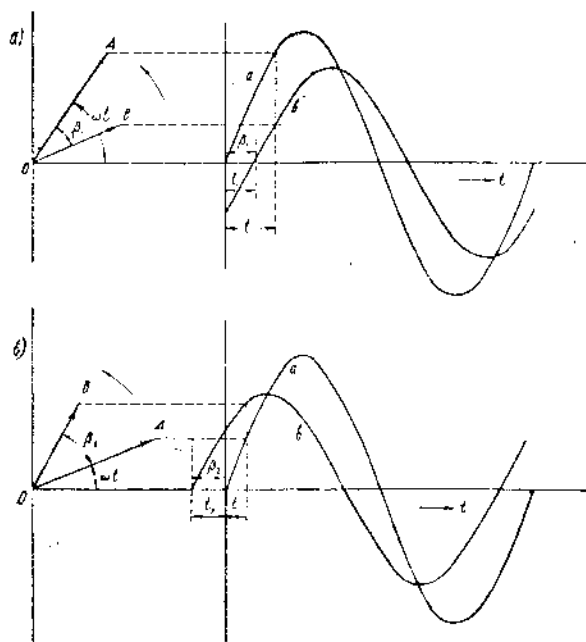


Рис. 6. Векторные диаграммы для случая отставания (а) и опережения (б) вектора B .

в отрицательную. ¹⁾ Поскольку обычно приходится пользоваться векторными диаграммами, в дальнейшем всегда будем приписывать углам знаки, соответствующие векторной диаграмме, т. е. положительные углы откладывать в сторону вращения векторов, а отрицательные — против.

14. Сумма синусоидальных величин.

Из тригонометрии известно, что сумма или разность нескольких синусоидальных величин с одинаковым периодом также является синусоидой. Результирующую синусоиду легко найти, пользуясь векторной диаграммой. Для этого необходимо произвести геометрическое суммирование векторов. Амплитуда результирующей синусоиды равна геометрической сумме амплитуд отдельных синусоид; угол между осью абсцисс

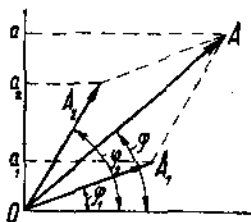


Рис. 7. Геометрическое сложение двух синусоидальных величин.

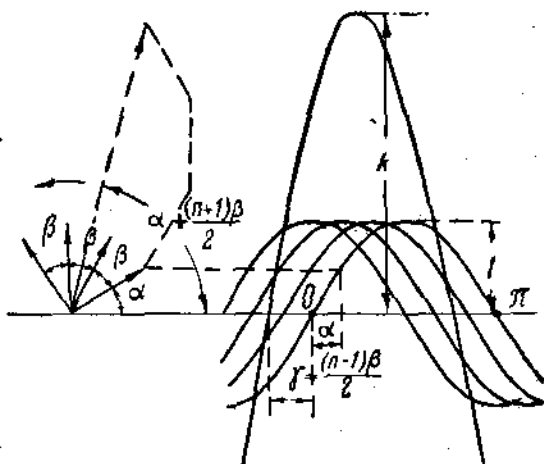


Рис. 8. Геометрическое сложение нескольких синусоид.

и результирующим вектором дает фазу результирующей синусоиды. На рис. 7 представлена сумма двух синусоидальных величин. Сумма нескольких (n) синусоид с одинаковой амплитудой (для простоты берем $A_{\max} = 1$), сдвинутых по фазе друг от друга на одинаковый угол β , равна:

$$\begin{aligned} \sin \alpha + \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + 2\beta) + \dots + \sin[\alpha + (n-1)\beta] = \\ = \frac{\sin n\beta/2}{\sin \beta/2} \sin \left[\alpha + \frac{(n-1)\beta}{2} \right] = k \sin(\alpha + \gamma); \end{aligned} \quad (17)$$

здесь $\alpha = \omega t$; $k = \frac{\sin n\beta/2}{\sin \beta/2}$; $\gamma = \frac{(n-1)\beta}{2}$. Этот результат изображен на рис. 8 в виде кривой и в виде векторной диаграммы.

Очевидно, что любую синусоидальную величину можно представить в виде суммы нескольких составляющих, имеющих тот же период.

15. Разложение функций в ряд Фурье.

Всякую функцию, удовлетворяющую условиям Дирихле ²⁾ (к таким функциям относятся почти все функции, имеющие физический смысл), можно разложить в тригонометрический ряд, называемый рядом Фурье.

¹⁾ По вопросу о знаке угла β , см. В. Ф. Миткевич. Теория переменных токов, Ленинград, 1931 (литогр.).

²⁾ В. И. Смирнов. Курс высшей математики для техников и физиков. Т. II, М.-Лгр., 1931.

Каждый из членов ряда (называемый гармоникой) представляет собою синусоидальную величину, вследствие чего формулами, выведенными для синусоидальных величин, можно пользоваться и при изучении периодических функций несинусоидальных, если разложить последние в ряд Фурье и оперировать с каждой гармоникой в отдельности. Разложение кривой, имеющей вид прямоугольника (рис. 9), имеет вид:

$$f(x) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{X} x + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{2\pi}{X} x + \frac{1}{5} \sin 5 \frac{2\pi}{X} x + \dots \right); \quad (18)$$

здесь X — период изменения функции, x — переменная координата.

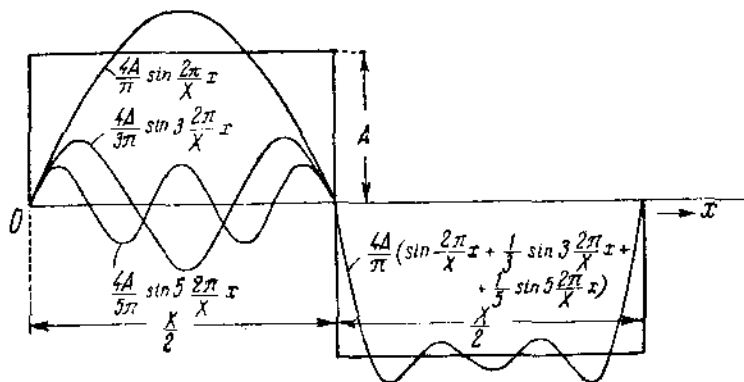


Рис. 9. Разложение прямоугольника в ряд Фурье.

Гармоника, у которой период X равен периоду данной функции, называется основной или первой гармоникой. Гармоники, у которых период меньше или больше периода основной гармоники в нечетное число раз, называются нечетными, соответственно высшими или низшими; остальные гармоники называются четными. При разложении в ряд Фурье кривой, симметричной относительно оси абсцисс (как, например, кривая рис. 9) получаем только нечетные гармоники. Симметричной называется такая кривая, в которой, сдвинув одну полуволну на половину периода, получаем зеркальное изображение другой полуволны относительно оси абсцисс.

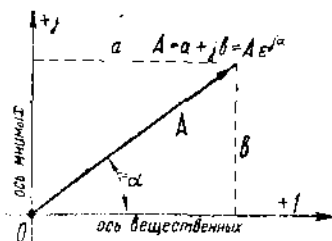


Рис. 10. Изображение вектора в виде комплексного числа.

16. Символический метод.

Над векторами можно производить все арифметические действия, что обычно выполняют графически по правилам векторного исчисления. В некоторых случаях удобнее производить вычисления аналитически. Для этой цели векторы изображают в виде комплексных величин. Любой вектор (рис. 10) символически можно изобразить комплексным числом в одном из следующих видов:

$$A = a + jb = A e^{j\alpha} = A (\cos \alpha + j \sin \alpha); \quad (19)$$

здесь $j = \sqrt{-1}$; e — основание натуральных логарифмов. Над комплексными выражениями можно производить все вычисления аналитически по правилам алгебры. В виде комплекса $A = a + jb$ можно представить геометрическую сумму двух любых, перпендикулярных друг к другу

величин. При пользовании символическим методом не векторные величины, как, например, полное сопротивление электрической цепи z , выражают также в виде комплекса:

$$z = r + jx; \quad (20)$$

при этом необходимо иметь в виду, что z не является вектором.

17. Фазные и линейные значения напряжения и тока в многофазных системах.

Обозначим фазные величины напряжения и тока соответственно через U и I , линейные — через U_l и I_l . При соединении системы звездой имеем

$$U_l = 2 \sin \frac{\pi}{m} U; \quad I_l = I; \quad (21)$$

здесь m — число фаз; для трехфазной системы ($m = 3$) имеем

$$U_l = \sqrt{3} U; \quad I_l = I. \quad (21a)$$

При соединении системы многоугольником:

$$U_l = U; \quad I_l = 2 \sin \frac{\pi}{m} I; \quad (22)$$

при $m = 3$ имеем

$$U_l = U; \quad I_l = \sqrt{3} I. \quad (22a)$$

18. Мощность многофазной системы.

Мощность многофазной системы равна сумме мощностей отдельных фаз; если нагрузка в каждой фазе одинакова, то мощность равна:

$$P = mUI \cos \varphi; \quad (23)$$

здесь U и I — фазные значения напряжения и силы тока, φ — угол сдвига фаз между током и напряжением.

В трехфазной системе, выражая U и I через линейные значения U_l и I_l , получим при любом соединении (звездой или многоугольником) формулу:

$$P = \frac{3}{\sqrt{3}} U_l I_l \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi. \quad (24)$$

19. Действующее значение и мощность при несинусоидальном изменении величин.

Разлагая функцию в ряд Фурье, получаем действующее значение функции:

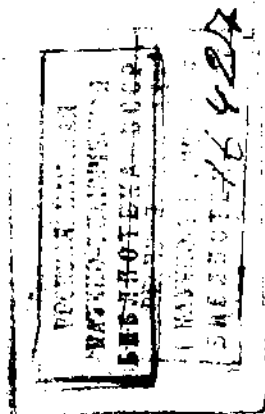
$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A_{1\max}^2 + A_{3\max}^2 + A_{5\max}^2 + \dots} = \sqrt{A_1^2 + A_3^2 + A_5^2 + \dots}; \quad (25)$$

здесь $A_{1\max}, A_{3\max}, \dots$ — амплитуды отдельных гармоник, $A_1, A_3, \dots$ — действующие значения отдельных гармоник.

Мощность равна сумме мощностей отдельных гармоник:

$$P = m (U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + U_5 I_5 \cos \varphi_5 + \dots); \quad (26)$$

здесь U_x, I_x, φ_x — фазные напряжения, сила тока и угол сдвига фаз гармоник с номером x ; m — число фаз.



Д Е П

ГЛАВА II.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН.

20. Принцип действия синхронной машины.

При движении проводника относительно магнитных линий в нем индуцируется э. д. с., величину которой можно определить по закону Фарадея (§ 4), а направление — по правилу правой руки (§ 5). Направление э. д. с. зависит от направления, в котором движется проводник относительно магнитных линий. При периодическом изменении направления движения будет периодически изменяться направление э. д. с.; получим, таким образом, переменную э. д. с., которая в замкнутом проводящем контуре создаст переменный электрический ток. Периодическое изменение направления движения проводника проще всего можно получить путем вращения проводника в неподвижном магнитном поле, например, в поле постоянного магнита (рис. 11). Если магнитное поле однородно (напряжение магнитного поля в каждой точке одинаково), то при равномерной окружной скорости в проводнике индуцируется э. д. с., изменяющаяся по закону синуса. Величина э. д. с. пропорциональна числу перерезываемых в секунду магнитных линий. Если индукция, т. е. число магнитных линий, приходящихся на 1 см^2 поверхности, перпендикулярной магнитным линиям, равна B , то величина э. д. с. при движении проводника перпендикулярно к магнитным линиям равна (§ 4):

$$e = B l v 10^{-8} \text{ вольт;} \quad (2a)$$

здесь l — активная длина проводника в см , v — скорость движения проводника относительно магнитных линий в см/сек . Если проводник движется не в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, а по цилиндрической поверхности (вращается вокруг оси O , рис. 12), то число перерезываемых им магнитных линий неодинаково в разные моменты. Если число магнитных линий, приходящихся на 1 см^2 поверхности, перпендикулярной магнитным линиям, равно B , то на 1 см^2 поверхности цилиндра приходится $B \sin \alpha$ магнитных линий, где α — угол между диаметром, перпендикулярным к магнитным линиям, и радиусом, проведенным к центру

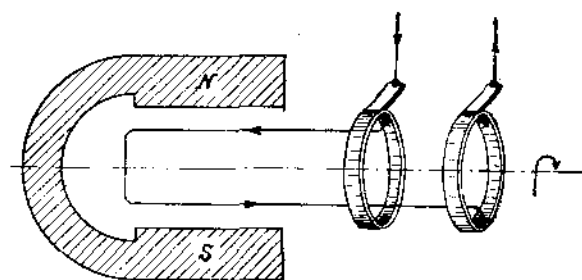


Рис. 11. Получение переменной э. д. с.

рассматриваемой площадки на поверхности цилиндра (рис. 12). Следовательно, э. д. с. проводника при вращении его изменяется по закону:

$$e = Blv \sin \alpha \cdot 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (27)$$

Максимальное значение э. д. с. получается, когда проводник движется перпендикулярно к магнитным линиям, т. е. когда $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$. Обозначая эту э. д. с. через $E_{\max} = Blv \cdot 10^{-8}$, получим

$$e = E_{\max} \sin \alpha. \quad (28)$$

Положение проводника, определяемое углом α , изменяется с течением времени, следовательно, э. д. с. представляет собою функцию времени. Если угловая скорость вращения проводника постоянна и равна ω , то угол α равен:

$$\alpha = \omega t;$$

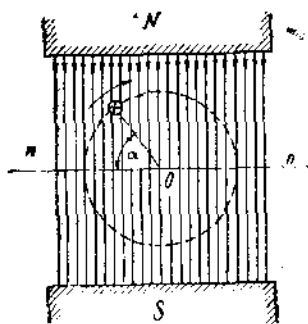


Рис. 12. Получение синусоидальной э. д. с.

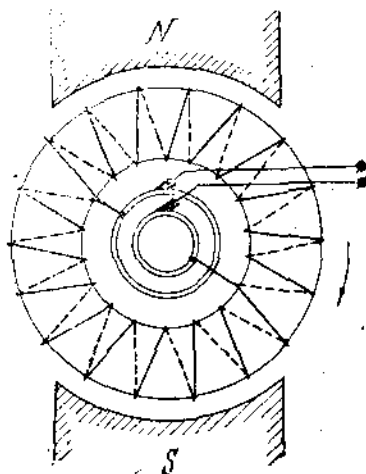


Рис. 13. Синхронная машина с внешними неподвижными полюсами.

здесь t — время, отсчитываемое от начального положения, когда проводник лежит на диаметре aa' , перпендикулярном к направлению магнитных линий. Таким образом:

$$e = E_{\max} \sin \omega t. \quad (28a)$$

Постоянный магнит обычно дает незначительный магнитный поток, вследствие чего нельзя получить большую э. д. с. Поэтому в синхронных машинах применяют электромагнит, возбуждаемый постоянным током (рис. 13). Чтобы увеличить проводимость для магнитного потока, вращающийся проводник укладывают на цилиндре из железа, вследствие чего магнитный поток по всему пути, за исключением воздушного зазора между вращающейся и неподвижной частями машины, проходит по железу. Для увеличения получаемой э. д. с. соединяют несколько проводников последовательно, образуя так называемую обмотку. Таким образом, синхронная машина состоит из индуктирующей части, создающей магнитный поток (постоянный магнит или электромагниты, возбуждаемые постоянным током, так называемый индуктор или полюса), и индуктируемой части (обмотка), в которой индуктируется э. д. с.

Магнитный поток в воздушном зазоре между неподвижной и вращающейся частями машины (в так называемом междужелезном пространстве) распределен обычно неравномерно, вследствие чего э. д. с. изменяется не по синусоидальному закону. Если обозначить через B_x индук-

цию в некоторой точке на цилиндрической поверхности, по которой движется проводник, то при нахождении проводника в этой точке э. д. с. равна:

$$e = B_x l v 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Так как B_x является функцией угла α , а угол α есть периодическая функция времени, то э. д. с. также является периодической функцией времени.

Очевидно, что число периодов изменения э. д. с. равно числу периодов изменения магнитной индукции B_x . Дуга окружности, соответствующая одному полюсу, называется полюсным делением. Один период э. д. с. соответствует прохождению проводником расстояния, равного двум полюсным делениям.

21. Различные формы конструкции синхронных машин.

Так как для получения э. д. с. необходимо лишь относительное движение проводников (обмотки) и магнитных линий, то возможны два решения: 1) неподвижный магнитный поток и вращающиеся проводники, 2) вращающийся магнитный поток и неподвижные проводники.

Первоначально синхронные машины строили по первому типу (рис. 13). Для отвода тока от вращающихся проводников к внешней неподвижной цепи концы обмотки, образуемой проводниками, присоединены к проводящим кольцам, укрепленным на валу машины (так называемые контактные или собирательные кольца); по кольцам скользят неподвижные щетки, соединенные с внешней сетью. Таким образом, между неподвижной сетью и вращающейся обмоткой получается соединение через контакт щеток и колец. При переходе к большим мощностям и высоким напряжениям такая конструкция синхронной машины оказалась нерациональной. При большой мощности, обуславливающей большую силу тока (в современных больших машинах сила тока достигает $3000 \div 4000$ А при напряжении $11\,000 \div 21\,000$ В), площадь контакта щеток должна быть очень большой, что ведет к большому числу щеток и большим размерам колец; вследствие износа щеток требовались бы большие расходы на постоянную замену их. При высоких напряжениях ($11\,000 \div 21\,000$ В) надежная изоляция вращающейся обмотки от железа и изоляция колец и щеток конструктивно выполнимы с большим трудом. Надзор за щетками, являющимися самым слабым местом конструкции, при высоком напряжении затруднен, а смена и осмотр щеток при работе невозможны.

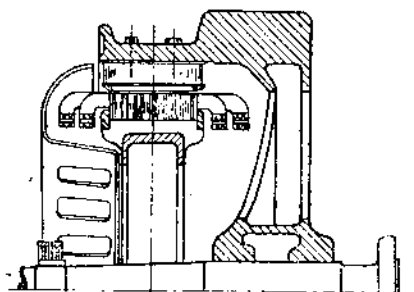


Рис. 14. Синхронная машина с внешними вращающимися полюсами.

При выполнении машины по второму типу — с неподвижной обмоткой — все эти недостатки отпадают, так как внешнюю сеть можно присоединить к неподвижной обмотке наглухо. Выполнение неподвижной обмотки на большую силу тока и на высокое напряжение значительно проще. Правда, и в этой конструкции нельзя совершенно избавиться от колец и щеток, так как для возбуждения вращающихся электромагнитов (индуктора) необходимо подводить постоянный ток через щетки, но ввиду того, что

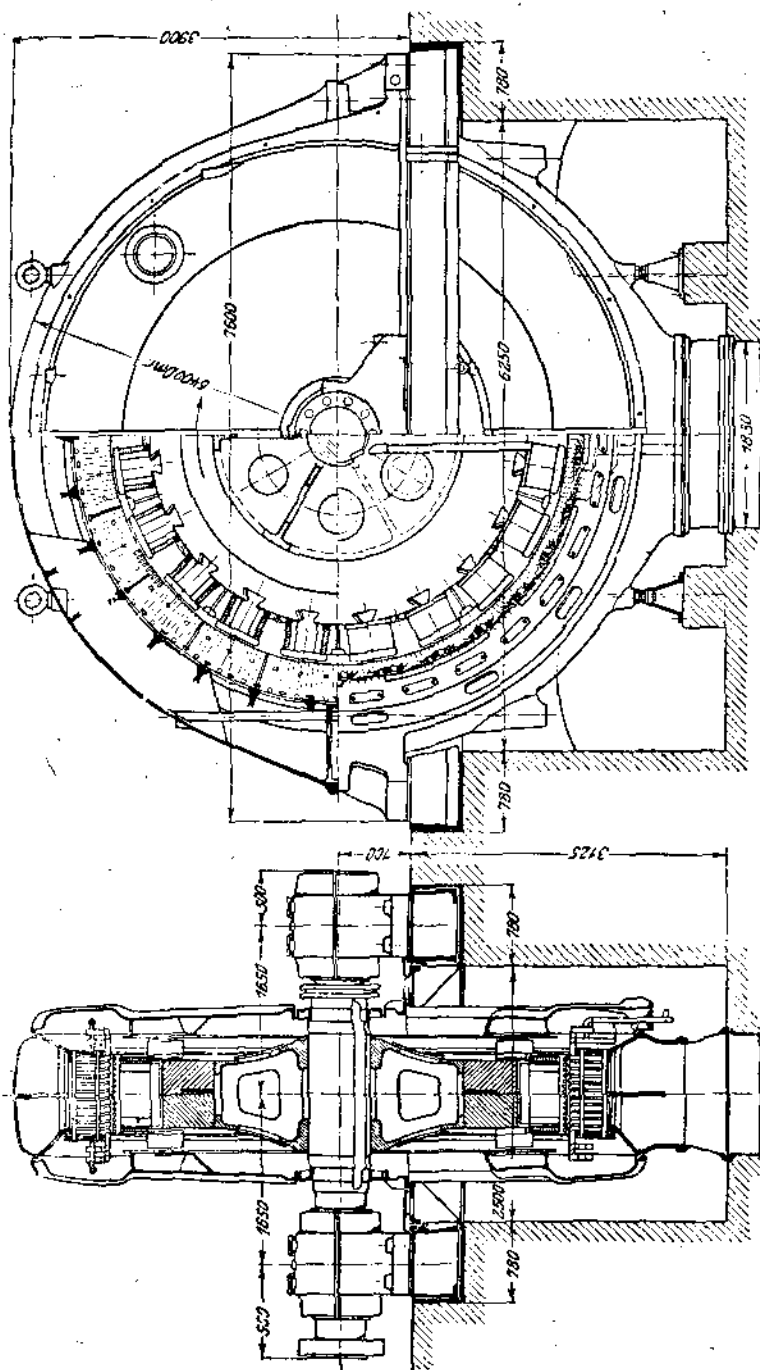


Рис. 15. Синхронная машина с внутренними вращающимися полосами (машина с ядро выраженными полосами).
гидрогенератор 12000 kVA, 300 об./мин. (SSW).

сила тока возбуждения значительно меньше силы переменного (рабочего) тока, а напряжение обычно не превосходит $110 \div 220$ В, конструкция колец и щеток получается простой и надежной. Поэтому в настоящее время применяют синхронные машины исключительно с вращающимся индуктором и неподвижной обмоткой. При этом в старых конструкциях иногда располагали обмотку внутри, а вращающиеся полюса снаружи (рис. 14), т. е. применяли нормальную конструкцию машины постоянного тока (без коммутатора), в которой заstopоривали якорь и пачипали вращать полюса. Конструкция с внешними вращающимися полюсами неудобна и громоздка, поэтому в настоящее время от нее отказались и перешли к конструкции с внутренними вращающимися полюсами и внешней неподвижной обмоткой (рис. 15). Последняя конструкция является нормальной для всех применяемых ныне синхронных машин (см. также главу XIV).

22. Части синхронной машины.

Часть машины, создающая магнитный поток, называется магнитной системой, полюсами или индуктором. Часть машины, в которой индуцируется э. д. с., называется якорем или арматурой. Обмотка, расположенная на полюсах, по которой протекает востоянный ток, называется обмоткой возбуждения. Обмотка, в которой индуцируется э. д. с., называется обмоткой якоря. Неподвижная часть машины называется статором, вращающаяся часть называется ротором. В современной конструкции синхронных машин (§ 21) статором является якорь, ротором — полюса.

23. Возбудитель.

Для возбуждения синхронной машины необходим постоянный ток. Этот ток можно получить от любого источника постоянного тока — от аккумуляторов или от генератора постоянного тока. Для обеспечения независимости от постороннего источника обычно каждая синхронная машина имеет сидящую с ней на одном валу машину постоянного тока — так называемый возбудитель, назначение которого исключительно давать ток возбуждения. В больших генераторах для увеличения надежности всегда имеется возможность переключить обмотку возбуждения с возбудителя на аккумуляторную батарею.

24. Связь между частотой и скоростью вращения.

В двухполюсной машине одному обороту ротора соответствует один период изменения э. д. с. (§ 20). В многополюсной машине одному периоду э. д. с. соответствует поворот ротора на двойное полюсное деление, а полному обороту ротора соответствует p периодов э. д. с. Отсюда частота, т. е. число периодов в секунду, равна:

$$\gamma = \frac{pn}{60}; \quad (29)$$

здесь p — число пар полюсов, n — число оборотов в минуту, $n/60$ — число оборотов в секунду.

25. Применяемые числа оборотов в минуту.

Стандартной частотой в СССР и в других странах Европы является 50 пер. сек. Для получения такой частоты требуются вполне определенные скорости вращения синхронных машин, которые можно найти из уравнения (29):

$$n = \frac{60 \gamma}{p} = \frac{60 \times 50}{p} = \frac{3000}{p}. \quad (30)$$

В зависимости от числа пар полюсов p получаем следующие синхронные скорости вращения:

$p =$	1	2	3	4	5	6	8	10	12
$n =$	3000	1500	1000	750	600	500	375	300	250 об./мин.

Нечетные числа пар полюсов избегают, так как они ведут к усложнению обмотки якоря (§ 43). Исключение делают лишь для $p = 3$ и 5, так как без этих значений p получаются слишком большие скачки скорости.

26. Синхронные машины с явно выраженными полюсами.

При больших числах пар полюсов ($p \geq 3$) полюса на роторе синхронной машины имеют такую же форму, как и в машинах постоянного тока (рис. 15). Машина такой конструкции получила название машины с явно выраженными полюсами. Полюса при вращении подвержены действию центробежной силы, стремящейся оторвать их от обода ротора, поэтому они должны быть тщательно укреплены на роторе. Крепление производится с помощью ласточкиных хвостов или с помощью болтов (рис. 304—305). Обмотка возбуждения состоит из катушек, надетых на полюса и удерживаемых полюсными наконечниками, а при больших окружных скоростях и специальными держателями. В качестве первичных двигателей для генераторов с явно выраженными полюсами служат гидравлические турбины, двигатели Дизеля, газовые двигатели или паровые машины, так как скорости вращения этих двигателей невелики, а потому требуют вы-

полнения синхронной машины с числом пар полюсов $p > 3$. По той же причине синхронные двигатели обычно также выполняются с явно выраженными полюсами (см. также §§ 222—224).

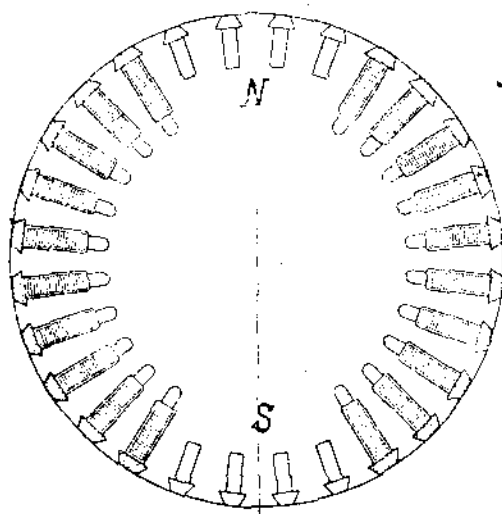


Рис. 16. Ротор с явно выраженными полюсами; $p = 1$.

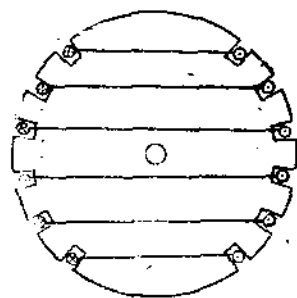


Рис. 17. Ротор с неявно выраженными полюсами; $p = 1$.

27. Синхронные машины с неявно выраженными полюсами.

Машины, имеющие $p = 1$ или 2, должны соответственно делать 3000 и 1500 об./мин. Центробежная сила, которая пропорциональна квадрату окружной скорости, при большом диаметре ротора получается настолько значительной, что явно выраженные полюса и обмотку возбуждения невозможно надежно укрепить на роторе. Для увеличения механической прочности в машинах с $p = 1$ или 2 ротор выполняют в виде сплошного

цилиндра с профрезованными на поверхности впадинами, в которых укладывается обмотка возбуждения (рис. 16). На рис. 17 схематически указано соединение витков обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения может быть очень прочно закреплена во впадинах металлическими клиньями, поэтому такая конструкция получается очень надежной в механическом отношении. Машина такой конструкции называется машиной с неявно

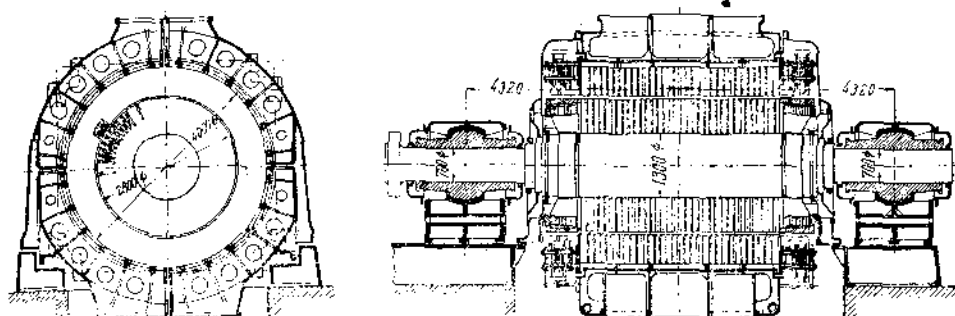


Рис. 18. Синхронная машина с цилиндрическим ротором.

выраженными полюсами или машиной с цилиндрическим ротором (рис. 18). Синхронные генераторы с цилиндрическим ротором приводятся во вращение паровыми турбинами, так как остальные первичные двигатели не могут дать таких высоких скоростей вращения, которые требуются при $p = 1$ и 2. Вследствие этого синхронные машины с цилиндрическим ротором называются турбогенераторами, или турбоальтернаторами (см. также § 221).

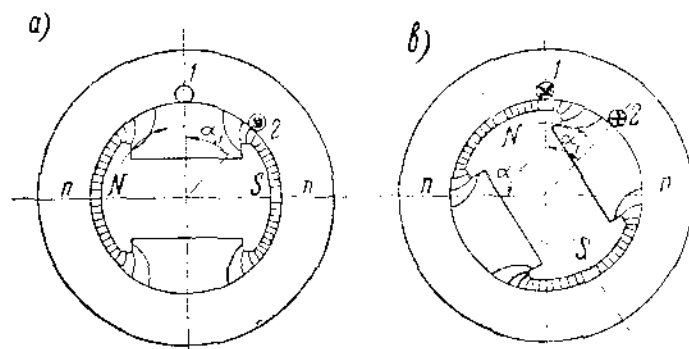


Рис. 19. Пояснение связи между положением ротора и э. д. с. в проводнике.

28. Связь между положением ротора относительно проводника и величиной электродвижущей силы в проводнике.

Будем считать положительным направление э. д. с. в проводнике от нас. Рассмотрим двухполюсную машину, в которой э. д. с. изменяется по синусоидальному закону. При положении полюсов по линии nn (рис. 19,а) проводник 1 не пересекает магнитных линий, вследствие чего мгновенное значение э. д. с. в нем равно нулю. Изображая э. д. с. проводника в виде вектора, получим для данного положения ротора отрезок $\overline{OA}$ (рис. 20). При повороте ротора по часовой стрелке на угол α (рис. 19,б)

мгновенное значение э. д. с. в проводнике 1 равно $e = E_{\max} \sin \alpha = E_{\max} \sin \omega t$ (§ 20), чему соответствует вектор $\vec{OA}_1$, сдвинутый на угол α от вектора $\vec{OA}$ в сторону, противоположную вращению часовой стрелки. Таким образом, в двухполюсной машине при вращении ротора по часовой стрелке вектор э. д. с. вращается с той же скоростью, но в обратном направлении — против часовой стрелки. Одному обороту ротора соответствует один оборот вектора э. д. с., т. е. один период э. д. с. Максимум э. д. с. соответствует положению середины полюса под проводником, прохождению э. д. с. через нуль — положение под проводником нейтральной линии.

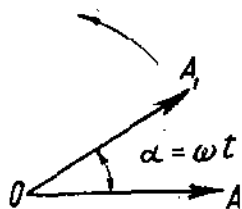


Рис. 20. Вращение вектора э. д. с.

29. Понятие об электрических градусах.

В предыдущем параграфе мы рассматривали двухполюсную машину. В многополюсной машине один период э. д. с. соответствует двойному полюсному делению, поэтому при одном обороте ротора вектор э. д. с. делает p оборотов, т. е. при повороте ротора на 360° вектор повернется на $p \times 360^\circ$. При повороте ротора на угол $360^\circ/p$, соответствующий двойному полюсному делению, вектор э. д. с. повернется на 360° ; при повороте ротора на угол α вектор э. д. с. повернется на угол $p\alpha$. Таким образом, углу α в пространстве соответствует в векторной диаграмме угол, в p раз больший. Угол в 1° в пространстве называют пространственным градусом; угол в 1° в векторной диаграмме называют электрическим градусом. Следовательно, одному градусу в пространстве соответствует p электрических градусов. Двойному полюсному делению соответствует 360, а полюсному делению соответствует 180 эл. градусов. Для того чтобы иметь возможность рассматривать в общем виде машины с любым числом полюсов, часто пространственные углы выражают в электрических градусах; тогда угол поворота ротора дает в то же время и угол поворота вектора э. д. с. Действительный угол поворота ротора (в пространстве) при этом в p раз меньше. В дальнейшем будем пользоваться выражением углов как в эл. градусах, так и в эл. радианах.

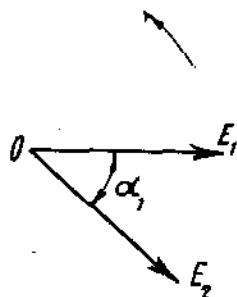


Рис. 21. Сдвиг э. д. с. во времени.

30. Сдвиг проводников в пространстве и электродвижущих сил во времени.

Рассмотрим два проводника 1 и 2 в двухполюсной машине (рис. 19). Максимум э. д. с. в проводнике 1 наступает, когда середина полюса находится против проводника, т. е. когда ротор повернется на угол 90° от начального положения, в котором ось полюсов совпадает с линией ял. Очевидно, в проводнике 2 максимум э. д. с. наступает, когда ротор повернется на угол $90^\circ + \alpha_1$, где α_1 — пространственный угол между проводниками 1 и 2. Таким образом, максимум э. д. с. в проводнике 2 будет позже, чем в проводнике 1 на время, соответствующее прохождению ротором дуги α_1 , следовательно, вектор э. д. с. проводника 2 отстает от

вектора э. д. с. проводника 1 на угол α_1 (рис. 21). В многополюсной машине пространственному углу α_1 соответствует угол $p\alpha_1$ в векторной диаграмме. При расстоянии между проводниками, равном α_1 , э. д. с. их сдвинуты друг от друга на угол $p\alpha_1$. Углы между проводниками выражают часто в электрических градусах, тогда они дают в то же время и углы сдвига фаз э. д. с.

Если проводник 2 сдвинут от проводника 1 на угол α_1 эл. градусов в сторону вращения полюсов (рис. 19), то э. д. с. проводника 2 отстает на угол α_1 от э. д. с. проводника 1; если проводник 2 сдвинут на угол α_1 в сторону, противоположную вращению полюсов, то э. д. с. в нем опережает на угол α_1 э. д. с. проводника 1.

31. Получение многофазных токов.

Для получения симметричной многофазной системы (с числом фаз m) необходимо иметь m одинаковых по величине э. д. с., сдвинутых по фазе на угол $360/m$ градусов друг от друга. Для создания таких э. д. с. необходимо на якоре синхронной машины иметь в простейшем случае m проводников, сдвинутых друг от друга на угол $360/m$ эл. градусов или на угол $360/mr$ простр. градусов. В обычных машинах вместо одного проводника в каждой фазе берут несколько проводников, соединенных последовательно и образующих фазную обмотку. Для того чтобы э. д. с. каждой обмотки были одинаковы по величине и сдвинуты по фазе на одинаковый угол друг от друга, каждая обмотка должна иметь одинаковое число проводников, одинаковым образом расположенных относительно друг друга, причем оси этих обмоток должны быть сдвинуты друг от друга на угол $360/m$ эл. градусов.

32. О мощности синхронных машин в kW и в kVA.

Размеры электрической машины определяются величинами тока I и напряжения U , на которые она рассчитана. Очевидно, электрическая машина может дать мощность, равную:

$$P_i = mUI \cdot 10^{-3} \text{ киловольтампер;}$$

здесь m — число фаз, U и I — фазные напряжение и сила тока, на которые машина рассчитана; мощность P_i в теории переменных токов называется кажущейся мощностью и выражается всегда в kVA (или в VA). Если нагрузка имеет индуктивное или емкостное сопротивление, то между напряжением и силой тока имеется угловой сдвиг фаз φ , вследствие чего активная или действительная мощность P становится меньше кажущейся мощности P_i :

$$P = P_i \cos \varphi = mUI \cos \varphi \cdot 10^{-3} \text{ киловатт;}$$

здесь $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; активная мощность выражается всегда в kW (или в W). Вращающий момент, а следовательно, и мощность первичного двигателя зависят от активной мощности. Таким образом, мощность первичного двигателя P_d определяется активной мощностью генератора, выраженной в kW (P_d равна отдаваемой генератором активной мощности P в kW плюс потери в генераторе). Размеры синхронной машины определяются ее кажущейся мощностью, выраженной в kVA, поэтому если мощность генератора выражена в kW, то необхо-

димо всегда указывать, при каком $\cos \varphi$ эту мощность генератор должен доставлять. Обычно мощность генераторов всегда указывают в kVA. Для того чтобы судить о мощности первичного двигателя, указывают либо $\cos \varphi$, либо еще и мощность генератора в kW.

Электрические сети всегда имеют индуктивное сопротивление, вследствие чего коэффициент мощности $\cos \varphi < 1$. Поэтому генераторы нормально строятся всегда для коэффициента мощности $\cos \varphi < 1$, обычно для $\cos \varphi = 0,8$ или $0,9$.

33. О номинальных величинах.

Значение мощности, напряжения, силы тока, скорости вращения, коэффициента мощности, частоты, на которые построена машина и которые указаны на ее щитке, называются номинальными. Это же название приписывают и всем другим величинам, вычисленным по номинальным величинам, указанным на щитке. Номинальная мощность синхронных генераторов выражается в VA или в kVA. Номинальной мощностью синхронного двигателя называется механическая мощность на валу двигателя, выражаемая в W или в kW. Если нет особых указаний, то номинальное напряжение всегда означает для трехфазных машин линейное (сопряженное) напряжение, а для двухфазных — напряжение между проводами одной и той же фазы. Номинальной силой тока называется сила тока, указанная на щитке машины и определяемая на основании номинальных значений кажущейся мощности и напряжения. Данные относительно номинальных напряжения и силы тока относятся к действующим значениям их. Номинальным коэффициентом мощности $\cos \varphi$ называется отношение номинального значения активной мощности к номинальному значению кажущейся мощности (см. ОСТ 3887).

ГЛАВА III.

ОБМОТКИ СИНХРОННЫХ МАШИН.

34. Общие замечания.

Каждая электрическая машина состоит из двух цепей: 1) электрической цепи, образуемой медными проводниками, в которых индуцируется магнитным потоком электрический ток, и 2) магнитной цепи, образуемой железом статора и ротора и воздушным зазором, которая служит для проведения магнитного потока. Электрическая цепь представляет собою обмотку якоря электрической машины. Обмотка якоря является одной из самых важных и сложных частей электрической машины. При проектировании обмотки необходимо удовлетворить следующим требованиям: 1) получение от машины при данной затрате меди в обмотке наибольшей полной (кажущейся) мощности, т. е. наибольшего произведения $P_i = UI$, где U — фазное напряжение, I — фазный ток якоря; 2) получение синусоидальной кривой э. д. с.; 3) достижение наименьшего падения напряжения и потери мощности в обмотке. В техническом отношении к обмотке обычно предъявляют следующие требования: 1) надежная изоляция обмотки от железа и отдельных витков друг от друга; отсутствие слабых в отношении электрической прочности участков обмотки; 2) отсутствие местных нагревов обмотки; 3) механическая прочность обмотки. Все эти условия являются весьма существенными, так как данные эксплуатации показывают, что из всех повреждений синхронных генераторов наибольший процент падает на повреждения обмотки якоря.

В синхронных машинах, в зависимости от их мощности и назначения, встречаются различные типы обмоток; однако, они отличаются друг от друга, главным образом, конструктивным выполнением, в электрическом же отношении сводятся к небольшому числу основных принципиальных схем, которые и разбираются в настоящей главе. Знакомство с принципиальными схемами и их характерными особенностями всегда позволит оценить достоинства и недостатки выполненной обмотки и поможет выбрать рациональную обмотку для пересчитываемой или перематываемой машины.

Обмотка синхронных машин образована из отдельных проводников, расположенных на поверхности статора. Для уменьшения воздушного зазора и удобства укрепления проводников обмотку укладывают всегда во впадинах, выштампованных в железе статора. Для получения от обмотки требуемых свойств проводники должны быть соединены между собою определенным образом; изучение различных схем соединений и их особенностей составляет предмет изучения обмоток. В область изучения обмоток входит также ознакомление с конструктивным выполнением обмоток.

35. Встречное и согласное соединение проводников.

В правильно сконструированной обмотке э. д. с. отдельных проводников, соединенных последовательно, должны складываться. Условимся передние концы проводников, обращенные на чертеже к нам, называть началами проводников; задние — концами проводников. Соединение конца одного проводника с началом другого (рис. 22, а), называют **согласным соединением**; соединение проводников одноименными концами, т. е. началами или концами (рис. 22, б), называют **встречным соединением**. Условимся считать э. д. с. проводника, положительной, если она направлена от начала к концу проводника, и отрицательной при обратном направлении — от конца к началу. Тогда для получения результирующей э. д. с. нескольких проводников, соединенных последовательно,

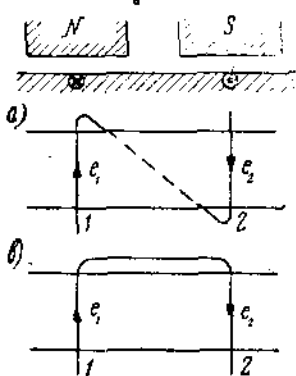


Рис. 22. Согласное (а) и встречное (б) соединение проводников.

мы должны, очевидно, при согласном соединении проводников брать сумму э. д. с. отдельных проводников, а при встречном — разность э. д. с. Если последовательно соединять проводники, лежащие под разными полюсами и находящиеся на расстоянии полюсного деления τ друг от друга, то, как видно из рис. 22, б, для увеличения э. д. с. необходимо встречное соединение. Результирующая э. д. с. двух проводников тогда равна:

$$e = e_1 - (-e_2) = e_1 + e_2 = 2e_1$$

(при встречном соединении из э. д. с. проводника 1 мы должны вычесть э. д. с. проводника 2, но так как проводник 2 находится под другим полюсом, то в нем э. д. с. имеет другое направление — отрицательна, и в результате мы получаем сложение э. д. с.). По величине э. д. с. проводников 1 и 2 равны, поэтому результирующая э. д. с. двух проводников, сдвинутых друг от друга на полюсное деление τ , при встречном соединении равна удвоенной э. д. с. одного проводника.

При согласном соединении тех же проводников (рис. 22, а) получаем

$$e = e_1 + (-e_2) = e_1 - e_2 = 0.$$

36. Виток.

Контур, образуемый двумя последовательно соединенными проводниками якоря, называют витком. В обмотках синхронных машин виток обычно образован проводниками, расположенными под разноименными полюсами (рис. 22, б). Как следует из § 35, для увеличения э. д. с. при этом требуется встречное соединение проводников.

37. Катушка.

Если во впадины на рис. 22, б уложить не один виток, а w витков и соединить все витки последовательно так, чтобы э. д. с. их складывались, то получаем так называемую катушку. Катушка имеет общую изоляцию от железа впадины и представляет в конструктивном и электрическом отношении одно целое. С точки зрения получения э. д. с. катушка эквивалентна одному витку, с той лишь разницей, что э. д. с. катушки

в w_s раз больше э. д. с. одного витка. На схемах катушку изображают обычно одной линией (рис. 23); концы A и X представляют собою начало и конец катушки. Стороны катушки, лежащие во впадинах и состоящие каждая из w_s проводников, называют индуктируемыми сторонами катушки.

38. Шаг витка и катушки.

Расстояние между проводниками, образующими виток (или между индуктируемыми сторонами катушки), называется шагом или шириною витка (катушки). Шаг y выражают или в долях полюсного деления τ или числом пропущенных зубцов. Если стороны витка сдвинуты на полюсное деление τ , то виток имеет диаметральный или полный шаг (рис. 23, а); если расстояние y между сторонами витка меньше или больше τ , то виток имеет укороченный шаг (рис. 23, б).

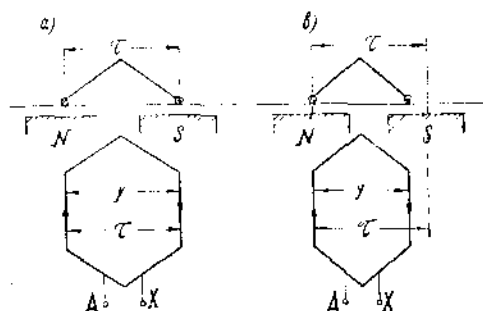


Рис. 23. Катушка с диаметральной (а) и с укороченным (б) шагом.

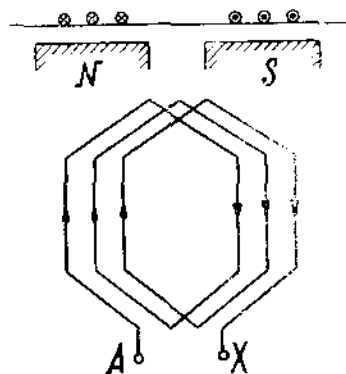


Рис. 24. Последовательное соединение витков.

39. Встречное и согласное соединение витков и катушек.

Условимся началом витка или катушки называть тот конец его, который лежит влево от нас. Из рис. 24 не трудно убедиться, что для увеличения э. д. с. обмотки, состоящей из нескольких витков, необходимо согласное соединение витков, т. е. соединение конца одного витка с началом другого. (Такое соединение называют иногда последовательным). Для увеличения числа параллельных ветвей обмотки применяют встречное соединение витков (иначе называемое параллельным, см. § 49).

40. Активные и неактивные части обмоток.

Части обмоток, уложенные во впадинах и подверженные действию магнитного потока, называют активными; они участвуют в создании э. д. с. Части, находящиеся вне впадин, являются неактивными с точки зрения генерирования э. д. с.; они служат только для соединения активных частей между собою. Вследствие своего расположения по бокам статора неактивные части обмотки носят название лобовых частей.

41. Классификация обмоток.

Применяемые вообще в машинах переменного тока обмотки по типу выполнения делят следующим образом:¹⁾

а) обмотки специфические для машин переменного тока:

- 1) катушечные,
- 2) стержневые;

б) обмотки по типу применяемых для машин постоянного тока:

- 1) неизменные,
- 2) разрезанные;

с) специальные обмотки (двойные обмотки, короткозамкнутые, обмотки с переключением числа полюсов и т. д.).

Эта классификация соответствует историческому развитию машин переменного тока. Многие применяемые в настоящее время катушечные и стержневые обмотки, входящие в пункт „а“ классификации, ничем не отличаются от разрезанных обмоток постоянного тока, вследствие чего классификация получается нестройной. В дальнейшем будем придерживаться следующей классификации:

- 1) катушечные обмотки;
- 2) стержневые обмотки;
- 3) неизменные обмотки постоянного тока;
- 4) специальные обмотки.

В синхронных машинах применяют большей частью катушечные или стержневые обмотки; в некоторых случаях употребляют специальные двойные обмотки (§ 48). В одноякорных преобразователях, представляющих собою по отношению к переменному току синхронную машину, применяют неизменную обмотку постоянного тока; эта обмотка здесь не рассматривается.

По числу фаз перечисленные выше обмотки делят на однофазные и многофазные (двухфазные, трехфазные и т. д.).

Обмотки, кроме того, иногда еще делят по конструктивному выполнению на обмотки однослойные, у которых обе индуктируемые стороны катушки лежат в одном слое по высоте впадины, и на двухслойные, у которых одна сторона катушки лежит вверх впадины, а другая вниз. Двухслойные обмотки соответствуют разрезанным обмоткам постоянного тока в первой классификации: катушечные двухслойные обмотки аналогичны петлевым обмоткам постоянного тока, стержневые двухслойные могут быть как петлевыми, так и волновыми. По числу впадин обмотки делят на обмотки с целым числом впадин, приходящихся на полюс и фазу (т. е. $q = Z/2pm$ — целое число, где Z — полное число впадин, $2p$ — число полюсов, m — число фаз), и на обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу ($q \neq$ целое число).

42. Катушечные обмотки однофазных машин с целым числом впадин на полюс и фазу.

а) Основная схема.²⁾ В простейшем случае имеем одну катушку на пару полюсов. Если машина многополюсная, то э. д. с. каждой из катушек, расположенных одинаковым образом под отдельными парами по-

¹⁾ См. СЭТ, т. V, отд. 33, § 36.

²⁾ Сведение схем катушечных обмоток к трем принципиальным схемам (основная и две модификации) предложено В. А. Толвинским (см. В. А. Толвинский. Синхронные машины. Петроград, 1923).

люсов, находится в фазе; соединяя катушки согласно (последовательно), получим увеличение э. д. с. в p раз, где p — число пар полюсов. Для дальнейшего увеличения э. д. с. укладывают две катушки на пару полюсов. Если вторая катушка сдвинута от первой в пространстве на 90 эл. градусов (рис. 25), то такой же сдвиг во времени имеют и э. д. с. этих катушек (§ 30). Поэтому при последовательном соединении катушек э. д. с.

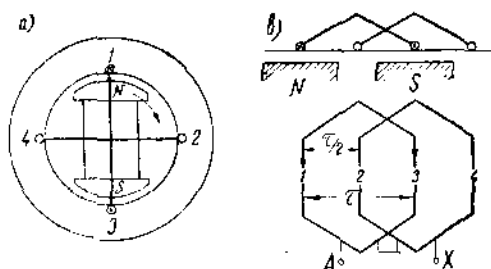


Рис. 25. Обмотка однофазной машины со сдвигом катушек на 90 эл. градусов.

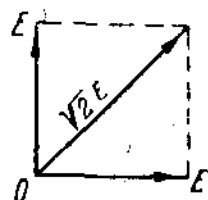


Рис. 26. Векторная диаграмма к рис. 25.

увеличится в $\sqrt{2} = 1,41$ раза (рис. 26). С точки зрения увеличения э. д. с. более выгодной является укладка второй катушки на пару полюсов во впадинах, сдвинутых не на 90 эл. градусов, а на 60 (рис. 27). Тогда при тех же двух катушках получаем увеличение э. д. с. не в $\sqrt{2}$ раз, а в $\sqrt{3} = 1,73$ раза (рис. 28). Если уложить под углом в 60 эл. градусов ко второй катушке третью катушку (во впадины 3,6, рис. 27), то э. д. с. возрастает с $\sqrt{3}E$ до $2E$ (рис. 29), т. е. на 15,6%. Как указано

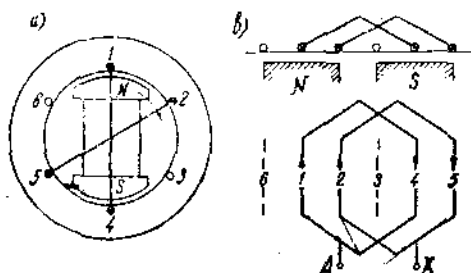


Рис. 27. Обмотка однофазной машины со сдвигом катушек на 60 эл. градусов.

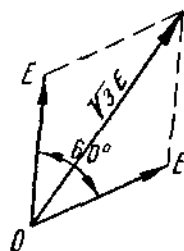


Рис. 28. Векторная диаграмма к рис. 27.

в § 100, мощность машины при этом возрастает всего лишь на 8,95% по сравнению с предыдущим случаем (так как во втором случае приходится уменьшать плотность тока по сравнению с первым). Расход меди возрастает значительно больше, чем мощность, а именно на 50% по сравнению с предыдущим случаем. Ввиду такого несоответствия расхода меди увеличению мощности в однофазных машинах никогда не укладывают катушки равномерно по всей поверхности статора; под каждым полюсом обмотка занимает только около $\frac{2}{3}$ полюсного деления. На практике обычно выштамповывают впадины, равномерно распределенные по всей окружности статора, так как штамповка с пропуском впадин через каждые $\frac{2}{3}$ слишком усложнила бы производство. Если обозначить через

Q полное число впадин на полюсное деление, то обмоткой в однофазной машине занято только $q \cong \frac{2}{3} Q$ впадин на полюс. Максимальное число занятых обмоткой впадин доходит до 80% Q . На рис. 30 изображена обмотка, имеющая $Q = 6, q = 4, p = 1$.

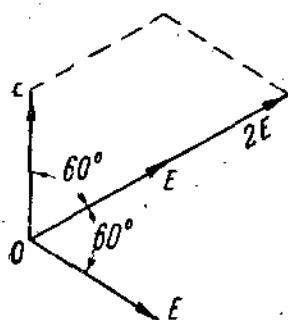


рис. 29. Векторная диаграмма к рис. 27.

б) Первая модификация основной схемы. Преимуществами основной схемы обмотки являются одинаковая ширина и форма катушек (рис. 30). Однако, эти преимущества покрываются крупным недостатком — сложной формой лобовых соединений. Как видно из рис. 30, лобовые соединения отдельных катушек пересекают друг друга; для возможности выполнения соединений им необходимо придавать форму, аналогичную форме лобовых соединений якорной обмотки постоянного тока (см. § 50). Сложной формы лобовых частей можно избежать, изменив порядок соединения проводников. В основной схеме (рис. 30) проводники впадины 1 соединяются с проводниками впадины 7; впадины 2 — с проводниками впадины 8 и т. д., в общем все проводники впадин 1, 2, 3, 4 должны быть соединены с проводниками

впадин 7, 8, 9, 10; тогда э. д. с. всех этих проводников будут геометрически складываться. Так как от перестановки мест слагаемых сумма не изменяется, то величина результирующей э. д. с. не зависит от порядка соединения проводников, если только будет сохранено условие соединения всех проводников впадин 1—4 со всеми проводниками впадин 7—10. На рис. 31 изображена схема обмотки с другим порядком соединения проводников: проводники крайней левой впадины 1 соединяются с проводни-

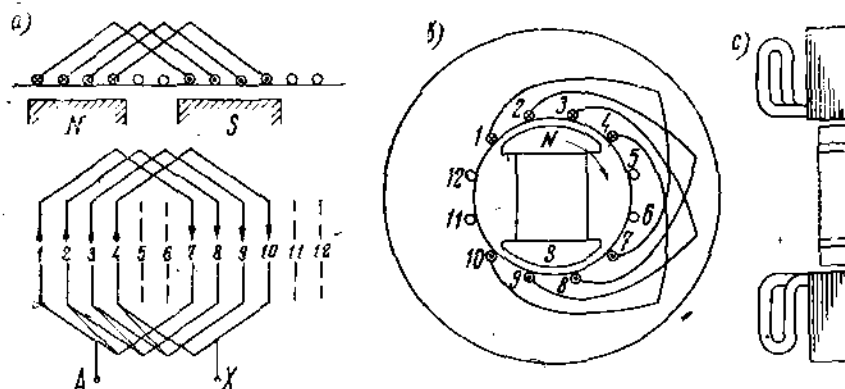


Рис. 30. Катушечная обмотка однофазной машины; $Q = 6, q = 4, p = 1$ (основная схема).

ками крайней правой впадины 10; проводники внутренней впадины 2 соединяются с проводниками внутренней впадины 9 и т. д. Эта схема представляет первую модификацию основной схемы. Величина э. д. с. в ней та же, что и в основной схеме; лобовые части не пересекаются. К числу недостатков этой схемы следует отнести неодинаковую ширину катушек. Лобовые части обмотки для надежности укрепления их и сокращения места по длине машины обычно отгибаются в плоскость, параллельную торцевой поверхности статора (рис. 31, c). Подробнее о выполнении лобовых частей см. § 50.

б) Вторая модификация основной схемы. Рассматривая рис. 31, б, где изображены лобовые соединения однофазной обмотки, выполненной по первой модификации основной схемы, можно видеть, что соединения крайних

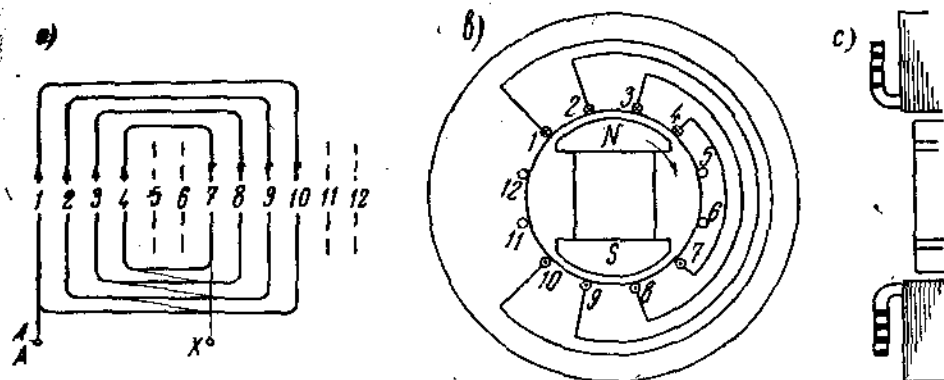


Рис. 31. Катушечная обмотка однофазной машины; $Q = 6$, $q = 4$, $p = 1$ (первая модификация).

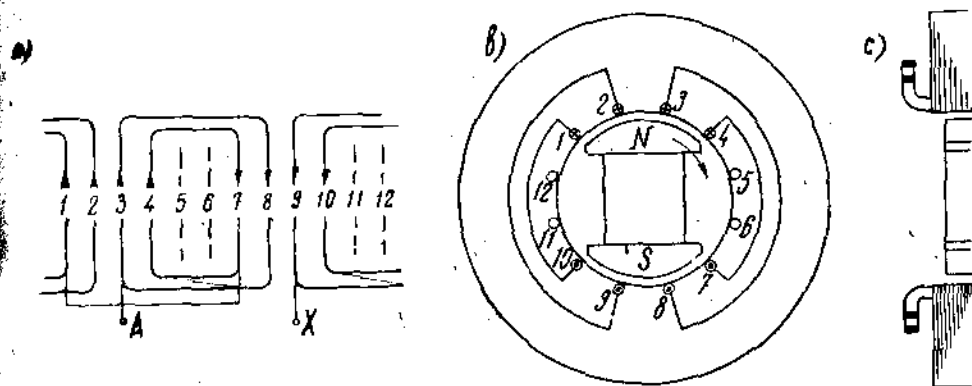


Рис. 32. Катушечная обмотка однофазной машины; $Q = 6$, $q = 4$, $p = 1$ (вторая модификация).

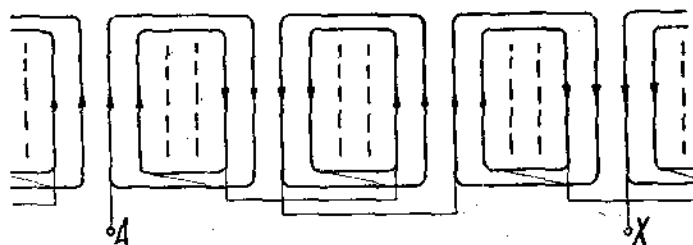


Рис. 33. Вторая модификация катушечной обмотки; $m = 1$, $Q = 6$, $q = 4$, $p = 2$.

катушек имеют очень большую длину, вызывая этим совершенно нерациональную затрату меди. Не изменяя ни в чем порядка соединения проводников, можно отогнуть лобовые соединения двух крайних катушек влево,

благодаря чему сокращается их длина (рис. 32, б). Развернутая схема этой обмотки представлена на рис. 32, а. Это—вторая модификация основной схемы. Для четырехполюсной машины вторая модификация изображена на рис. 33.

43. Катушечные однослойные обмотки трехфазных машин с целым числом впадин на полюс и фазу.

Для получения трехфазного тока необходимо иметь в простейшем случае три катушки, сдвинутых друг от друга на 120 эл. градусов (§ 31). Так как величина э. д. с. при этом получается слишком незначительной, то в каждой фазе устраивают несколько катушек и получают, таким образом, на якоре три обмотки. Действующие значения э. д. с. в каждой фазе должны быть равны друг другу и сдвинуты на 120 эл. градусов. Для выполнения первого условия, очевидно, обмотки каждой фазы должны иметь одинаковое число витков, причем взаимное расположение витков должно

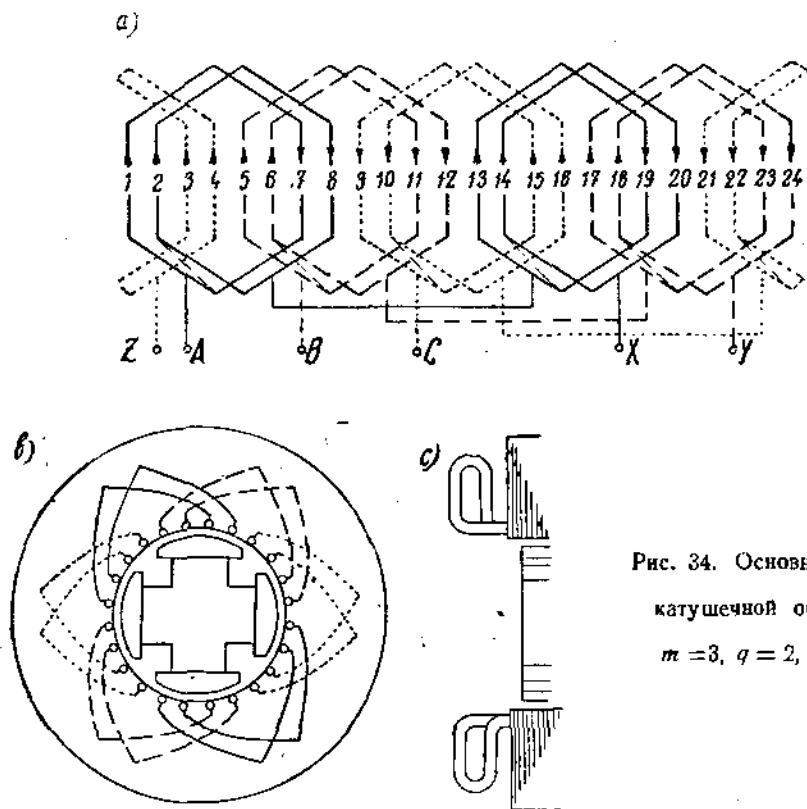


Рис. 34. Основная схема катушечной обмотки;
 $m = 3$, $q = 2$, $p = 2$.

быть одинаково. Для того чтобы фазы э. д. с. каждой обмотки были сдвинуты на 120°, необходимо, чтобы любому проводнику одной фазы соответствовал проводник в другой фазе, сдвинутый от первого на 120 эл. градусов. Следовательно, обмотки каждой фазы должны быть совершенно идентичны друг другу в смысле расположения проводников и сдвинуты друг от друга на 120 эл. градусов. Иногда говорят, что ось обмоток должны быть сдвинуты на 120 эл. градусов; под осью обмотки понимается ось магнитного потока, создаваемого этой обмоткой при пропускании по ней тока (§ 69). Три фазных обмотки можно соединять между собою звездой или треугольником (§ 62).

а) Основная схема. Обмотка по основной схеме (рис. 34) выполняется так же, как и в однофазной машине. Для получения трехфазного тока на статоре укладывают три независимых обмотки, начала которых сдвинуты на 120 эл. градусов друг от друга. (На рис. 34 начала фаз обозначены буквами А, В, С, концы — буквами X, Y, Z). Если полное число впадин на полюс Q , то обмотка каждой фазы в трехфазной машине занимает $q = Q/3$ впадин. В многофазной машине при m фазах обмотка каждой фазы занимает $q = Q/m$ впадин. Здесь число впадин на полюс $Q = Z/2p$, где Z — полное число впадин статора.

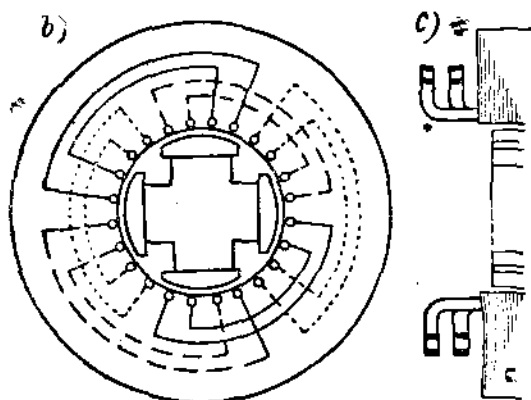
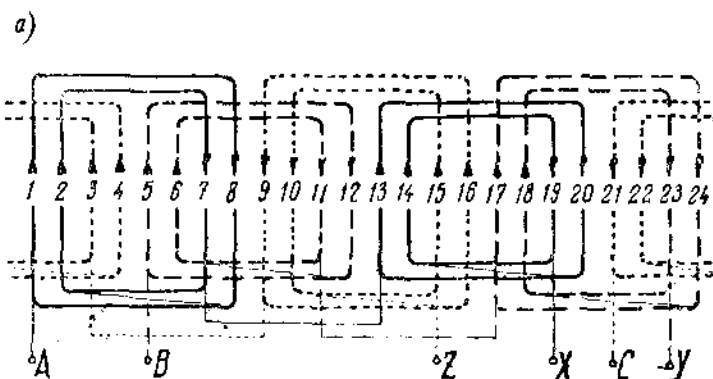


Рис. 35. Первая модификация катушечной обмотки;
 $m = 3, q = 2, p = 2$.

б) Первая модификация основной схемы (рис. 35) образуется по тому же принципу, как и в однофазной обмотке. Вследствие того, что в трехфазной машине имеем вместо одной три независимых обмотки, лобовые соединения нельзя расположить в одной плоскости (в одном этаже), как в однофазной обмотке (рис. 31, с), а необходимо расположить их в нескольких плоскостях. При четном числе пар полюсов p лобовые соединения в первой модификации всегда можно расположить в двух плоскостях. (На каждую пару полюсов с одной стороны статора имеем $m = 3$ группы лобовых соединений, а на всю машину 3 p групп. Если p четное, то это число делится на 2 и, следовательно, все группы лобовых соединений могут быть разбиты на две части, расположенные в двух плоскостях). При p нечетном (например, $p = 1$ или $p = 3$) при желании расположить лобовые соединения в двух плоскостях необходимо одну из катушек делать сложной изогнутой формы, лежащей

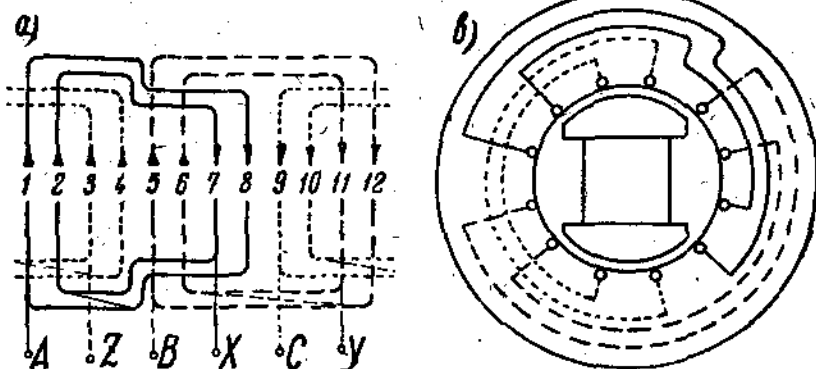


Рис. 36. Первая модификация катушечной обмотки при p нечетном, с расположением лобовых соединений в двух плоскостях; $m = 3$, $q = 2$, $p = 1$.

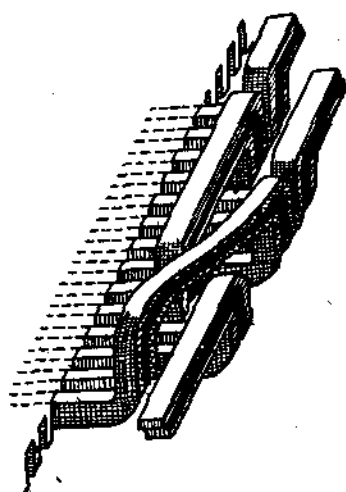


Рис. 37. Изогнутая переходная катушка.

частью в одной плоскости, частью в другой (рис. 36 и 37). При больших сечениях проводников в этом случае выгоднее перейти на расположение лобовых соединений в трех плоскостях (рис. 38), так как в трехфазной машине число групп лобовых частей всегда делится на 3.

В основной схеме обмотки каждая катушка имеет одинаковую форму, поэтому длина, а следовательно, и сопротивление обмотки каждой фазы получаются одинаковыми. В трехфазной обмотке, выполненной по первой модификации, катушки каждой фазы, вследствие расположения лобовых соединений в разных плоскостях, имеют разную длину. При расположении лобовых частей в двух плоскостях при p четном можно сделать в каждой фазе одинаковое число коротких и длинных катушек, благодаря чему длина и сопро-

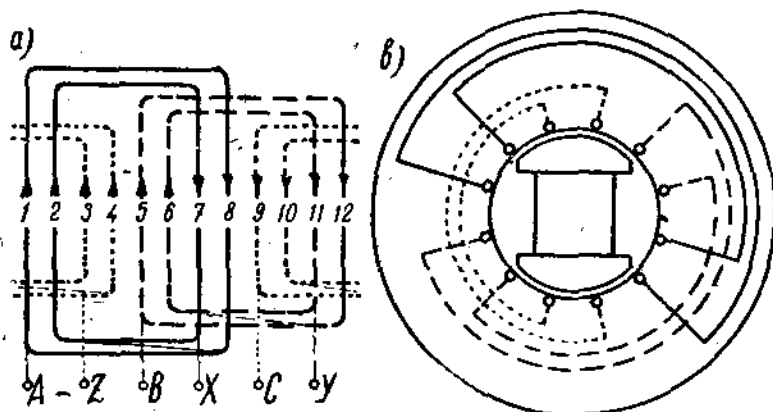


Рис. 38. Первая модификация катушечной обмотки при p нечетном с расположением лобовых соединений в трех плоскостях; $m = 3$, $q = 2$, $p = 1$.

тивление обмотки каждой фазы будут одинаковыми. При расположении лобовых частей в трех плоскостях по рис. 38 длина обмотки каждой фазы получается неодинаковой, а потому и сопротивления (активное и реактивное) в каждой фазе неодинаковы. Для получения одинаковых длин и сопротивлений эту обмотку можно выполнить по рис. 39; здесь лобовые части первой фазы с одной стороны статора расположены в плоскости, ближайшей к статору, с другой — в плоскости, наиболее удаленной; для другой фазы лобовые части расположены в обратном порядке, а для третьей — с обеих сторон статора в средней плоскости. Обладая одинаковым сопротивлением во всех трех фазах, такая обмотка, однако, имеет крупный недостаток: катушки не могут быть в готовом виде уложены во впадины. При этой схеме сначала укладывают активные части

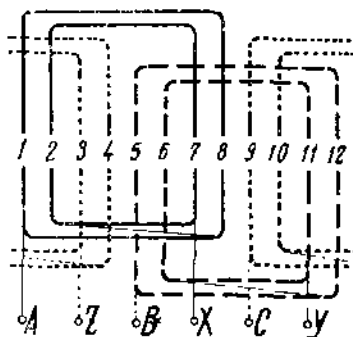


Рис. 39. Первая модификация катушечной обмотки с катушками одинаковой длины: $m = 3$, $q = 2$, $p = 1$.

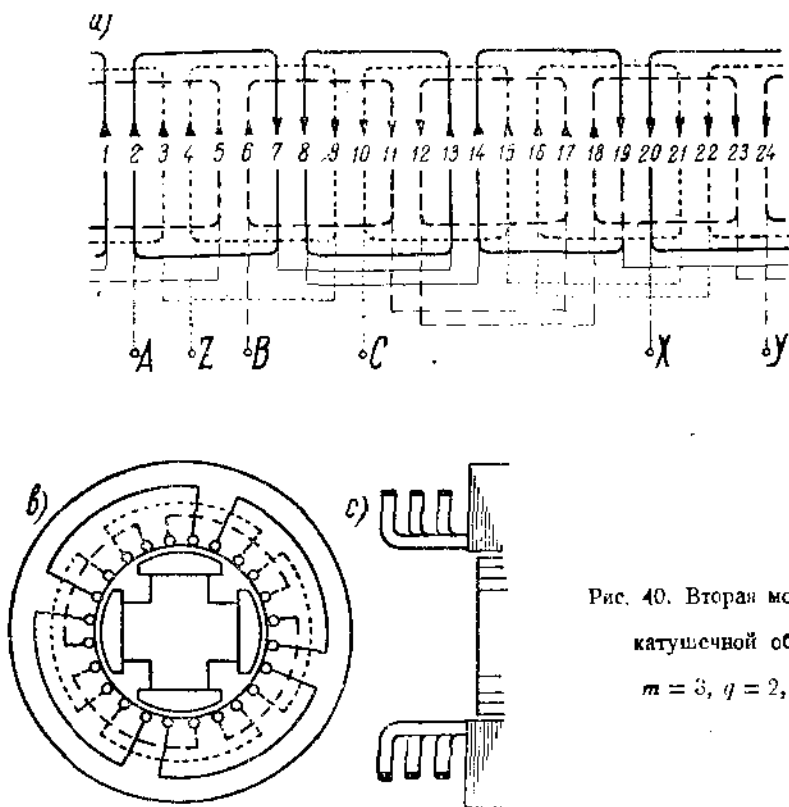


Рис. 40. Вторая модификация катушечной обмотки:
 $m = 3$, $q = 2$, $p = 2$.

проводников, утопленные во впадинах; после этого к ним приклепывают или привинчивают лобовые части, изготовленные отдельно. Из-за такого сложного изготовления обмотки, выполненные по этой схеме, применяют только в машинах большой мощности.

с) Вторая модификация основной схемы получается так же, как и в однофазной обмотке, отгибанием лобовых частей соседних катушек одной фазы в разные стороны (рис. 40). Лобовые части при этом всегда приходится располагать в трех плоскостях, что ведет к неодинаковым сопротивлениям обмоток отдельных фаз. Для выравнивания сопротивлений можно устроить лобовые соединения аналогично рис. 41; такая конструкция имеет те же недостатки, что были указаны выше.

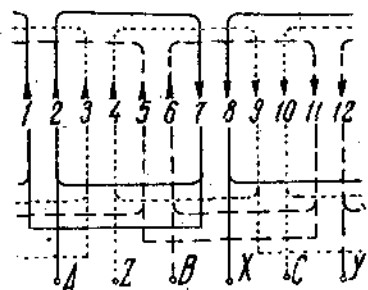


Рис. 41. Вторая модификация катушечной обмотки с катушками одинаковой длины; $m = 3$, $q = 2$, $p = 1$.

получаем вариант основной схемы (рис. 42, а). Аналогично этому варианту можно получить и новый вариант первой модификации рис. 42, б). Иногда для возможности разъема статора без нарушения обмотки применяют для двух фаз первую модификацию, для третьей — вторую (рис. 43).

д) Варианты основной схеме и ее модификаций.

При выполнении обмотки по рис. 32 лобовые части распределены равномерно по всей окружности. Если необходимо статор сделать разъемным на две части, то разъем невозможен без вынимания обмотки. Для возможности разъема статора без нарушения обмотки можно отогнуть лобовые части одной из фаз в обратную сторону — получаем вариант основной схемы (рис. 42, а). Аналогично этому варианту можно получить и новый вариант первой модификации рис. 42, б). Иногда для возможности разъема статора без нарушения обмотки применяют для двух фаз первую модификацию, для третьей — вторую (рис. 43).

44. Катушечные двухслойные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу.

В однослойных катушечных обмотках в каждой впадине лежит по одной индуцируемой стороне катушки. В двухслойных катушечных обмотках в каждой впадине лежит по две индуцируемые стороны катушки, причем аналогично якорной обмотке постоянного тока одна индуцируемая сторона каждой катушки лежит сверху одной впадины, другая индуцируемая сторона — внизу другой впадины (рис. 44, а). В однослойной обмотке одни, например левые, индуцируемые стороны катушек (впадины 1,2 на рис. 34) занимают одну треть полюсного деления; две других трети занимают индуцируемые стороны катушек второй и третьей фазы. Поэтому между первой, второй и т. д. левыми индуцируемыми сторонами катушек (впадины 1,2) и соответственно первой, второй и т. д. правыми сторонами тех же катушек (впадины 7,8) всегда имеется сдвиг в 180 эл. градусов, другими словами, шаг однослойной катушечной обмотки всегда диаметральный. В двухслойной обмотке нижний слой индуцируемых сторон катушек можно сдвинуть в любую сторону относительно верхнего на некоторое число впадин (рис. 44, б); тогда между левыми и правыми индуцируемыми сторонами катушек получается сдвиг меньше или больше 180 эл. градусов, т. е. обмотка имеет укороченный шаг. Как указано в § 64, обмотка с укороченным шагом обладает рядом преимуществ, чем и вызвано широкое распространение двухслойной обмотки за последнее время. Выполняется двухслойная обмотка только по основной схеме (§ 43). В однофазных машинах двухслойная обмотка не применяется. Двухслойные обмотки с расположением лобовых соединений по образующей конуса (рис. 63) у нас называются американскими (§ 50, см. также § 46).

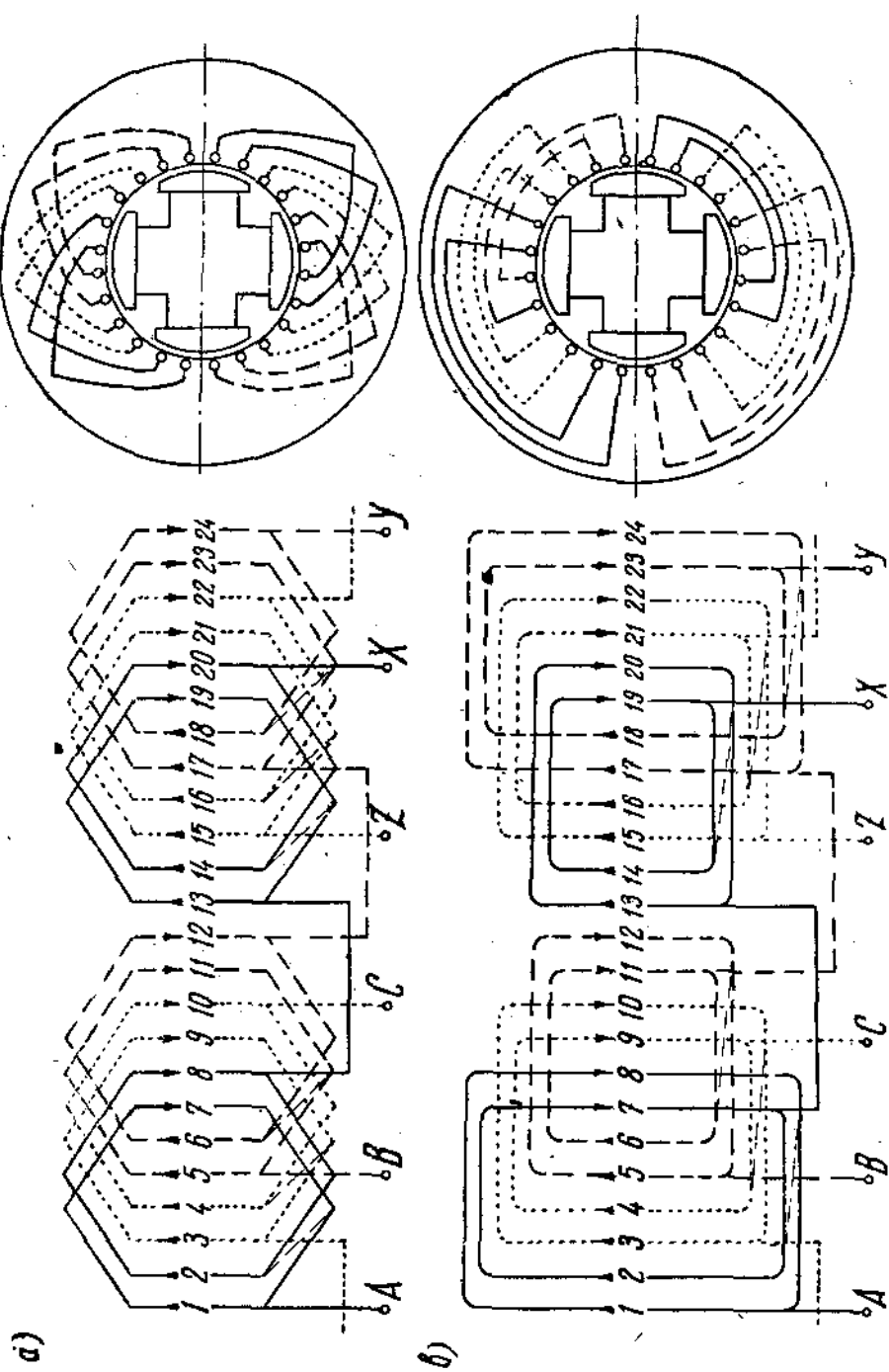


Рис. 42. Варианты основной схемы (а) и первой модификации (б); $m = 3$, $q = 2$, $p = 2$.

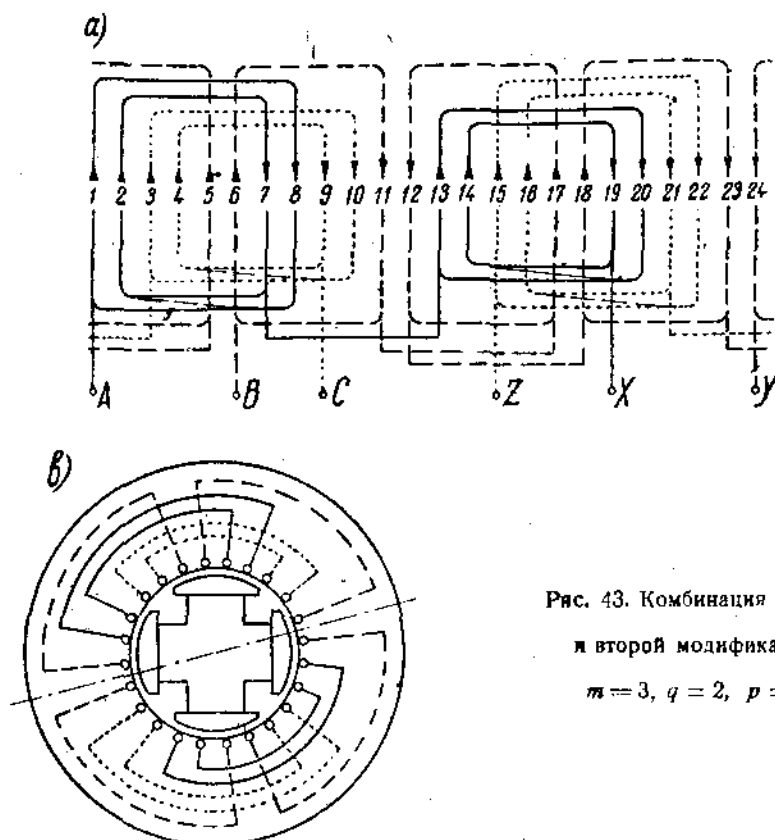


Рис. 43. Комбинация первой
и второй модификации:
 $m = 3, q = 2, p = 2$.

45. Стержневые однослойные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу.

При больших мощностях машин и при низких напряжениях проводники обмотки имеют большие сечения, вследствие чего во впадине помещается всего 1-2 стержня. При одном стержне во впадине каждая катушка имеет только один виток. Такая обмотка и получила название стержневой. Лобовые соединения в ней выполняют по типу соединений основной схемы (рис. 45) или по типу соединений первой модификации (рис. 46). В первом случае, в зависимости от того, в какую сторону отогнуты лобовые соединения, получается волновая обмотка (рис. 45,а) или петлевая (рис. 45,б). Во втором случае обмотка сохраняет обычно волновой характер (рис. 46).

46. Стержневые двухслойные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу.

В этих обмотках в каждой впадине лежат два стержня. Одна индуктируемая сторона витка лежит сверху одной впадины, другая — внизу другой впадины. Лобовые соединения выполняются так же, как и соединения основной схемы (рис. 47), причем, аналогично двухслойной катушечной обмотке (§ 44), лобовые соединения верхнего слоя отогнуты в одну сторону, нижнего — в другую. В зависимости от выполнения лобовых соединений обмотка может быть волновой или петлевой. Волновая обмотка (рис. 47,а) состоит из отдельных цепей, проводники которых рас-

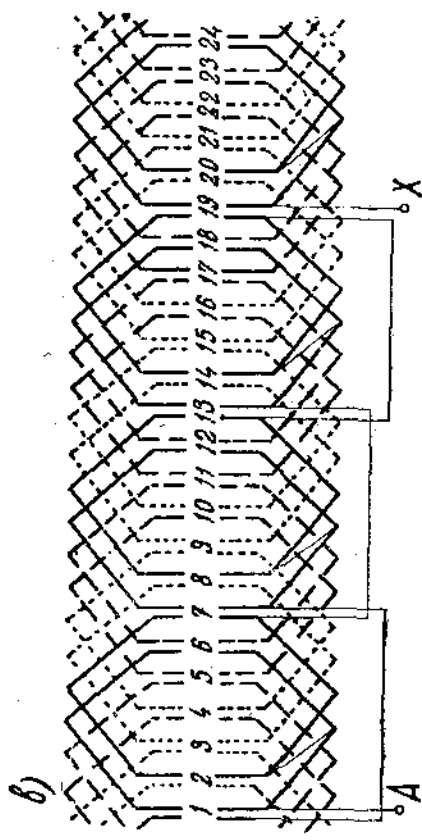
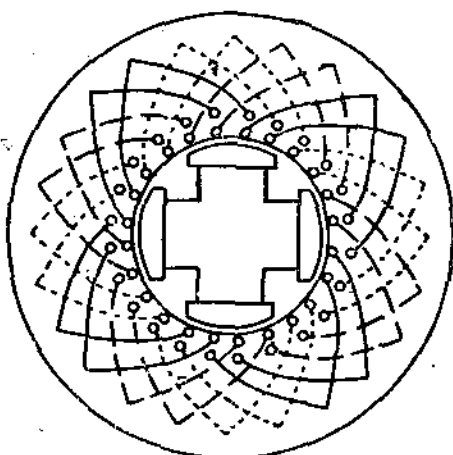
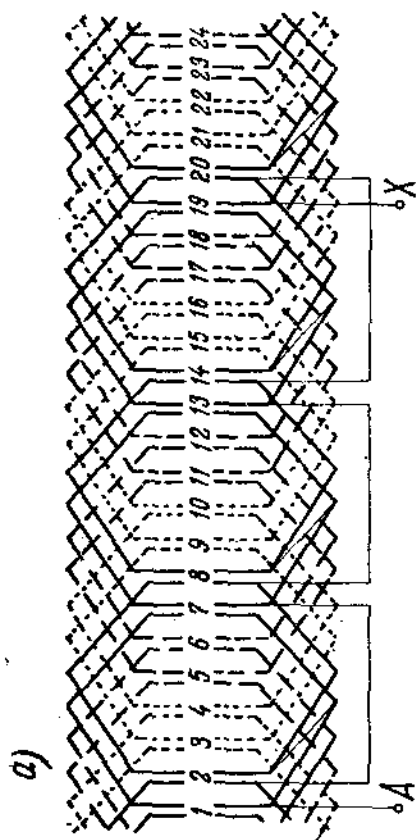
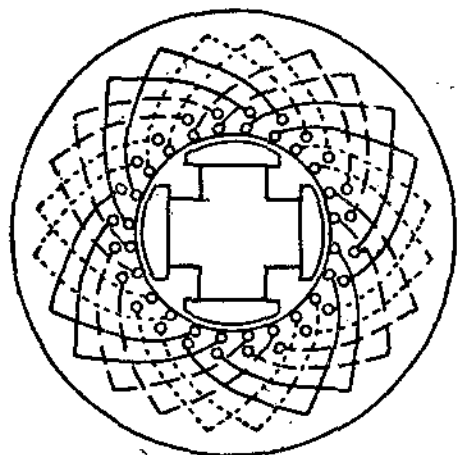
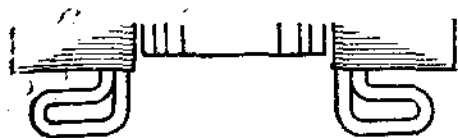


Рис. 44. Двухслойная катушечная обмотка с диаметральным (a) и с укороченным (b) шагом; $m=3$, $q=2$, $p=2$.
Соединения между катушками показаны только для одной фазы.

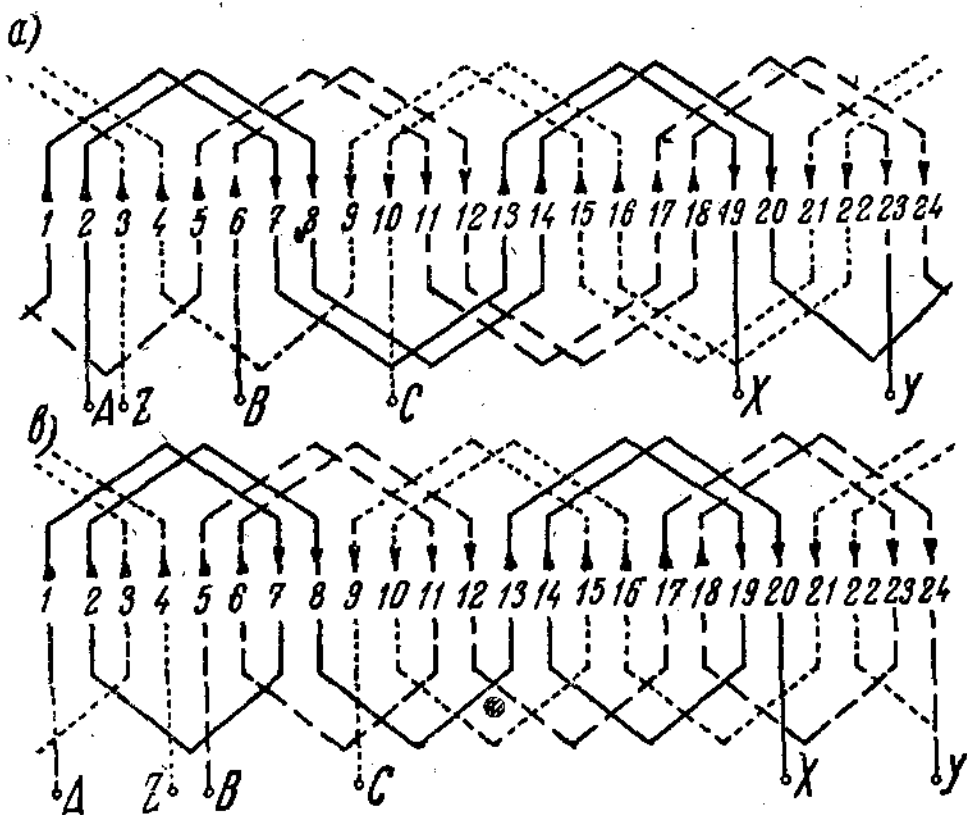


Рис. 45. Однослойная стержневая обмотка волновая (а) и петлевая (б);
 $m = 3$, $q = 2$, $p = 2$.

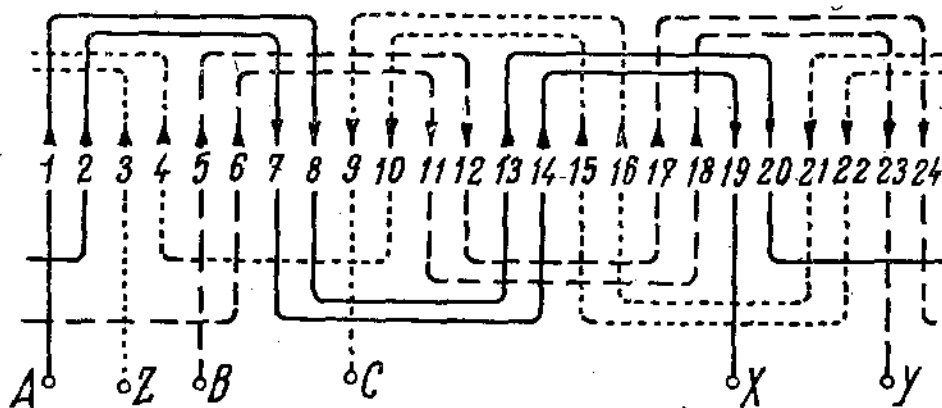


Рис. 46. Однослойная стержневая обмотка с концентрическими лобовыми соединениями;
 $m = 3$, $q = 2$, $p = 2$.

положены под всеми полюсами, и выполняется в несколько обходов по статору. Соединение отдельных цепей последовательно производится специальными проводниками *a*, соединяющими стержни, расположенные под разноименными полюсами. Петлевая обмотка (рис. 47, *b*) состоит из цепей, проводники которых расположены под соседними полюсами. В волновых обмотках длина лобовых соединений больше, чем в петлевых, но,

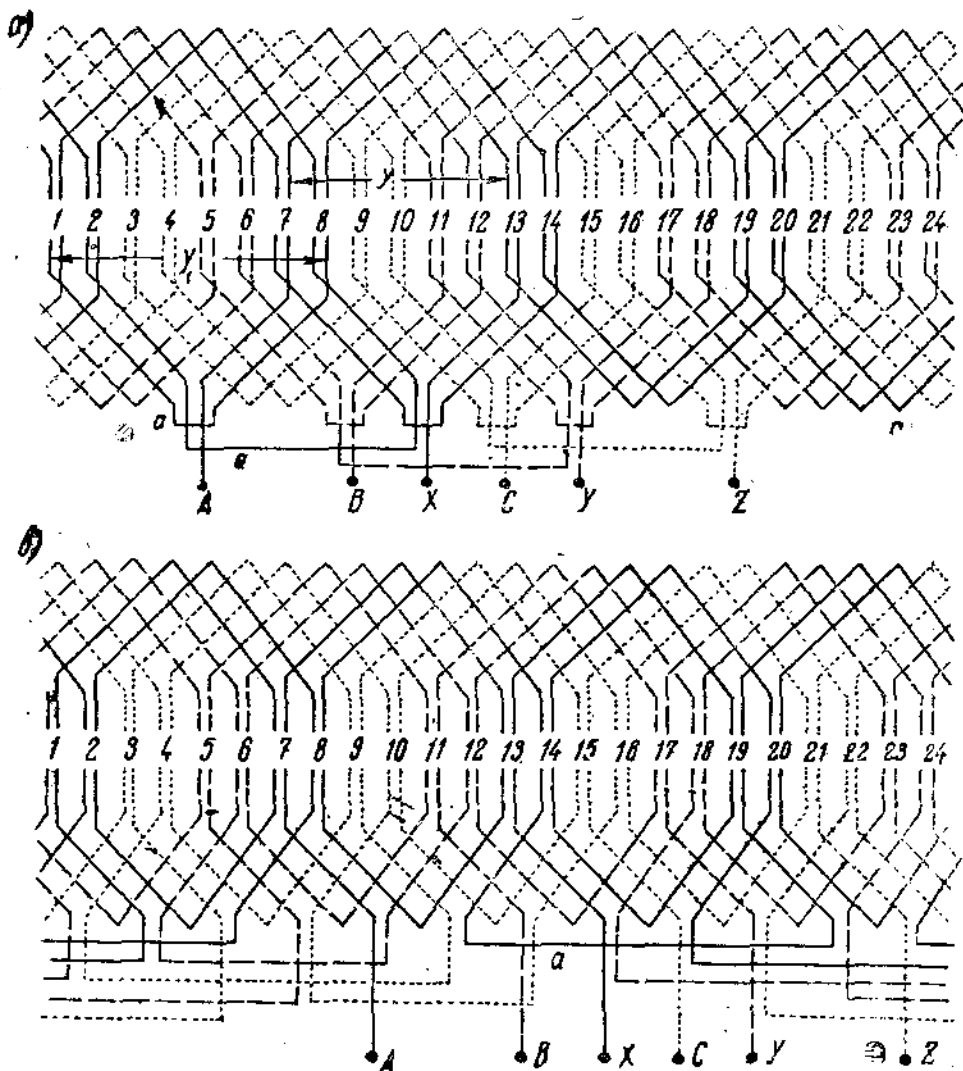


Рис. 47. Двухслойная стержневая обмотка: волновая (*a*) и петлевая (*b*);
 $m = 3$, $q = 2$, $p = 2$.

несмотря на это, они выгоднее, чем петлевые, так как у них длина и количество соединений между отдельными цепями (проводники *a*) получаются меньше (в волновых обмотках число отдельных цепей в каждом слое и фазе равно q , в петлевых — $2p$; здесь q — число впадин на полюс и фазу, p — число пар полюсов). Витки в каждой отдельной цепи волновой обмотки имеют одинаковый шаг $y = mq$, но после каждого полного обхода по ста-

тору для соединения со следующей цепью необходимо делать один шаг укороченный или удлиненный $y_1 = mq \mp 1$, чтобы перейти к проводнику, соседнему с тем, от которого начат обход, и избежать замыкания обмотки.

Двухслойные стержневые обмотки, как и двухслойные катушечные, обладают тем преимуществом, что в них легко выполнимо укорочение шага, достигаемое сдвигом нижнего слоя обмотки относительно верхнего на некоторое число впадин. Такие обмотки при расположении лобовых соединений по образующей конуса (§ 50) называют американскими.

Рассматривая схемы двухслойных петлевых катушечных и стержневых обмоток, не трудно установить, что они представляют собою простые параллельные (петлевые) обмотки постоянного тока, разрезанные на каждой

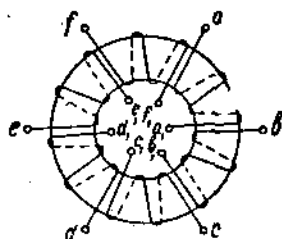


Рис. 48. Разрезанная обмотка постоянного тока.

паре параллельных ветвей на 6 частей (т. е. всего на $6a$ частей, где a — число пар параллельных ветвей). Волновые двухслойные обмотки переменного тока с целым q отличаются от волновых обмоток постоянного тока, так как имеют неодинаковые шаги y и y_1 (рис. 47, а). Однако, разрезывая простую последовательную (волновую) обмотку постоянного тока на 6 частей, можно получить обмотку переменного тока, но число впадин на полюс и фазу в такой обмотке будет дробное. Действительно, число впадин в обмотке постоянного тока равно $Z = S u_s$, где S — число секций, u_s — число элементарных впадин.¹⁾ Так как

в простой последовательной обмотке $S = y_s p \mp 1$, где y_s — результирующий шаг по секциям, p — число пар полюсов, то число впадин на полюс и фазу равно

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{S}{2pm u_s} = \frac{y_s}{2m u_s} \mp \frac{1}{2pm u_s} = \frac{y_s}{6u_s} \mp \frac{1}{6pu_s};$$

здесь $m = 3$ — число фаз. Так как u_s всегда целое, то для получения q целым произведение $qu_s = \frac{y_s}{6} \mp \frac{1}{6p}$ должно быть целым. Шаг y_s всегда четное число, поэтому первый член выражения может равняться одному из трех чисел: k , $k + \frac{1}{3}$, $k + \frac{2}{3}$, где k — любое целое число. Следовательно, чтобы qu_s было целым, второй член выражения $1/6p$ должен равняться нулю, $1/3$ или $2/3$, чего не может быть, т. е. q всегда дробное (§ 47).

Таким образом, обмотка постоянного тока может быть превращена в обмотку переменного тока (с целым или дробным q) путем разрезывания ее на $6a$ частей (рис. 48). Для возможности получения трехфазной обмотки из обмотки постоянного тока достаточно выполнения условия

$S/m = \text{целое число}$. Так как в волновой обмотке $y_s' = \frac{S \mp 1}{p} = \text{целое число}$, то выполнение условия $S/3 = \text{целое число}$ возможно лишь в том случае, если p на 3 не делится. Расстояние между точками разреза равно $y_s'' = \frac{S}{6} y_s$, где y_s — результирующий шаг по секциям. Если S нечетное, то делают попеременно шаги $y_s' = \left(\frac{S}{6} + \frac{1}{2}\right) y_s$ и $y_s'' = \left(\frac{S}{6} - \frac{1}{2}\right) y_s$. Тогда части обмоток ab , cd и ef (рис. 48) получают на одну секцию больше, чем остальные.

¹⁾ В. А. Толвинский. Электрические машины постоянного тока. Ленинград, 1929.

47. *¹⁾. Обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу.²⁾

Для выполнения обмоток с целым числом впадин на полюс и фазу необходимо осуществить условие:

$$\frac{Z}{2pr} = q = \text{целое число}; \quad (31)$$

здесь Z — число зубцов статора, m — число фаз, p — число пар полюсов. Это условие заставляет заводы иметь большое разнообразие штампов для статорного железа, так как штамп с определенным числом впадин применим только для определенных чисел полюсов и не может быть использован для машин с другим числом полюсов. Так, например, штамп с 60 впадинами применим только для машин с $p = 1, 2, 5, 10$. Стремление использовать имеющиеся штампы для более разнообразных чисел полюсов привело к применению обмоток с дробным числом впадин на полюс и фазу. Кроме того, такие обмотки дают кривую э. д. с. очень близкую к синусоиде (§ 64). Шаг в этих обмотках всегда получается укороченный, вследствие чего длина лобовых частей меньше, чем в обычных обмотках, что ведет к экономии расхода меди. В силу всех этих причин обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу применяют в настоящее время довольно широко.

Для выполнения симметричной многофазной обмотки с дробным q вместо условия (31) достаточно выполнения условия

$$\frac{Z}{m} = \text{целое число}, \quad (32)$$

т. е. каждая фаза должна содержать одинаковое число впадин. Если обмотка должна быть однослойная катушечная, то необходимо условие

$$\frac{Z}{2m} = \text{целое число}. \quad (33)$$

Обмотку, в которой каждая фазная обмотка представляет повторение обмоток других фаз и сдвиг между соответствующими проводниками обмоток отдельных фаз равен $k \times 120^\circ$ (где k — любое целое число) будем называть симметрично расположенной. Соответствующими проводниками называем такие, при совмещении которых оказываются совмещенными все остальные проводники трех фаз; при этом форма лобовых соединений никакого влияния не оказывает. Симметричные в электрическом отношении обмотки обычно являются и симметрично расположенными.

Для распределения по фазам отдельных проводников обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу в случае двухслойной обмотки удобнее всего поступить следующим образом. Пусть имеем обмотку с $q = \frac{a}{b} \neq \text{целое число}$; здесь $\frac{a}{b}$ — дробь; возьмем для примера обмотку с $q = \frac{Z}{2pm} = \frac{15}{2 \times 2 \times 3} = \frac{5}{4}$. Взяв клетчатую бумагу, полагаем каждую клетку равной $1/b = 1/4$ части шага (рис. 49). На каждую фазу тогда приходится $a = 5$ клеток. Северные N и южные S полюса помещаем один под другим и распределяем проводники последовательно через каждые $b = 4$ клетки. Таким путем получаем распределение проводников верхнего слоя обмотки по отдельным фазам и полюсам. Проводники нижнего

¹⁾ Звездочкой отмечены параграфы, которые при первоначальном изучении синхронных машин можно пропускать.

²⁾ Этот параграф рекомендуется изучать после изучения главы IV.

слоя имеют такое же точно распределение, но сдвинуты относительно проводников верхнего слоя на расстояние, равное, примерно, полюсному делению (рис. 49, б).

Благодаря размещению полюсов N и S друг под другом, каждой вертикальной линии, проведенной на схеме рис. 49, а, соответствует одно и то же значение индукции. Следовательно, проводники, расположенные по одной вертикали, имеют

а)

Полюса	Фаза А				Фаза С				Фаза В			
1	N	1		2		3		4		5		6
	S		5		6		7		8		9	
2	N		9		10		11		12		13	
	S		13		14		15		16		17	

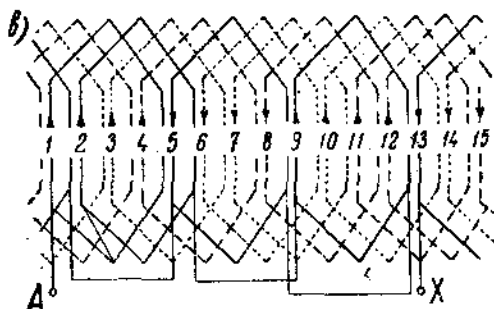


Рис. 49. Обмотка с вробным q ; $m = 3$, $q = 1\frac{1}{2}$
 $p = 2$, $d = 1$.

вертикали схемы рис. 49, а будет расположено только по одному проводнику, другими словами, нет таких двух проводников, которые имели бы одинаковую фазу э. д. с. Такая обмотка изображена на рис. 49, а. Если изобразить э. д. с. отдельных проводников в виде векторов, то получим рис. 50, где изображены векторы э. д. с. только проводников верхнего слоя; номера на векторах соответствуют номерам проводников. Э. д. с. всех проводников сдвинуты друг от друга на угол $\frac{360}{Z}$. Если через центр векторной диаграммы провести какую-либо ось nn , то все э. д. с. по одну сторону от этой оси принадлежат к одному полюсу, например N , а по другую — к другому полюсу, S , в чем не трудно убедиться, сверив номера векторов с номерами проводников на схеме рис. 49, а. Это так и должно быть, так как э. д. с. проводников, лежащих под одноименными полюсами (рис. 49, а), сдвинуты друг относительно друга на угол $\beta < 180$ эл. градусов (сдвиг проводника на угол, кратный 360° , не оказывает влияния на фазу э. д. с.; так, например, если проводник a сдвинут от проводника b

по одной вертикали, имеют э. д. с., совпадающие по фазе, если они оба лежат под одноименными полюсами, и сдвинуты на 180 эл. градусов, если проводники лежат под разноименными полюсами. Расстояние между любыми проводниками по горизонтали, выраженное в долях полюсного деления, дает в то же время угловой сдвиг между векторами э. д. с., выраженный в долях π (например, для проводников 1 и 2 угловой сдвиг э. д. с. равен $\frac{4}{15}\pi = 48^\circ$). Не трудно убедиться, что если общий наибольший делитель d чисел Z и p равен $d = 1$ и Z нечетное, то на каждой

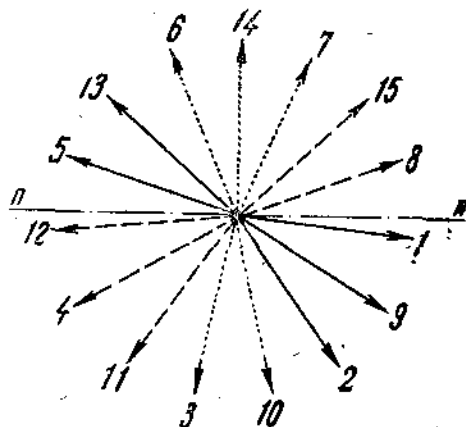


Рис. 50. Векторная диаграмма для обмотки рис. 49.

на угол $\alpha = k \times 360 + \beta$ эл. градусов, то э. д. с. их сдвинуты на угол β . Любые проводники, для которых $360 > \beta \geq 180$, лежат под полюсами разной полярности. Если в обмотке, имеющей $d = 1$, число впадин Z четное, то и число векторов в векторной диаграмме получается четным; тогда каждому проводнику северного полюса соответствует проводник южного полюса, находящийся в одинаковых магнитных условиях.

Рассматривая векторную диаграмму рис. 50, можно убедиться, что данная обмотка с дробным числом впадин на полюс и фазу и Z нечетным в отношении величины коэффициента обмотки (§ 61) эквивалентна обмотке двухполюсной машины, имеющей $2Z$ впадин, или $\gamma = \frac{Z}{m} = 2pq$ впадин на полюс и фазу, сдвинутых друг относительно друга на $360/2Z$ эл. градусов. При Z четном такая обмотка эквивалентна обмотке двухполюсной машины, имеющей Z впадин, или $\gamma = pq$ впадин на полюс и фазу.

Если общий наибольший делитель чисел Z и p заключен между числами 1 и p , т. е. $1 < d \leq p$, то на одной вертикали в схеме обмотки имеем d проводников, при Z/d нечетном ($2d$ при $\frac{Z}{d}$ четном), следовательно, в каждом d проводниках имеем э. д. с., совпадающие по фазе (рис. 51, а). Векторная диаграмма (рис. 52) имеет тогда $Z_d = Z/d$ лучей, но на каждом луче расположено d э. д. с. Обмотка эквивалентна в отношении величины коэффициента обмотки обмотке двухполюсной машины, имеющей при Z_d четном Z_d впадин, или $\gamma = \frac{pq}{d}$ впадин на полюс и фазу, а при Z_d нечетном $\gamma = \frac{2pq}{d}$ впадин на полюс и фазу.

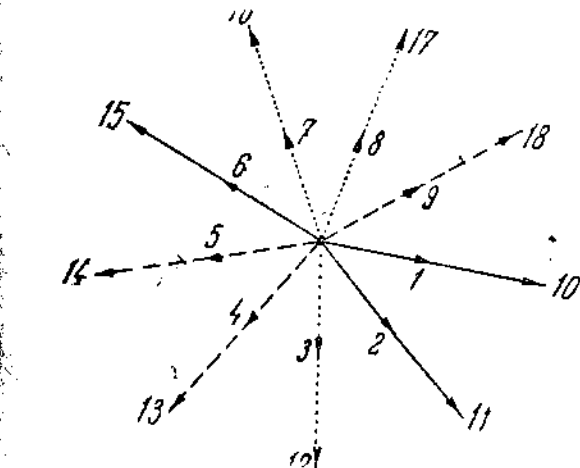


Рис. 52. Векторная диаграмма для обмотки рис. 51.

При $d = p$ и Z_d четном обмотка превращается в обмотку с целым числом впадин на полюс и фазу; векторная диаграмма такой обмотки

а)

Полюс	Фаза А	Фаза С	Фаза В
1	N	1	2
	S	6	7
2	N	10	11
	S	15	16

б)

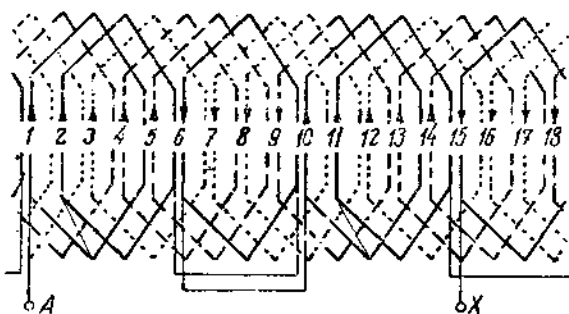


Рис. 51. Обмотка с дробным q , $m = 3$, $q = 1\frac{1}{2}$, $p = 2$, $d = p = 2$.

При Z_d четном в электрическом отношении обмотка разбивается на d частей, совершенно аналогичных друг другу.

имеет Z/p лучей, причем на каждом луче находится p векторов. При Z , нечетном имеем q дробное.

Однослойная обмотка с дробным числом впадин на полюс и фазу при Z нечетном выполняема только в виде стержневой; при Z четном возможна катушечная обмотка, однако, большей частью все катушки имеют разную форму и ширину. Для распределения проводников по фазам можно воспользоваться способом, приведенным на рис. 49, а, однако, для возможности выполнения однослойной катушечной обмотки часто приходится отступать от распределения, получаемого по способу рис. 49, а.

а)

Полюса	Фаза А	Фаза С	Фаза В
1 N	1	2	3
S		4	5
2 N	6	7	8
S		9	10
3 N	11	12	
S	13	14	15
4 N		16	17
S	18	19	20
5 N		21	22
S	23	24	

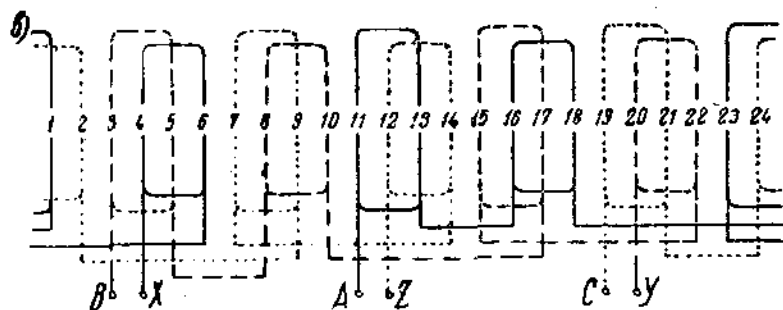


Рис. 53. Катушечная обмотка с дробным q : $m = 3$, $q = 4/5$, $p = 5$.

На рис. 53 приведена катушечная однослойная обмотка для

$$q = \frac{24}{2 \times 5 \times 3} = \frac{4}{5}.$$

Для получения всех катушек одинаковыми можно сконструировать обмотку с целым числом впадин для соседнего числа полюсов (например, обмотку с $q = 2$ для $p = 12$) и применить ее для данного p (например, $q = 14$, тогда $q = 2 \times \frac{12}{14} = 1 \frac{5}{7}$).

К недостаткам обмоток с дробным числом впадин на полюс и фазу следует отнести несимметрию кривой м. д. с. (§ 71), создаваемой этой обмоткой.¹⁾

¹⁾ Литература по обмоткам с дробным числом впадин на полюс и фазу: 1) R. Richter. Ankerwicklungen für Gleich und Wechselstrommaschinen. Berlin 1920; 2) G. Rasch. Ein Beitrag zum Studium der Bruchlochwicklungen. E.T.Z. 1926, стр. 1352; 3) J. Tittel. Neuartige Wicklungen für Wechselstrommaschinen. E.T.Z. 1928, стр. 1103; 4) T. Seike. Die einfache Ausführung der Bruchloch-Ankerwicklungen für Wechselstrom. E. u. M. 1931, стр. 21, 139; 5) H. de Pistoye. Bobinages à courant alternatif à trous partiels. R. G. E. 1923, т. 14, стр. 798.

48*. Двойные обмотки. ¹⁾

В генераторах большой мощности (100 MVA и выше) сила тока получается настолько большой, что изготовление аппаратуры (масляных выключателей и пр.) для этих генераторов становится очень затруднительным. Аварии в сетях, питаемых такими мощными генераторами, весьма опасны и разрушительны. Уменьшение тока путем повышения напряжения генератора оказывается невыгодным по целому ряду причин (§ 227).

Для упрощения условий коммутации системы в последнее время применяют генераторы большой мощности с двумя обмотками. На статоре генератора уложены две одинаковых, не связанных электрически обмотки; каждая обмотка включена на отдельную секцию электрической системы (рис. 54).

Поэтому вся аппаратура должна быть взята на половину полного

тока генератора. Аварии в системе принимают менее разрушительный характер, так как отдельные секции системы связаны между собою только магнитным путем — через общий поток, пронизывающий обе обмотки генератора.

Двойные обмотки должны удовлетворять следующим требованиям: 1) напряжения в каждой обмотке должны находиться в фазе, так как обе обмотки работают на одну систему (хотя каждая обмотка включена

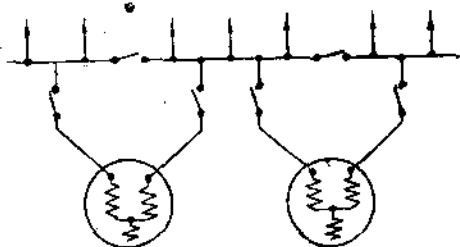


Рис. 54. Схема включения генератора с двойной обмоткой.

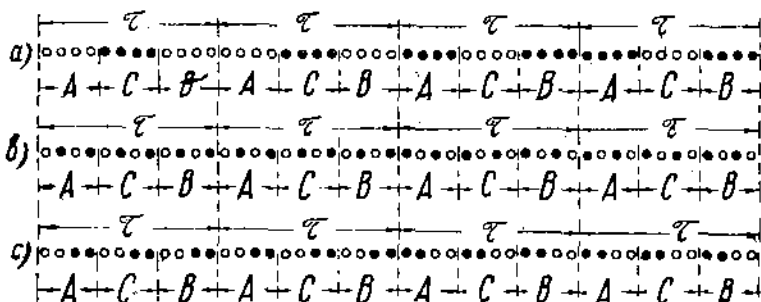


Рис. 55. Двойные обмотки: а) чередование через q полюсов, б) чередование через 1 полюс, в) чередование через $q/2$ полюсов; $m = 3$, $q = 4$, $p = 2$; светлые кружки — проводники одной обмотки; черные — другой.

на разные секции, необходимо, во-первых, иметь возможность переключать фидеры с одной секции на другую, во-вторых, должна быть возможна работа нескольких генераторов параллельно на одну секцию (рис. 54); 2) при установившемся режиме генератор должен работать при максимальной неравномерности нагрузок обеих обмоток, не перегреваясь (предел неравномерности ставится обычно нагревом ротора, § 228); при ненагруженной одной обмотке вторая обмотка обычно может доставлять около 60% полной мощности генератора; 3) при аварии в одной секции системы напряжение в обмотке, приключенной к другой секции, не должно

¹⁾ Для лучшего усвоения этого параграфа рекомендуется прочитать предварительно главы IV и V.

сильно понижаться и мощность не должна передаваться из неповрежденной секции в поврежденную. Удовлетворить одновременно второму и третьему условиям практически затруднительно.

Существует три типа двойных обмоток. Рассмотрим сначала однослойные обмотки.

а) Проводники отдельных обмоток чередуются пофазно, т. е. через q впадин (рис. 55,а); на рисунке светлыми кружками обозначены проводники одной обмотки, черными — проводники другой обмотки. На рис. 56,а изображена первая фаза одной (сплошные линии) и другой (пунктирные) обмотки.

б) Проводники отдельных обмоток чередуются через каждую впадину (рис. 55,б и 56,б).

в) Промежуточный тип между первыми двумя — проводники каждой обмотки чередуются через группу впадин, обычно через половину впадин одной фазы $q/2$ (рис. 55,с и 56,с). Для выполнения первого условия — одинаковой фазы напряжений в обеих обмотках — обе обмотки должны лежать в одинаковых магнитных условиях; для этого каждая фаза под половиной полюсов должна начинаться с проводников, принадлежащих к одной обмотке, а под другой половиной полюсов — с проводников второй обмотки (рис. 55 и 56). Для выполнения второго условия кривая м. д. с. от каждой обмотки в отдельности должна быть близкой к синусоиде (§ 72); для этого проводники каждой обмотки должны быть распределены равномерно по всей окружности статора. Этому удовлетворяет, очевидно, в наибольшей степени обмотка с чередованием через 1 впадину (рис. 56,б) и в меньшей степени обмотка с чередованием через $q/2$ впадин (рис. 56,с); обмотка с чередованием через q впадин этому условию не удовлетворяет. Для выполнения третьего условия обмотки должны иметь минимальное число магнитных линий потока рассеяния, сцепляющихся с обеими обмотками (§ 228). Этому условию лучше всего удовлетворяет обмотка с чередованием через q впадин, в меньшей степени — обмотка с чередованием через $q/2$ и еще меньше — с чередованием через 1 впадину.

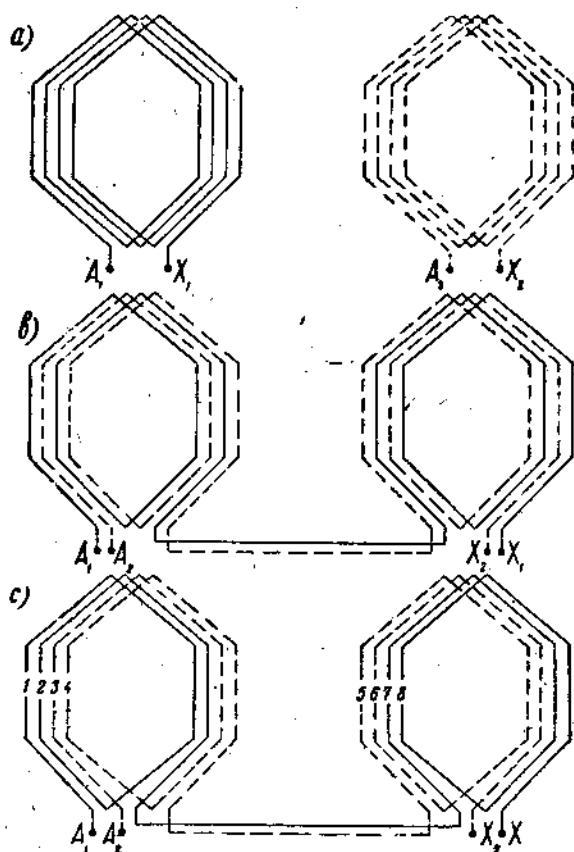


Рис. 56. Схема одной фазы двойной обмотки: а) чередование через q впадин, б) чередование через 1 впадину, в) чередование через $q/2$ впадин; сплошные линии — проводники одной обмотки, пунктирные — другой.

двойной обмотки должны быть распределены равномерно по всей окружности статора. Этому удовлетворяет, очевидно, в наибольшей степени обмотка с чередованием через 1 впадину (рис. 56,б) и в меньшей степени обмотка с чередованием через $q/2$ впадин (рис. 56,с); обмотка с чередованием через q впадин этому условию не удовлетворяет. Для выполнения третьего условия обмотки должны иметь минимальное число магнитных линий потока рассеяния, сцепляющихся с обеими обмотками (§ 228). Этому условию лучше всего удовлетворяет обмотка с чередованием через q впадин, в меньшей степени — обмотка с чередованием через $q/2$ и еще меньше — с чередованием через 1 впадину.

Двухслойные обмотки имеют обычно укороченный шаг; наилучшее укорочение до $\frac{2}{3}\tau$. При диаметральном шаге для удобства выполнения лобовых частей желательно нижний слой проводников, расположенных в

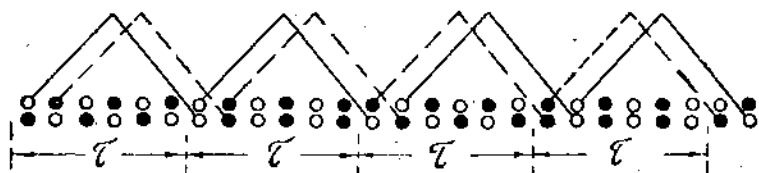


Рис. 57. Схема лобовых соединений двойной обмотки.

том же порядке, как и верхний, сдвинуть на полюсное деление (рис. 57), но при этом проводники разных обмоток будут встречаться в большом числе впадин, что противоречит третьему условию. Если же не делать сдвига нижнего слоя по отношению к верхнему, то лобовые части необ-

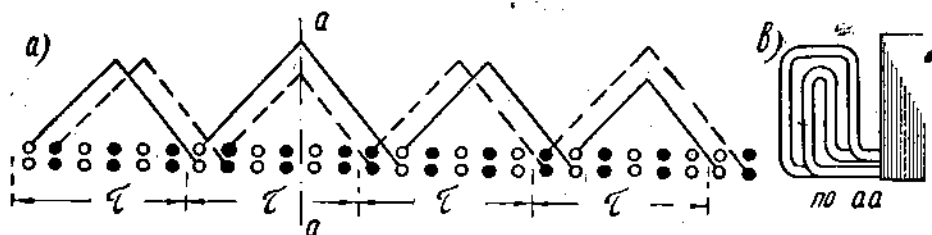


Рис. 58. Схема лобовых соединений двойной обмотки.

ходимо располагать в четырех плоскостях (рис. 58). При выполнении лобовых частей в двух плоскостях можно уменьшить число впадин, в которых встречаются проводники обеих обмоток, если сделать укорочение шага.

На практике обычно применяют обмотку с чередованием через $q/2$ впадин, так как она лучше всего удовлетворяет всем трем условиям.¹⁾ Подробнее о свойствах двойных обмоток см. §§ 72, 228.

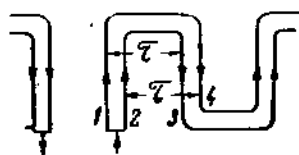


Рис. 59. Концентрические катушки, соединенные параллельно.

49*. Параллельные ветви обмотки.

При большой силе тока машины для уменьшения сечения проводников обмотку иногда разбивают на несколько параллельных ветвей. В машинах переменного тока для

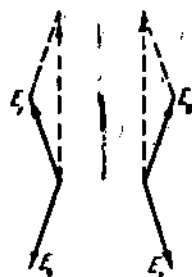


Рис. 60. Векторная диаграмма к рис. 59.

избежания уравнивающего тока между параллельными ветвями напряжения в каждой ветви должны быть одинаковы не только по величине, но и по фазе. Для этого каждая параллельная ветвь должна находиться в одинаковых магнитных условиях и иметь одинаковое сопротивление

¹⁾ Литература по двойным обмоткам: 1) D. D. Chase and H. C. Forbes. The Double Winding Generator. El. W., декабрь 1928, стр. 1183; 2) T. F. Barton. The Double Winding Generator. G. E. R., 1929, стр. 302; 3) Ph. L. Alger, E. H. Freiburghouse and D. D. Chase. Double Windings for Turbine Alternators. Tr. A. I. E. E., январь 1930, стр. 226; 4) R. E. Powers and L. A. Kilgore. System Characteristics Govern the Selection of Double Winding Generators. El. J., 1930, стр. 107.

(содержать катушки, одинаковые по форме). Обычно включают параллельно ветви, лежащие под разными полюсами; при включении параллельно ветвей, лежащих под одними полюсами, применяют концентрические катушки (рис. 59), причем ширина одной катушки больше полюсного деления τ , а другой — на такую же величину меньше. Э. д. с. двух таких катушек всегда находятся в фазе (рис. 60).

50. Форма лобовых частей обмотки.

В предыдущих параграфах уже говорилось о форме лобовых соединений. По конструкции их можно разделить на две группы.

а) **Распределенные лобовые соединения.** Эти соединения применяют в однослойных обмотках, выполняемых по основной схеме, и в двухслойных обмотках. Распределенные лобовые соединения выполняют аналогично лобовым соединениям обмоток постоянного тока: на половине длины

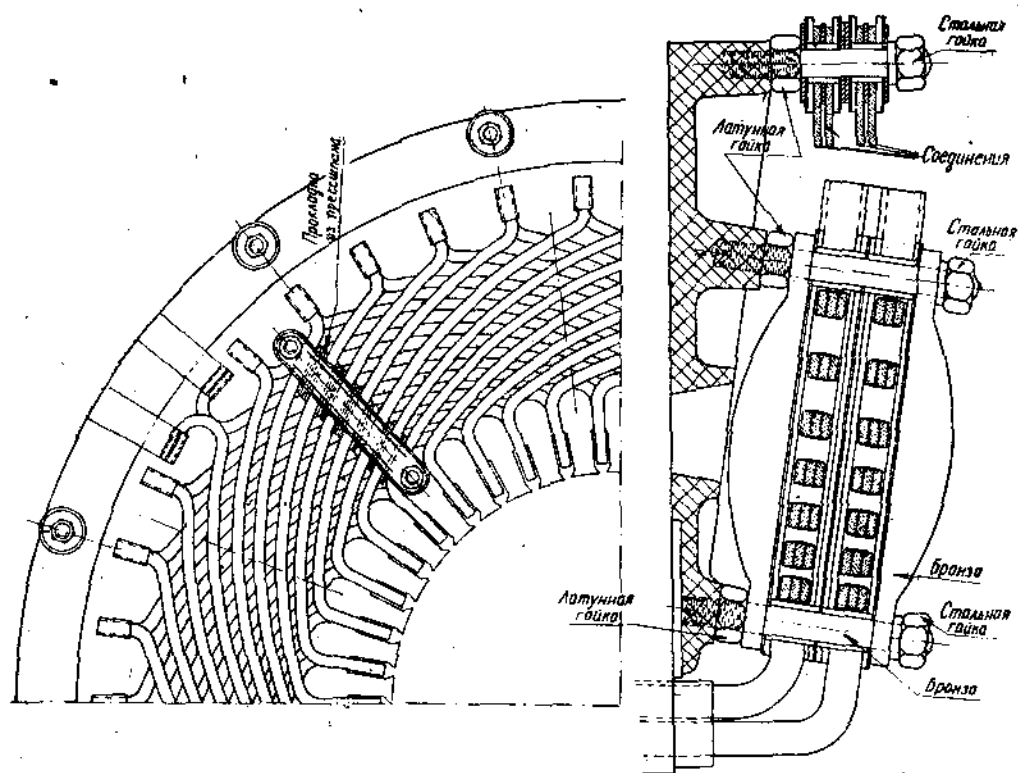


Рис. 61. Лобовые соединения турбогенератора фирмы Bréguet, 1500 kVA, 120 V, 3000 об./мин.

соединение расположено в одном слое, затем переходит в другой путем изгиба или при помощи соединительного хомутика (рис. 61 и 62). В генераторах европейской конструкции лобовые соединения располагают обычно в плоскости, параллельной торцевой поверхности статора (рис. 62); в генераторах американской конструкции лобовые части располагают обычно по образующей конуса (рис. 63). Обмотки с таким выполнением лобовых соединений у нас получили название американских. Конструкция лобовых соединений стержневой обмотки приведена на рис. 62. В катушечной обмотке необходимо делать соединения для каждого из витков

катушки; обычно соединения расположены в том же порядке, как и проводники во впадине, а в месте перехода соединения из одного слоя в другой делают все необходимые пересоединения отдельных витков между

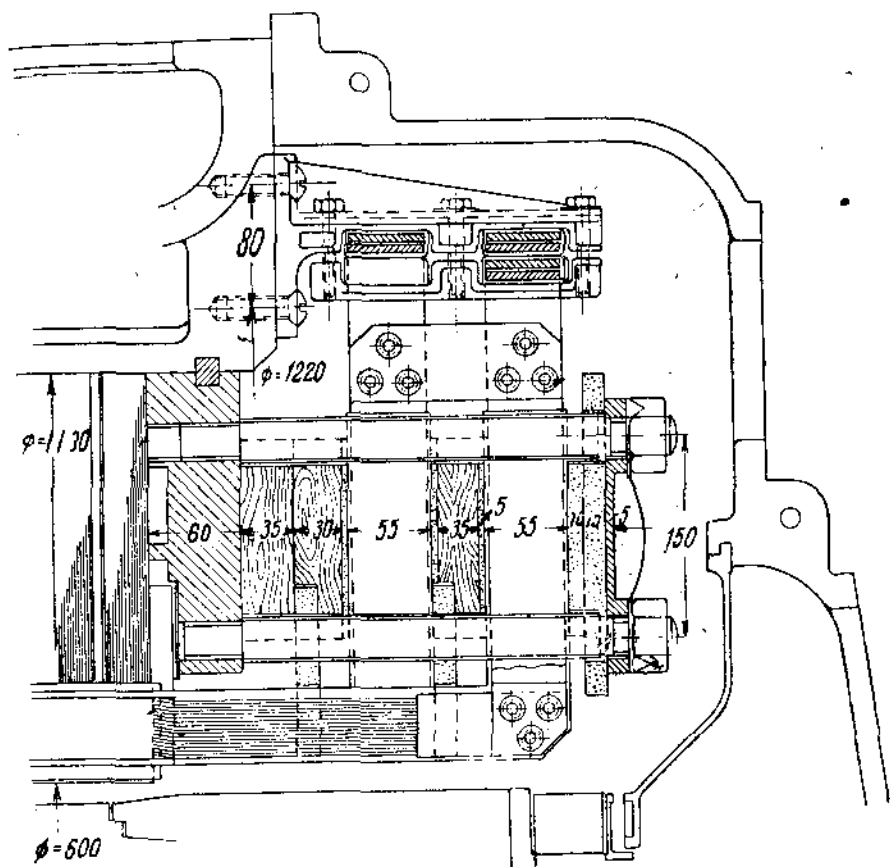


Рис. 62. Лобовые соединения турбогенератора завода „Электросила“, 1250 kVA, 525 V, 3000 об./мин.

собой (рис. 64). На рис. 65,а приведены схемы пересоединений витков с задней стороны, а на рис. 65,б — с передней. Специальные типы пересоединений витков см. § 211. Распределенные лобовые соединения располагают иногда в четырех плоскостях (рис. 66) для того, чтобы уменьшить вылет их в радиальном направлении.

б) **Концентрические лобовые соединения.** Эти соединения применяют в обмотках, выполненных по первой и второй модификациям. Здесь соединения отдельных катушек охватывают друг друга, почему они и называются концентрическими (рис. 67). В трехфазных машинах для того, чтобы расположить соединения всех трех фаз по окружности статора, соединения располагают в двух или трех плоскостях (этажах). Все соединения отгибают в плоскости, параллельные торцевой

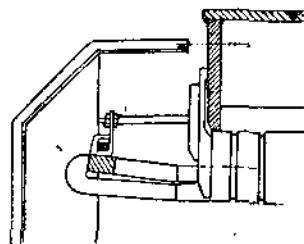


Рис. 63. Лобовые соединения американской обмотки.

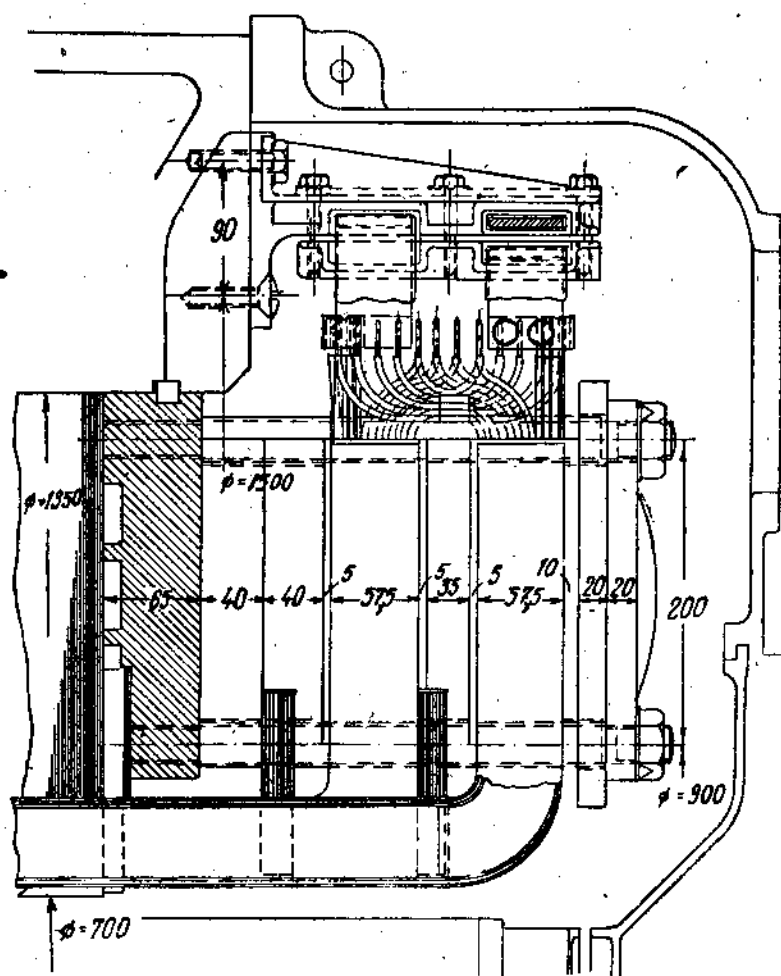


Рис. 64. Лобовые соединения турбогенератора завода „Электросила“, 3750 kVA, 2200 V, 3000 об./мин.

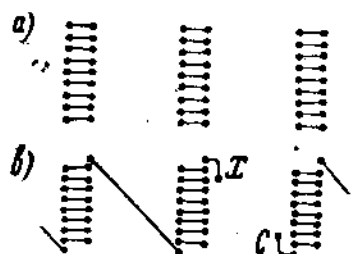


Рис. 65. Соединения между отдельными витками катушки.



Рис. 66. Расположение лобовых соединений в четырех плоскостях.

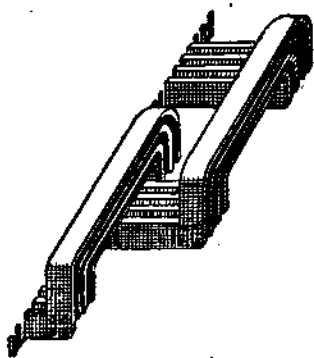


Рис. 67. Концентрические лобовые соединения, расположенные в двух плоскостях.



Рис. 68. Расположение концентрических лобовых соединений в трех плоскостях.



Рис. 69. Расположение концентрических лобовых соединений в двух плоскостях.

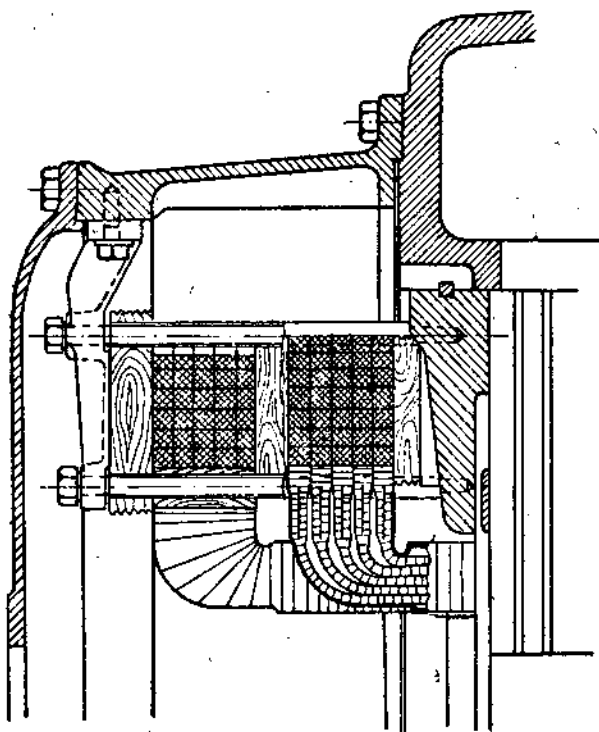


Рис. 70а. Лобовые соединения турбогенератора (см. рис. 70,б).

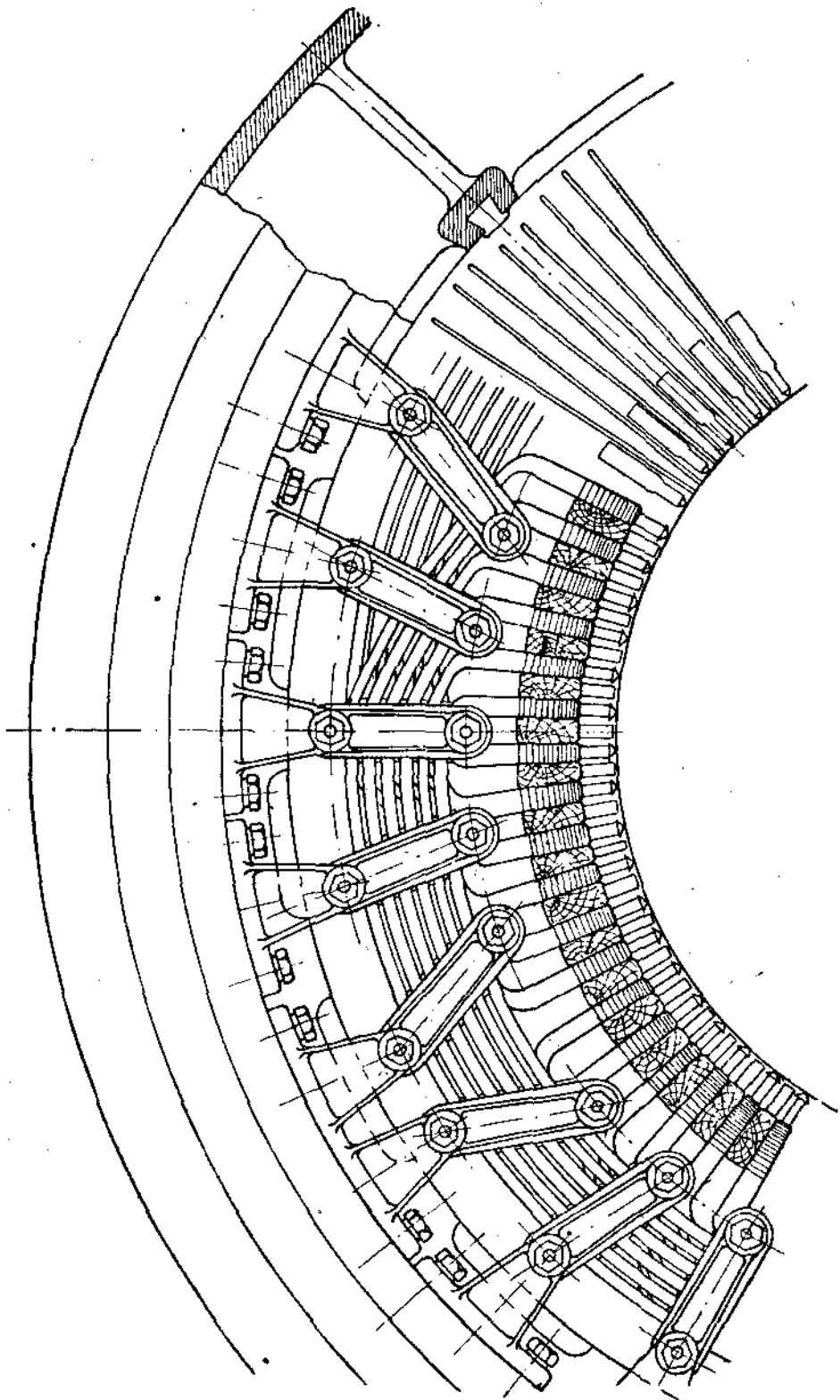


Рис. 70в. Лобовые соединения турбогенератора 17000 кВА, 11000 V, 1500 об./мин.

поверхности статора (рис. 68, *б* и 69, *с*) или располагают аналогично рис. 68, *а* и 69, *а* и *б*. Конструкция лобового соединения приведена на рис. 70. В небольших машинах лобовые соединения представляют одно целое с проводниками, уложенными во впадине; в больших машинах они выполнены из медных полос, присоединенных к активным частям проводников (§ 51).

51. Конструктивное выполнение обмоток.

Обычно катушка обмотки синхронных машин укладывается во впадины в целом заизолированном виде, вследствие чего впадины статора делают открытыми, по одной из форм, изображенных на рис. 71. Впадина закрывается деревянным клином или, иногда, для уменьшения пульсаций потока, железным, собранным из листов на заклепках из плохо проводящего электрический ток материала. Все проводники одной катушки имеют общую изоляцию от железа впадины. При высоком напряжении эту изоляцию выполняют из миканита в виде сплошной гильзы, не имеющей шва, запрессованной в горячем состоянии вокруг индуктируемой стороны катушки. В зависимости от напряжения гильза выступает из впадины по длине машины на $5 \div 10$ см с каждой стороны. Подобной же гильзой снабжают и стержневые обмотки; двухслойные обмотки имеют отдельную гильзу для каждого слоя. При низком напряжении изоляцию от железа впадины выполняют из пресшпана и эксцельсиора. В машинах, имеющих катушки или витки небольшой величины, лобовые соединения представляют одно целое с проводниками, утопленными во впадинах. При катушках или витках большой величины лобовые соединения изготовляют отдельно и привинчивают или приклепывают (обычно с последующей запайкой) к активным частям проводников, уже уложенных во впадины (рис. 62). Иногда активные проводники изготовляют в виде полувитков: активный проводник и половина лобового соединения с одной и с другой стороны статора представляют одно целое (рис. 61). Изоляцию лобовых частей производят обычно микафолием и хлопчатобумажной лентой. Для предотвращения возможных деформаций и повреждений лобовых частей обмотки при внезапных коротких замыканиях (§ 192) лобовые соединения большой длины всегда укрепляют болтами и нажимными планками так, чтобы совершенно уничтожить возможность какого-либо перемещения лобовых частей (рис. 61—64 и 70). Расстояния между лобовыми частями отдельных фаз и между ними и железом обусловлены как напряжением машины, так и стремлением уменьшить величину электромагнитных сил, действующих на лобовые соединения. Между лобовыми соединениями отдельных катушек обычно оставляют промежутки для лучшего охлаждения. В американских обмотках лобовые соединения вследствие своего расположения по образующей конуса обычно имеют жесткость, вполне достаточную для выдерживания усилий при внезапном коротком замыкании. Поэтому эти обмотки в большинстве случаев не требуют специального крепления лобовых частей, что является большим преимуществом обмоток этого типа по сравнению с другими обмотками.

Стержни большого сечения для уменьшения потерь от токов Фуко в меди никогда не делают сплошными; их разбивают на ряд отдельных проводников небольшого сечения, расположенных иногда не параллельно, а перевитых специальным образом (§ 211).

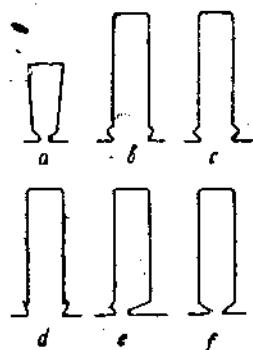


Рис. 71. Формы впадин статора.

ГЛАВА IV.

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

52. Общие замечания.

Ко всякой синхронной машине предъявляют требование синусоидального изменения во времени ее э. д. с. При несинусоидальном изменении путем разложения в ряд Фурье э. д. с. можно представить в виде суммы основной и высших гармоник. В то время как основная гармоника э. д. с. создает вращающий момент в асинхронных двигателях, высшие гармоники

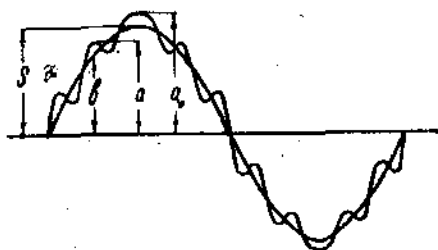


Рис. 72. К определению синусоидальности кривой.

увеличивают потери и дают некоторый тормозящий момент.¹⁾ В случае емкостного сопротивления линии высшие гармоники могут достигать величин, опасных для прочности изоляции машины (§ 63). Отсюда появилось требование уничтожения высших гармоник, т. е. приближения формы кривой э. д. с. к чистой синусоиде. При вычислении э. д. с. синхронной машины важно поэтому знать не только действующее значение э. д. с., но и форму ее кривой.

По нормам IX В. Э. С. кривая считается практически синусоидальной, если ни одна из ее ординат a не отличается от соответствующей ординаты b основной синусоиды более, чем на 5% амплитудного значения S основной синусоиды (рис. 72). Для определения основной синусоиды должны быть использованы, по меньшей мере, 12 точек кривой. Для кривых, которые во все четверти периода симметричны, амплитуда основной синусоиды S выражается формулой:

$$S = \frac{a_0 + \sqrt{3}a_1 + a_2}{3},$$

где a_0 — наибольшее значение ординаты действительной кривой, а a_1 и a_2 — значения ординат, отстоящих от ординаты a_0 на $1/12$ и $2/12$ периода.

53. Электродвижущая сила одного проводника.

Мгновенное значение э. д. с. одного проводника по общей формуле (§ 4) равно:

$$e = B_x l v 10^{-8} \text{ вольт; } \quad (2c)$$

¹⁾ L. A. Doggett and E. R. Queer. Induction Motor Operation with Non-Sinusoidal Impressed Voltages, Tr. A. I. E. E. 1929, № 4, стр. 1217.

здесь B_x — индукция в гауссах в том месте окружности статора, где в данный момент находится проводник, l — длина в см активной части проводника, т. е. части, подверженной действию магнитного потока; v — скорость проводника в м/сек. относительно магнитного потока. Если проводник неподвижен, а вращаются полюса (нормальная конструкция синхронных машин), то v представляет собою окружную скорость полюсов. Направление э. д. с. определяется по правилу правой ладони (§ 5). Вследствие периодического изменения полярности потока в месте расположения проводника при непрерывном вращении полюсов э. д. с. получается переменной. Один период э. д. с. соответствует прохождению под проводником одной пары полюсов. В многополюсной машине за один оборот ротора под проводником проходит p пар полюсов, чему соответствует p периодов; отсюда число периодов в секунду, или частота э. д. с., равно:

$$\nu = \frac{pn}{60}; \quad (29a)$$

здесь $n/60$ — число оборотов ротора в секунду.

Так как обычно l и v постоянны, то изменение э. д. с. e во времени пропорционально изменению индукции B_x в месте расположения проводника. На рис. 73 представлена кривая изменения индукции в между-железном пространстве. При постоянной скорости v движения проводника относительно полюсов кривая изменения э. д. с. проводника во времени имеет ту же самую форму, что и кривая изменения индукции в междужелезном пространстве, отличаясь от последней лишь масштабом.

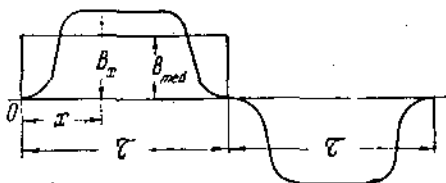


Рис. 73. Кривая индукции в между-железном пространстве.

Максимальное значение э. д. с. равно:

$$E_{\max} = B_{\max} lv 10^{-8} \text{ вольт}; \quad (34)$$

среднее значение э. д. с. за половину периода равно:

$$E_{\text{med}} = B_{\text{med}} lv 10^{-8} \text{ вольт}; \quad (35)$$

здесь $B_{\max}$ — максимальное, а B_{med} — среднее значение индукции. Для получения B_{med} надо вычислить площадь кривой индукции и разделить ее на основание, т. е. на положительное деление τ (рис. 73).

Действующее значение э. д. с. есть среднее квадратичное из квадратов мгновенных значений за период:

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}. \quad (15a)$$

Обращаясь к уравнению (2с) и принимая во внимание, что l и v постоянны, а одному периоду T соответствует двойное полюсное деление 2τ , получаем

$$E = lv 10^{-8} \sqrt{\frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} B_x^2 dx} = B lv 10^{-8}; \quad (36)$$

здесь B — действующее значение индукции под полюсом:

$$B = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B_x^2 dx}.$$

Обычно действующее значение индукции выражают через среднее; если отношение B/B_{med} обозначить через f_B , то

$$B = f_B B_{\text{med}}; \quad (37)$$

тогда действующее значение э. д. с.

$$E = f_B B_{\text{med}} lv 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (38)$$

Так как окружная скорость v равна:

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{2\pi p n}{60} = 2\pi v, \quad (39)$$

где D_1 — внутренний диаметр статора, $\pi D_1 = 2\pi p$ — длина окружности, $v = pn/60$ — частота, а величина $B_{\text{med}} lv$ (произведение средней индукции на площадь, по которой она распределена) представляет собою полный поток, выходящий из полюса:

$$\Phi = B_{\text{med}} l\tau, \quad (40)$$

то выражение для действующего значения э. д. с. одного проводника при любом распределении индукции принимает следующий вид:

$$E = 2f_B \Phi v 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (41)$$

Коэффициент $f_B = B/B_{\text{med}}$, равный отношению действующего значения индукции к среднему, носит название коэффициента формы поля (§ 54).

При синусоидальном распределении индукции в междужелезном пространстве ($B_x = B_{\text{max}} \sin x$) изменение э. д. с. во времени тоже синусоидально:

$$e = B_{\text{max}} lv \sin x 10^{-8} = B_{\text{max}} lv \sin \omega t 10^{-8}; \quad (42)$$

здесь B_{max} — максимальное значение индукции; x — перемещение проводника относительно полюсов; в этой формуле x , очевидно, надо выражать не в линейных единицах, а в дуговых (в эл. градусах или в эл. радианах); при равномерной скорости $x = \omega t$, ω — угловая скорость, t — время. Синусоидальное распределение индукции в междужелезном пространстве на практике встречается редко.

54. Коэффициент формы поля.

При заданной кривой поля коэффициент $f_B = B/B_{\text{med}}$ может быть вычислен либо аналитически, либо графически. При графическом определении f_B строят квадратичную кривую индукции путем возведения в квадрат всех ординат основной кривой (рис. 74) и находят среднее значение квадратичной кривой, равное площади ее, поделенной на основание τ . Действующее значение индукции находят как корень квадратный

из среднего значения квадратичной кривой. Коэффициент формы поля получается делением действующего значения на среднее значение основной кривой.

Для прямоугольника коэффициент формы поля равен 1; для остальных кривых он всегда больше 1, причем имеет тем большее значение, чем острее кривая. Для синусоиды f_B легко вычислить аналитически: среднее значение синусоиды за половину периода, выраженное через амплитуду, равно:

$$B_{\text{med}} = \frac{2}{\pi} B_{\text{max}}; \quad (16a)$$

действующее значение синусоиды, выраженное через амплитуду, равно:

$$B = \frac{B_{\text{max}}}{\sqrt{2}}; \quad (15b)$$

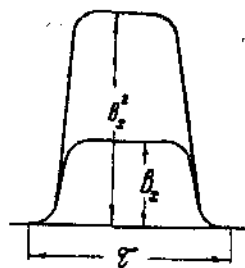


Рис. 74. К вычислению коэффициента формы поля.

отсюда коэффициент формы поля для синусоиды:

$$f_B = \frac{B}{B_{\text{med}}} = \frac{\pi B_{\text{max}}}{2\sqrt{2} B_{\text{max}}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11. \quad (43)$$

55. Электродвижущая сила витка и катушки.

Рассмотрим виток с диаметральной шаг (§ 38), образованный встречным включением двух проводников. Электродвижущие силы каждого из проводников, составляющих виток, равны по величине и сдвинуты по фазе на 180 эл. градусов, вследствие чего э. д. с. витка в 2 раза больше э. д. с. одного проводника (§ 35), т. е. равна:

$$E = 4f_B \Phi v 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (44)$$

Катушка образуется последовательным соединением w_s витков, поэтому э. д. с. катушки с диаметральной шагом равна:

$$E = 4f_B \Phi w_s 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (45)$$

Подставляя здесь $f_B = 1,11$ (§ 54), получаем э. д. с. катушки с диаметральной шагом при синусоидальном поле:

$$E = 4,44 \Phi w_s 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (46)$$

Так как каждая индуктируемая сторона катушки содержит w_s проводников, причем в любой катушке э. д. с. каждого из этих проводников равны по величине и совпадают по фазе, то э. д. с. индуктируемой стороны катушки в w_s раз больше э. д. с. одного проводника, а по фазе совпадает с ней. Практически при различных вычислениях и построениях оперируют обычно с э. д. с. индуктируемой стороны катушки, не разбивая ее на э. д. с. отдельных проводников.

В катушке или витке с укороченным шагом э. д. с. каждой индуктируемой стороны сдвинуты по фазе не на 180 эл. градусов, а на угол, больший или меньший 180°. Пусть катушка имеет шаг $y < \tau$ (рис. 75,а); тогда при синусоидальном поле э. д. с. индуктируемых сторон катушки сдвинуты по фазе на угол $\frac{\pi}{\tau} y$ (угол π соответствует диаметральному

шагу, т. е. расстоянию τ по окружности статора; очевидно, расстоянию y соответствует угол $\pi \frac{y}{\tau}$). Электродвижущая сила катушки равна геометрической разности э. д. с. индуктируемых сторон (§ 35); следовательно, в рассматриваемой катушке с укороченным шагом э. д. с. равна отрезку AB (рис. 75, б):

$$E = \overline{AB} = 2\overline{AC} = 2\overline{OA} \cos \frac{\epsilon}{2};$$

здесь угол ϵ равен:

$$\epsilon = \frac{\pi(\tau - y)}{\tau}.$$

Так как $\overline{OA}$ представляет собою э. д. с. одной индуктируемой стороны катушки, а $2\overline{OA}$, очевидно, равно э. д. с. катушки с диаметральной шагом, то э. д. с. катушки с укороченным шагом равна:

$$E_1 = 4,44 \Phi \omega_s \cos \frac{\epsilon}{2} \cdot 10^{-8} \quad (47)$$

или, обозначая $\cos \frac{\epsilon}{2}$ через f_s :

$$E = 4,44 f_s \Phi \omega_s \cdot 10^{-8}; \quad (48)$$

коэффициент f_s называется коэффициентом укорочения шага (§ 59).

При несинусоидальном поле для вычисления э. д. с. катушки с укороченным шагом необходимо разложить кривую индукции на основную и высшие гармоники. Для каждой из гармоник можно построить векторную диаграмму аналогично рис. 75, б и вычислить коэффициент укорочения шага (§ 59).

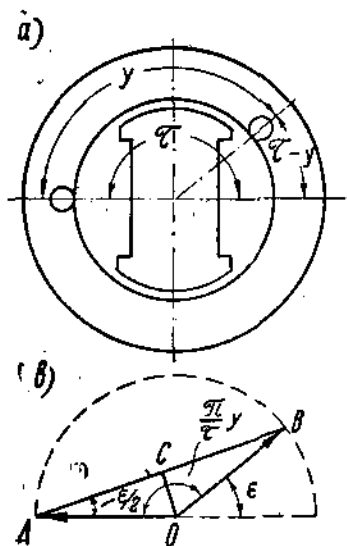


Рис. 75. К вычислению коэффициента укорочения шага.

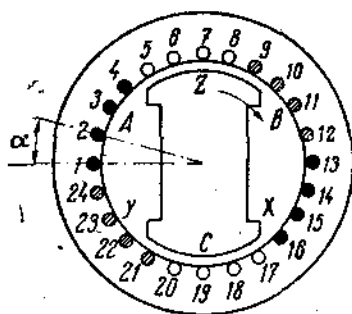


Рис. 76. К вычислению э. д. с. q катушек.

56. Электродвижущая сила двухполюсной машины при синусоидальном поле.

Увеличивая число витков в катушке, мы во столько же раз увеличиваем ее э. д. с. Такому увеличению, однако, имеется предел, обусловленный размерами впадин. Для дальнейшего увеличения э. д. с. приходится

переходить к последовательному включению двух, трех и т. д. катушек, помещенных в соседних впадинах. Если все катушки имеют одинаковые числа витков, то э. д. с. всех катушек равны по величине, по фазе они сдвинуты; так, в катушке 2 (рис. 76) э. д. с. отстает от э. д. с. катушки 1 на угол α эл. градусов (максимум э. д. с. в ней будет позже, чем в катушке 1, на время, соответствующее повороту полюсов на угол α/p простран-

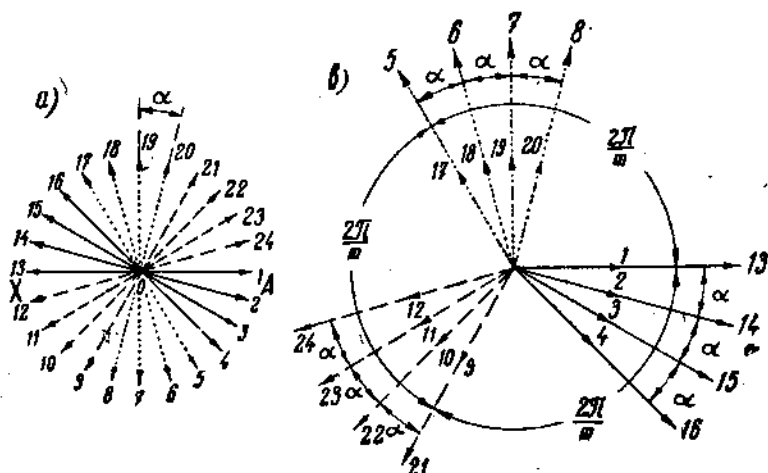


Рис. 77. Векторные диаграммы для обмотки рис. 76.

градусов). Поэтому при последовательном соединении таких катушек их э. д. с. складываются не арифметически, а геометрически. Геометрическая сумма векторов, сдвинутых друг от друга на угол α , всегда меньше арифметической суммы. Следовательно, распределение обмотки в нескольких смежных впадинах менее выгодно с точки зрения увеличения э. д. с., чем расположение ее в двух впадинах. Однако, на такое распределение обмотки

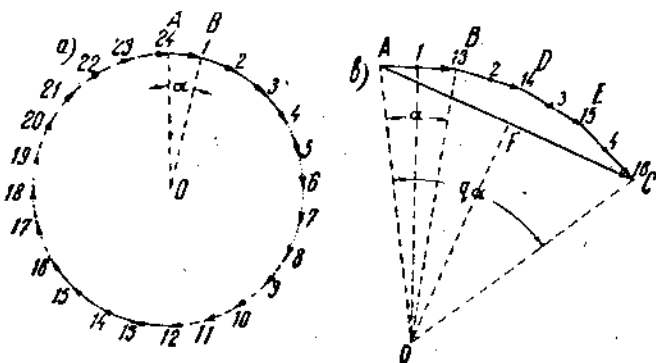


Рис. 78. Сложение векторов э. д. с. рис. 77.

приходится идти из конструктивных соображений; кроме того, распределение обмотки в нескольких впадинах, как увидим ниже (§ 64), способствует улучшению формы кривой э. д. с., что является весьма ценным свойством.

Рассмотрим обмотку двухполюсной машины, имеющую $Z=2Q=2mq$ впадин или q впадин на полюс и фазу (рис. 76). Угол между впадинами равен $\alpha = \pi/Q$. Если изобразить э. д. с. индуктируемых сторон катушек, расположенных во впадинах, в виде векторов, то получим симметричную

звезду, имеющую $2Q$ лучей; угол между лучами $\alpha = \pi/Q$ эл. градусов (рис. 77,а). Два луча, лежащие на одном диаметре, представляют собою э. д. с. индуктируемых сторон одной катушки с диаметральной шагом. Прибавляя к вектору $\overline{OA}$ (соответствующему началу катушки) вектор $\overline{OX}$ (соответствующий концу катушки) с обратным знаком, получаем вектор $\overline{XA}$, изображающий по фазе и величине э. д. с. катушки. Поступая таким же образом для всех катушек, получим диаграмму (рис. 77,б), имеющую Q лучей с углами сдвига, указанными на рисунке. Суммируя векторы э. д. с. в той последовательности, в какой расположены катушки на поверхности статора, получим из рис. 77,а замкнутый многоугольник, а из каждой фазы рис. 77,б часть многоугольника, подобного первому (рис. 78). Число сторон многоугольников равно $2Q$, центральный угол AOB в каждом из них равен $\alpha = \pi/Q$. (На рис. 78 длины векторов взяты меньшие, чем на рис. 77). В фазной обмотке последовательно соединены q катушек; следовательно, э. д. с. одной фазы обмотки E равна геометрической сумме q векторов, т. е. отрезку $\overline{AC}$ (рис. 78,б). Геометрическую сумму э. д. с. q катушек выражают обычно через арифметическую сумму этих же э. д. с. Обозначим геометрическую сумму через E ; арифметическая сумма равна qE' , где E' — э. д. с. одной катушки (вектор $\overline{AB}$). Обозначив отношение геометрической суммы к арифметической через $f_m = E/qE'$, получим

$$E = f_m q E' = 4,44 f_m \Phi \omega q 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (49)$$

Эта формула дает э. д. с. обмотки, распределенной в нескольких впадинах; она справедлива как для одной фазы многофазной машины, так и для однофазной машины. Коэффициент f_m равен:

$$f_m = \frac{E}{qE'} = \frac{\text{геометрическая сумма э. д. с. } q \text{ отдельных катушек}}{\text{арифметическая сумма тех же э. д. с.}} \quad (50)$$

Коэффициент f_m называют коэффициентом распределения обмотки.

Если этот коэффициент известен, то вычисление э. д. с. весьма просто: вычисляется арифметическая сумма э. д. с. отдельных катушек (что не представляет затруднений) и умножается на коэффициент распределения обмотки:

$$E = 4,44 f_m \Phi \omega q 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (49a)$$

Определение f_m см. § 60.

57. Электродвижущая сила многополюсной машины при синусоидальном поле.

В многополюсной машине при целом числе впадин на полюс и фазу q обмотки каждой пары полюсов содержат одинаковые числа проводников и совершенно одинаково расположены относительно полюсов (§ 47). Вследствие этого э. д. с. обмоток каждой пары полюсов одинаковы по величине и по фазе. При последовательном включении обмоток всех p пар полюсов э. д. с. всей обмотки машины равна арифметической сумме э. д. с. обмоток отдельных пар полюсов, т. е. в p раз больше э. д. с. одной пары полюсов:

$$E = 4,44 f_m \Phi \omega q p 10^{-8}.$$

Величина ωp равна полному числу витков одной фазы: $\omega p = \omega$. Следовательно:

$$E = 4,44 f_m \Phi \omega q 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (51)$$

Если обмотка имеет укороченный шаг, то э. д. с. равна:

$$E = 4,44 f_m f_w \Phi_v \omega 10^{-8} = 4,44 f_w \Phi_v \omega 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (52)$$

Коэффициент $f_w = f_m f_k$ называют обмоточным коэффициентом; он равен произведению коэффициента распределения обмотки на коэффициент укорочения шага.

Звезда векторов э. д. с. многополюсной машины с целым q имеет так же, как и в двухполюсной машине, $2Q$ лучей, так как векторы э. д. с. катушек разных пар полюсов совпадают друг с другом по фазе; длины векторов в p раз больше, чем в двухполюсной машине (§ 47).

Для вычисления э. д. с. обмотки с дробным q можно свести эту обмотку к эквивалентной обмотке двухполюсной машины с целым числом полюсов q (§ 47).

58. Электродвижущая сила многополюсной машины при любом поле.

Если поле несинусоидально, то раскладываем кривую индукции на основную и высшие гармоники. Для э. д. с., индуцируемой основной гармоникой поля, имеем формулу (52). Для каждой из высших гармоник (порядка x) имеем

$$E_x = 4,44 f_{mx} f_{wx} \Phi_x x \omega 10^{-8} = 4,44 f_{wx} \Phi_x x \omega 10^{-8}; \quad (53)$$

здесь f_{mx} и f_{wx} — коэффициент распределения обмотки и коэффициент укорочения шага для гармоники порядка x ; f_{wx} — обмоточный коэффициент; Φ_x — поток гармоники порядка x , вычисленный на полюсном делении этой гармоники:

$$\Phi_x = \frac{2}{\pi} B_x l \frac{\tau}{x}.$$

Формулы (52) и (53) дают действующие значения э. д. с. каждой гармоники в отдельности; действующее значение результирующей фазной э. д. с. равно (§ 19):

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_x^2}. \quad (25a)$$

59. Коэффициент укорочения шага обмотки.

Для основной гармоники коэффициент укорочения шага вычисляется по одной из формул:

$$f_k = \cos \frac{\epsilon}{2} = \cos \frac{\pi(\tau - y)}{2\tau} = \sin \frac{\pi y}{2\tau}. \quad (54)$$

При вычислении f_k для высших гармоник необходимо иметь в виду, что одному полюсному делению первой гармоники соответствуют три полюсных деления третьей гармоники, пять полюсных делений пятой гармоники, и т. д. (рис. 79). Поэтому, сдвигаясь в поле основной гармоники на угол $\frac{\pi}{\tau} y$, в поле третьей гармоники мы сдвинемся на угол,

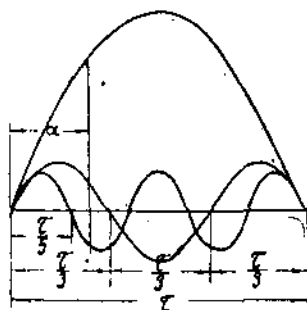


Рис. 79. Сдвиг в поле гармоник разного порядка.

в три раза больший $\left(\frac{3\pi}{\tau} y\right)$, в поле пятой гармоники на угол в 5 раз больший $\left(\frac{5\pi}{\tau} y\right)$ и т. д. В таком же отношении меняется и угол ϵ . Следовательно, для третьей гармоники коэффициент укорочения шага равен:

$$f_{\epsilon_3} = \cos \frac{3\pi(\tau - y)}{2\tau};$$

для гармоники порядка x :

$$f_{\epsilon x} = \cos \frac{x\pi(\tau - y)}{2\tau}. \quad (55)$$

60. Коэффициент распределения обмотки.

Коэффициент f_m равен отношению геометрической суммы э. д. сил катушек к арифметической. Вычисление f_m производят отдельно для каждой гармоники. В каждой фазе имеем q катушек, сдвинутых друг от друга на угол $\alpha_1 = \frac{2\pi}{Z}$, где α_1 — угол в пространственных градусах между смежными впадинами, а Z — полное число впадин; основные гармоники э. д. с. этих катушек сдвинуты по фазе друг от друга на угол $\alpha = p \frac{2\pi}{Z} = \frac{\pi}{Q}$ эл. градусов; здесь $Q = Z/2p$. Векторы этих э. д. с. изображены на рис. 78, б. Геометрическая сумма их равна отрезку $\overline{AC}$; арифметическая сумма равна $q \overline{AB}$.

Следовательно:

$$f_m = \frac{\overline{AC}}{q \overline{AB}}.$$

Отрезки $\overline{AB}$, $\overline{BD}$, $\overline{DE}$ и т. д. представляют собою стороны правильного многоугольника, имеющего $2Q$ сторон (§ 56); центральный угол $\angle AOB$ равен $2\pi/2Q = \alpha$. Опуская на прямую AC перпендикуляр из центра окружности, описанной вокруг многоугольника, получаем $\overline{AF} = \overline{AO} \sin \frac{q\alpha}{2}$, откуда $\overline{AC} = 2\overline{AO} \sin \frac{q\alpha}{2}$. Опуская из центра перпендикуляр на отрезок AB , получаем $\overline{AB} = 2\overline{AO} \sin \frac{\alpha}{2}$.

Отсюда коэффициент распределения обмотки

$$f_m = \frac{\overline{AC}}{q \overline{AB}} = \frac{2\overline{AO} \sin \frac{q\alpha}{2}}{q 2\overline{AO} \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (56)$$

Так как $\alpha = \pi/Q$, имеем

$$f_m = \frac{\sin q \frac{\pi}{2Q}}{q \sin \frac{\pi}{2Q}}. \quad (56a)$$

Для трехфазной машины $Q = 3q$, поэтому.

$$f_m = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6q}}. \quad (56b)$$

Одному полюсному делению первой гармоники соответствуют три полюсных деления третьей гармоники, пять полюсных делений пятой гармоники и т. д. (§ 59). Поэтому q катушек, сдвинутых друг от друга на угол α эл. градусов в поле первой гармоники, окажутся сдвинутыми на угол 3α эл. градусов в поле третьей гармоники и на угол $k\alpha$ в поле k гармоники. На такой же угол сдвинуты и э. д. силы этих q катушек, индуктируемые соответствующей гармоникой потока. Следовательно, коэффициент распределения обмотки для k гармоники равен:

$$f_{mk} = \frac{\sin q \frac{k\alpha}{2}}{q \sin \frac{k\alpha}{2}} \quad (57)$$

Как видно из приведенных формул, коэффициент распределения обмотки зависит только от числа впадин q и, следовательно, для любой машины может быть взят из таблицы для данного q . В табл. I приведены коэффициенты распределения обмоток трехфазных машин.

При увеличении Q угол между векторами э. д. с. α уменьшается, приближаясь в пределе к нулю; многоугольник э. д. с. превращается в окружность. Обмотка, имеющая $Q \approx \infty$, называется распределенной. Коэффициент f_m для распределенной обмотки равен (рис. 80):

$$f_m = \frac{\text{хорда } \overline{AB}}{\text{дуга } \overline{AB}} = \frac{2R \sin \beta/2}{R\beta} = \frac{\sin \beta/2}{\beta/2} \quad (58)$$

Обозначая длину дуги окружности статора, занятой одной фазой обмотки, через s , получим

$$\beta = \frac{s}{r} \pi,$$

откуда для гармоники порядка k получаем

$$f_{mk} = \frac{\sin \frac{s}{\tau} \frac{k\pi}{2}}{\frac{s}{\tau} \frac{k\pi}{2}} \quad (59)$$

Значения f_m для распределенной обмотки приведены в последней строке табл. I.

Таблица I.

Коэффициенты распределения обмотки для трехфазных обмоток с целым числом впадин на полюс и фазу.

q	f_{m1}	f_{m3}	f_{m5}	f_{m7}	f_{m9}	f_{m11}	f_{m13}
2	0,966	0,707	0,259	0,259	0,707	0,966	0,966
3	0,960	0,667	0,217	0,177	0,333	0,177	0,217
4	0,958	0,654	0,205	0,158	0,270	0,126	0,126
5	0,957	0,646	0,200	0,149	0,247	0,110	0,102
6	0,957	0,644	0,197	0,145	0,236	0,102	0,092
7	0,957	0,642	0,195	0,143	0,229	0,097	0,086
8	0,956	0,641	0,194	0,141	0,225	0,095	0,083
9	0,955	0,640	0,194	0,140	0,222	0,093	0,081
10	0,955	0,639	0,193	0,140	0,220	0,092	0,079
12	0,955	0,637	0,191	0,137	0,214	0,088	0,078
∞	0,955	0,637	0,191	0,136	0,212	0,087	0,073

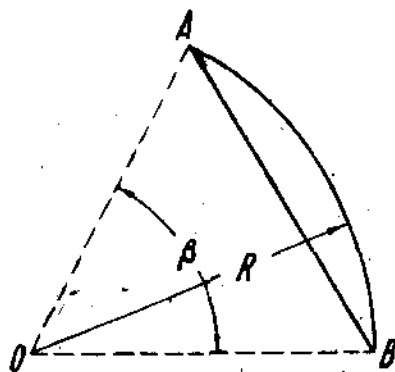


Рис. 80. К вычислению коэффициента f_m для распределенной обмотки.

61*. Обмоточный коэффициент.

В обмотках с укороченным шагом обмоточный коэффициент f_w объединяет два коэффициента: коэффициент укорочения шага f_s и коэффициент распределения обмотки f_m . В некоторых обмотках в формулу для э. д. с. входит еще третий коэффициент. Рассмотрим, например, двойную обмотку, изображенную на рис. 56, с. Электродвигущая сила группы катушек 1, 2, лежащих под первой парой полюсов, сдвинуты друг от друга на угол $\alpha = \pi/Q$ эл. градусов. На такой же угол сдвинуты друг от друга э. д. с. второй группы катушек той же фазы, лежащих под второй парой полюсов (катушки 7, 8). В обычных обмотках с целым q угол сдвига между катушками каждой пары полюсов всегда кратен 360 эл. градусов; в рассматриваемой двойной обмотке угол сдвига между катушками первой и второй группы равен $360 + 2\alpha$ эл. градусов. На такой же угол сдвинуты и э. д. с. первой и второй групп катушек, а потому их следует складывать геометрически. На несколько групп катушек, сдвинутых друг от друга, часто можно разбить обмотку с дробным q .¹⁾ При подсчете э. д. с. групповой сдвиг катушек учитывают введением коэффициента f_p , называемого коэффициентом группового распределения. Обозначая число групп катушек через q_1 , а угол сдвига их друг относительно друга через γ , получим (для x гармоники):

$$f_{px} = \frac{\sin q_1 \frac{x\gamma}{2}}{q_1 \sin \frac{x\gamma}{2}}. \quad (60)$$

Иногда для улучшения формы кривой э. д. с. применяют скос впадин (§ 64). При этом э. д. с. уменьшается, что можно учесть коэффициентом скоса впадин.²⁾ Пусть угол скоса впадин равен δ эл. градусов (рис. 81). Электродвигущие силы в каждом элементарном участке dl провода по длине сдвинуты друг от друга на угол δl . Скошенный проводник можно рассматривать как обмотку с проводниками длиной dl , распределенную по дуге δ , и воспользоваться формулой коэффициента распределения (58), выведенной для распределенной обмотки (для гармоники порядка x):

$$f_{sx} = \frac{\sin x\delta/2}{x\delta/2}. \quad (61)$$

Обмоточный коэффициент обмотки, имеющей групповой сдвиг и скос впадин, равен произведению всех четырех коэффициентов:

$$f_w = f_m f_s f_p f_s. \quad (62)$$

62. Соединение трехфазных обмоток звездой и треугольником.

Три обмотки отдельных фаз трехфазной машины имеют всего шесть концов. Три любых из них, сдвинутые друг относительно друга на 120 эл. градусов, условно назовем началами обмоток; тогда три других будут концами обмоток. Э. д. с. каждой фазы сдвинуты друг от друга во времени на 120 эл. градусов (рис. 77, б). Для получения трехфазной системы необходимо фазные обмотки соединить друг с другом. Существуют два способа соединения.

¹⁾ J. Tittel. Neuartige Wicklungen für Wechselstrommaschinen. E. T. Z., 1928, стр. 1103.

²⁾ L. V. Bewley. Induced Voltage of Electrical Machines. Tr. A. I. E. E. 1930, № 2, стр. 456.

1. Соединение звездой (рис. 82, а): концы (или начала) всех трех обмоток соединяют вместе, образуя так называемую нулевую точку обмотки. Три оставшихся свободными начала (или концы) образуют выводы (или зажимы) машины.

2. Соединение треугольником (рис. 85, а): конец обмотки каждой фазы соединяют с началом следующей, в результате чего получается замкнутый многоугольник (треугольник в трехфазной машине). Внешняя цепь присоединяется к точкам соединения обмоток отдельных фаз.

Фазные э. д. с. не изменяются от способа соединения обмотки в трехфазную систему, тогда как э. д. с. между выводами трехфазной обмотки (линейные или сопряженные э. д. с.) зависят от способа соединения. Для определения величины линейной э. д. с. в общем случае несинусоидального поля разложим предварительно кривую поля на основную и высшие гармоники и будем рассматривать э. д. с., индуцированные каждой гармоникой поля в отдельности.

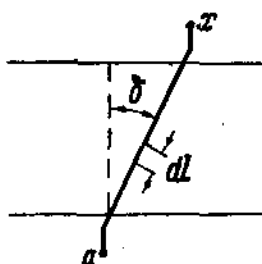


Рис. 81. Вычисление коэффициента скося владия.

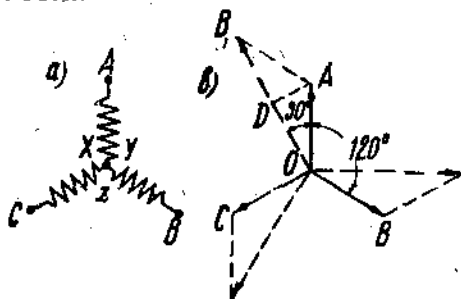


Рис. 82. а) Соединение обмоток трехфазной машины звездой. б) Векторная диаграмма.

а) **Соединение обмоток звездой.** Условимся за положительное направление э. д. с. считать направление ее от начала к концу обмотки. При соединении обмоток звездой линейная э. д. с. E_l равна геометрической разности фазных э. д. с.:

$$E_l = E_A - E_B;$$

действительно, двигаясь по контуру обмотки (рис. 82, а) от начала А к концу Х, мы движемся по положительному направлению э. д. с. первой фазы, а потому должны взять $+E_A$; двигаясь дальше по контуру от конца У к началу В, идем против положительного направления э. д. с. второй фазы, поэтому берем $-E_B$. Обращаясь к векторам основной гармоники фазных э. д. с. и беря их геометрические разности (рис. 82, б), получаем

$$E_l = \overline{QB_1} = 2\overline{OD} = 2E \cos 30^\circ = 2E \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} E; \quad (63)$$

здесь через E обозначена фазная э. д. с. (она одинакова для всех фаз).

В то время как векторы основной гармоники фазных э. д. с. сдвинуты друг от друга на 120 эл. градусов, векторы фазных э. д. с. третьей гармоники совпадают по фазе. Это происходит потому, что обмотки, сдвинутые в поле первой гармоники на 120 эл. градусов, в поле третьей гармоники оказываются сдвинутыми на угол $3 \times 120 = 360^\circ$ (рис. 83, а; ср. § 59). Таким образом, мгновенные значения э. д. с. третьей гармоники во всех фазах одинаковы по величине и имеют одинаковое направление: либо все

направлены к нулевой точке, либо от нее (рис. 83,с). Значение линейной э. д. с. третьей гармоник, очевидно, равно нулю (геометрическая разность равных и одинаково направленных векторов):

$$\dot{E}_{13} = \dot{E}_{A3} - \dot{E}_{B3} = 0. \quad (64)$$

Такое же явление имеем и для всех высших гармоник с порядком, кратным трем: 9, 15, 21 и т. д. Фазные э. д. с. всех остальных гармоник (не кратных трем) сдвинуты на такой же угол, как и основная ($\pm 120^\circ$), следовательно, их линейные э. д. силы в $\sqrt{3}$ раз больше фазных.

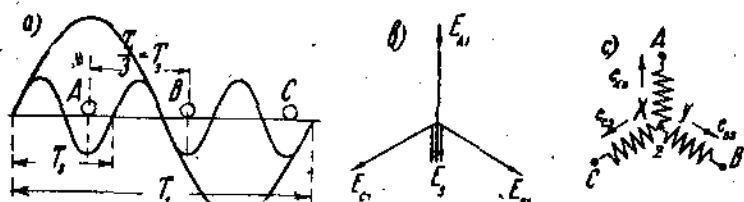


Рис. 83. Третья гармоника в обмотке, соединенной звездой.

Вследствие исчезновения в линейной э. д. с. всех гармоник, кратных трем, действующее значение результирующей линейной э. д. с. равно:

$$E_l = \sqrt{E_{1l}^2 + E_{5l}^2 + E_{7l}^2 + \dots} = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots}; \quad (65)$$

здесь через $E_1, E_5, \dots$ обозначены фазные э. д. с. 1, 5 и т. д. гармоник.

Отношение между действующими значениями э. д. с. линейной и фазной (§ 58) при несинусоидальном поле меньше $\sqrt{3}$:

$$\frac{E_l}{E} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{E_1^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots}{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}}$$

При заземленной нулевой точке генератора и наличии емкости в сети, присоединенной к генератору (кабельная сеть), третья гармоника э. д. с. может вызвать ток, замыкающийся через землю (рис. 84).

б) При соединении обмотки треугольником (рис. 85,а), очевидно:

$$E_l = E. \quad (66)$$

По отношению к третьей и кратным ей гармоникам э. д. силы, обмотка машины при соединении треугольником является замкнутой накоротко,

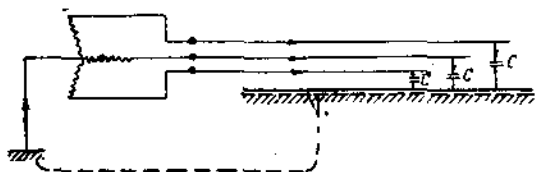


Рис. 84. Ток третьей гармоник при заземлении нулевой точки.

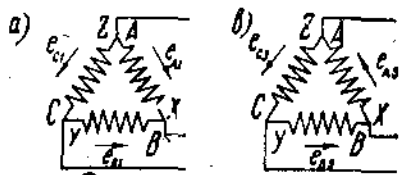


Рис. 85. а) Соединение обмоток трехфазной машины звездой. б) Ток третьей гармоник в треугольнике.

так как э. д. с. этих гармоник во всех фазах складываются арифметически и создают токи, циркулирующие по обмотке (рис. 85,б). Наличие этих токов уменьшает величину напряжения третьей и кратных ей гар-

моник на зажимах машины, поэтому в кривой напряжения машины третья гармоника и кратные ей выявлены незначительно. Однако, токи в обмотке от этих гармоник могут достигать большой величины и увеличивать нагревание машины. Поэтому соединения обмоток генератора треугольником избегают. Если необходимо соединить обмотку треугольником, то для уничтожения третьей гармоники можно применить укорочение шага до $2\frac{2}{3}$ (§ 64).

63. Высшие гармоники в кривой электродвижущей силы.

1. Кривая э. д. с. одного проводника при холостом ходе имеет ту же самую форму, что и кривая поля (§ 53). Такую же кривую имеет э. д. с. одной катушки с диаметральной шагом. Поэтому все высшие гармоники, присутствующие в кривой поля, войдут с тем же процентным соотношением в кривую э. д. с. одного проводника и одной катушки с диаметральной шагом:

$$\frac{E'_3}{E'_1} = \frac{B_3}{B_1} = \lambda_3; \quad \frac{E'_5}{E'_1} = \frac{B_5}{B_1} = \lambda_5; \quad \frac{E'_7}{E'_1} = \frac{B_7}{B_1} = \lambda_7; \dots \quad (67)$$

здесь через E' и B с соответствующими значками обозначены э. д. с. катушки и индукции для разных гармоник. Гармоники кривой поля называют пространственными гармониками, так как величина индукции этих гармоник представляет собою функцию расстояния x по окружности ротора, а от времени t не зависит. Эти гармоники неподвижны в пространстве по отношению к полюсам и друг к другу; двигаясь вместе с полюсами, они пересекают проводники якоря и индуцируют в них э. д. с.

2. Вследствие зубчатого строения статора проводимость для магнитного потока под полюсными наконечниками оказывается переменной, что влечет за собою колебание магнитного потока и вызывает добавочные э. д. с. высших порядков в проводниках статора. Если теоретическая полюсная дуга кратна шагу впадин, то магнитный поток остается постоянным по величине, так как проводимость под всем полюсом не изменяется при перемещении впадин; изменяется при этом только распределение потока под полюсом: поток колеблется из стороны в сторону вдоль полюсной дуги (рис. 86). Колебания потока оказываются тем сильнее, чем меньше величина междужелезного пространства по сравнению с шагом впадин. Один период колебаний соответствует перемещению ротора на один шаг впадин. За один оборот ротор проходит $2Qp$ шагов, а в секунду $2Qpn/60$. Следовательно, частота колебаний потока равна:

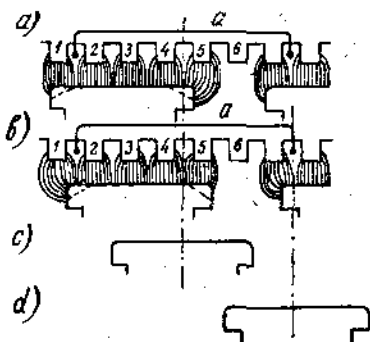


Рис. 86. Колебания потока полюсов вследствие наличия зубцов статора.

$$\frac{2Qpn}{60} = 2Qv; \quad (68)$$

здесь v — частота тока, Q — число впадин на полюс. Если теоретическая полюсная дуга не кратна шагу впадин, проводимость (а следовательно, и поток) изменяется, кроме того, и по величине; это вызывает добавочные колебания потока. По сравнению с первыми колебаниями они, однако,

очень малы, так как в полюсных наконечниках и в обмотке возбуждения индуцируются токи Фуко, поддерживающие постоянную величину потока. Поэтому последними колебаниями можно пренебречь.

Вследствие колебаний потока вдоль полюсной дуги величина потока, сцепляющегося с витком обмотки, изменяется, что индуцирует в витке э. д. с. Учесть величину этой э. д. с. трудно из-за искажающего влияния

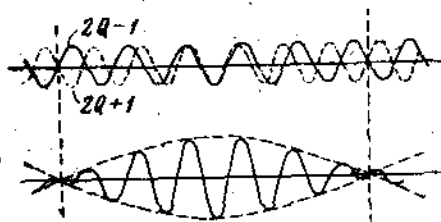


Рис. 87. Интерференция гармоник, вызванных зубцами статора.

местных токов Фуко на колебания потока и сложности закона колебаний. Рассматривая рис. 86, можно заключить, что наибольшие изменения потока, пронизывающего виток *a*, будут в положении рис. 86, *d*, т. е. когда поток, пронизывающий виток, равен нулю. В положении рис. 86, *c*, когда виток сцепляется с максимальным потоком, изменения потока равны нулю, так как при колебаниях поток не выходит за пределы витка.

Принимая, что поле синусоидально и колебания его, вызванные наличием впадин, происходят тоже по синусоидальному закону, получим, что колебание потока, пронизывающего виток, происходит по закону:

$$\varphi_t = \varphi_{\max} \sin \omega t \cos 2Q \omega t. \quad (69)$$

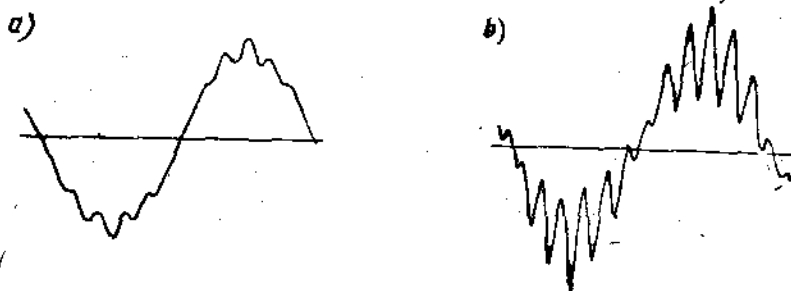


Рис. 88. *a*) Кривая напряжения генератора при холостом ходе. *b*) Кривая напряжения того же генератора при подключении его к кабельной сети.

Разлагая это тригонометрическое выражение, получаем

$$\varphi_t = \frac{1}{2} \varphi_{\max} \sin (2Q + 1) \omega t - \frac{1}{2} \varphi_{\max} \sin (2Q - 1) \omega t;$$

здесь $\omega = 2\pi$ — угловая частота тока. Электродвижущие силы, вызванные этими изменениями потока, равны:

$$e_t = e \cos (2Q + 1) \omega t - e \cos (2Q - 1) \omega t. \quad (70)$$

Таким образом, колебание потока с четной частотой $2Q$, вызванное наличием впадин, индуцирует две нечетных гармоники э. д. с. порядка $2Q + 1$ и $2Q - 1$. Эти гармоники бегут во времени в разные стороны (в чем не трудно убедиться, подставляя в формулу разные значения t). Интерференция этих двух бегущих гармоник дает четную гармонику с переменной амплитудой (рис. 87). В действительности, ввиду более сложного закона колебания потока и несинусоидальности кривой поля,

являются еще гармоники более высоких порядков; порядок всех гармоник, вызываемых наличием зубцов, может быть выражен общей формулой

$$x = 2QM \pm 1; \quad (71)$$

здесь $M = 1, 2, 3, \dots$ Практически следует считаться только с гармониками порядка $2Q \pm 1$ (для которых $M = 1$), так как остальные очень малы. Гармоники, вызванные зубцами статора, называют временными, так как поле полюсов, вращаясь синхронно с полюсами, изменяет свое положение

относительно полюсов во времени. Гармоники от зубцов проявляются в кривой э. д. с. резче, чем пространственные, особенно при приключении генератора к сети, обладающей емкостью. На рис. 88,а изображена кривая напряжения при холостом ходе машины, имеющей $Q = 6$. На рис. 88,б изображена кривая напряжения того же генератора, приключенного к кабельной сети; гармоники от зубцов оказались в резонансе с собственными колебаниями сети.

3. При нагрузке машины в кривой напряжения появляется еще целый ряд гармоник, вызванных реакцией якоря (пространственные и временные), приключенными к сети электродвигателями (временные гармоники) и т. д.

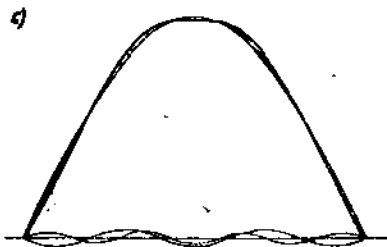
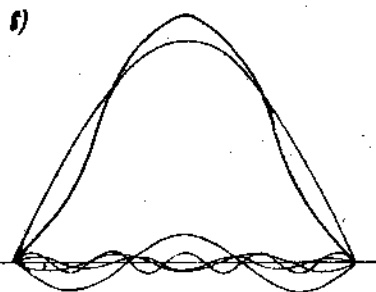
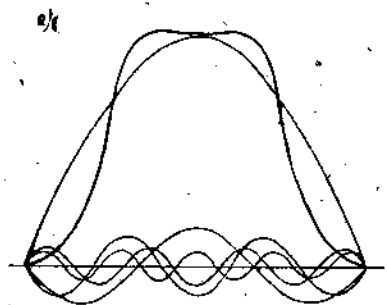


Рис. 89. а) Кривая формы поля и кривая э. д. с. одной катушки. б) Кривая фазной э. д. с. при $q = 2$. в) Кривая линейной э. д. с. при соединении обмоток звездой.

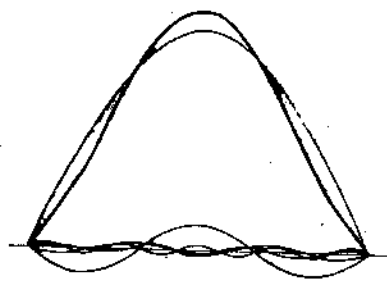


Рис. 90. Кривая фазной э. д. с. при $q = 3$ для кривой поля, изображенной на рис. 89,а.

64. Способы уничтожения высших гармоник.

а) Уничтожение пространственных гармоник. На рис. 89,а изображена кривая формы поля, а следовательно, и кривая э. д. с. одной катушки, содержащая 1, 3, 5, 7 и 9 гармоники. При распределении обмотки в нескольких впадинах э. д. с. любой гармоники равна:

$$E_x = f_{mx} q E_x; \quad (49a)$$

где E_x — э. д. с. гармоники порядка x одной катушки с диаметральной шаг. Из анализа выражения коэффициента распределения обмотки f_m следует, что он, вообще, тем меньше, чем выше порядок гармоники. Поэтому в кривую э. д. с. обмотки при $q > 1$ высшие гармоники входят с меньшим процентным соотношением, чем в кривую э. д. с. одной катушки, а именно:

$$\frac{E_3}{E_1} = \frac{f_{m3} q E_1}{f_{m1} q E_1} = f_{r3} \lambda_3; \quad \frac{E_5}{E_1} = \frac{f_{m5} q E_1}{f_{m1} q E_1} = f_{r5} \lambda_5; \quad (72)$$

здесь λ_3, λ_5 — процентные соотношения гармоник в кривой э. д. с. одной катушки (§ 63); выражения $f_{r3} = f_{m3}/f_{m1}$, $f_{r5} = f_{m5}/f_{m1}$ называют приведенными коэффициентами распределения обмотки. Значения их для трехфазных машин даны в табл. II. Для гармоник порядка $2QM \pm 1$ приведенный коэффициент обмотки при q целом равен 1, так как коэффициент распределения обмотки для этих гармоник равен:

$$f_{m(2QM \pm 1)} = \frac{\sin\left(\frac{2QM \pm 1}{Q} q \frac{\pi}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{2QM \pm 1}{Q} \frac{\pi}{2}\right)} = \pm \frac{\sin q \frac{\pi}{2Q}}{q \sin \frac{\pi}{2Q}} = \pm f_{m1}; \quad (73)$$

здесь $\frac{2QM}{Q} q \frac{\pi}{2} = Mq\pi$ всегда кратно π . Для всех остальных гармоник приведенный коэффициент меньше единицы. Поэтому кривая обмотки, имеющей $q > 1$, ближе к синусоиде. Так, например, для кривой поля, изображенной на рис. 89, а, кривая фазной э. д. с. при $q = 2$ представлена на рис. 89, б, а при $q = 3$ — на рис. 90. Таким образом, для улучшения формы кривой э. д. с. надлежит брать, по возможности, большое q . Это ведет к удорожанию обмотки и худшему использованию машины, так как при увеличении q ухудшается коэффициент использования впадины, вследствие увеличения объема изоляции по сравнению с объемом меди, и увеличиваются расходы на изоляцию от железа.

Из пространственных гармоник в кривой э. д. с. далеко не все играют значительную роль. Вообще, чем выше порядок гармоники, тем она меньше; обычно достаточно уничтожить 3, 5, 7, 9 и 11 гармоники; пространственные гармоники высших порядков обычно уже ничтожно малы. Уничтожения указанных гармоник можно добиться без значительного увеличения q путем укорочения шага и соединения обмотки звездой.

При диаметральной шаге э. д. с. каждой индуктируемой стороны для любой гармоники складываются арифметически, так как диаметральный шаг всегда кратен полюсному делению любой гармоники (рис. 91, а). Укорачивая шаг, можно вторую индуктируемую сторону катушки расположить таким образом, что для желаемой гармоники э. д. с. обеих индуктируемых сторон будут не складываться, а вычитаться. Для этого необходимо укоротить шаг на полюсное деление соответствующей гармоники, например, для пятой гармоники на $\tau/5$, т. е. шаг должен быть $4\tau/5 = 0,8\tau$ (рис. 91, б). Коэффициент укорочения при шаге $y = 0,8\tau$ для первой гармоники равен (§ 59): $f_{e1} = \cos \frac{\pi(\tau - y)}{2\tau} = 0,951$; для пятой гармоники $f_{e5} = \cos \frac{5\pi(\tau - y)}{2\tau} = \cos \frac{\pi}{2} = 0$. Подбирая соответствующим образом укорочение шага, можно уничтожить любую пространственную гармонику.

Выше (§ 62) уже указывалось, что при соединении обмотки звездой в линейной э. д. с. исчезают 3, 9, 15 и т. д. гармоники. На рис. 89, б изо-

бражена кривая фазной э. д. с. обмотки, имеющей $q = 2$; на рис. 89, с изображена кривая линейной э. д. с. этой обмотки при соединении звездой; соответствующая кривая поля приведена на рис. 89, а.

В обмотке с дробным q э. д. с. обмоток каждой пары полюсов должны складываться геометрически. Коэффициент распределения этих обмоток такой же, как у обмоток с целым числом впадин, имеющих pq/d впадин на полюс и фазу при Z четном и $2pq/d$ при Z нечетном; здесь d — общий наибольший делитель чисел Z и p (§ 47). Поэтому в обмотках с дробным q , не увеличивая в действительности числа впадин на полюс и фазу, достигают того же эффекта в уничтожении высших гармоник, как и при большом q .

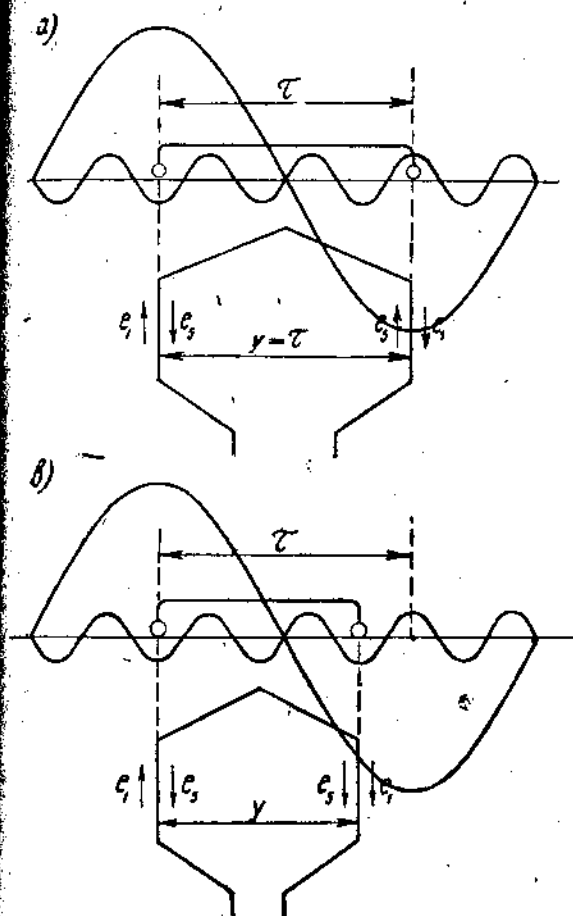


Рис. 91. Уничтожение пятой гармоники путем укорочения шага.

б) Уничтожение временных гармоник. От зубцов статора появляются гармоники порядка $2QM \pm 1$. Для этих гармоник приведенный коэффициент обмотки равен 1, а потому путем увеличения q нельзя достигнуть уничтожения этих гармоник. При увеличении q увеличивается лишь их частота. На рис. 92, а приведена осциллограмма кривой поля с сильно выраженными гармониками от зубцов; на рис. 92, б приведена кривая фазной э. д. с. (при $q = 2$) и на рис. 92, с — кривая линейной э. д. с. при соединении звездой. Как видно из осциллограмм, пространственные гармоники уменьшились, а временные в процентном отношении остались без изменения. Укорочением шага обмотки также нельзя добиться уничтожения временных гармоник. Колебания потока, вызванные наличием зубцов, во всех проводниках, расположенных под одним по-

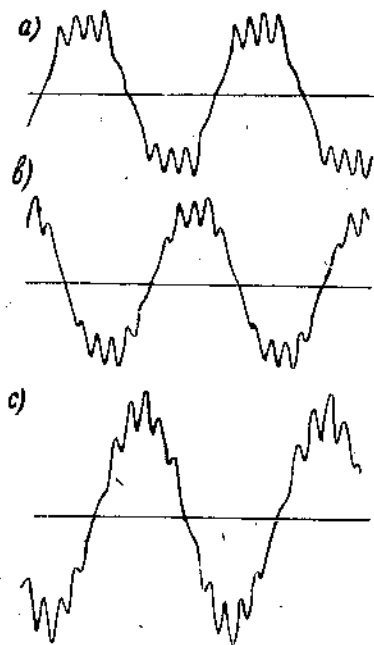


Рис. 92. Гармоники от зубцов в кривой поля (а), в кривой фазной э. д. с. (б), в кривой линейной э. д. с. (с); $m = 3$, $q = 2$, $Q = 6$.

люсом, индуктируют э. д. с. одного направления, а во всех проводниках другого полюса — противоположного. Поэтому при любом укорочении шага э. д. с. в проводниках, лежащих под разными полюсами, склады-

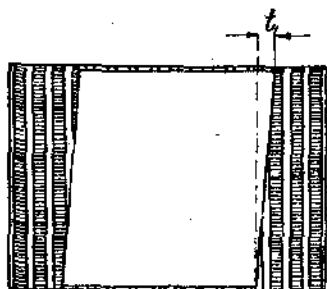


Рис. 93. Полюсные наконечники со скошенными краями.

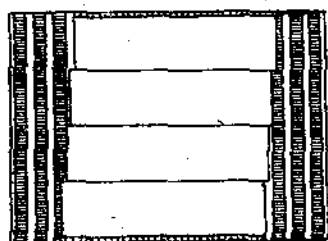


Рис. 94. Полюсные наконечники со ступенчатыми краями.

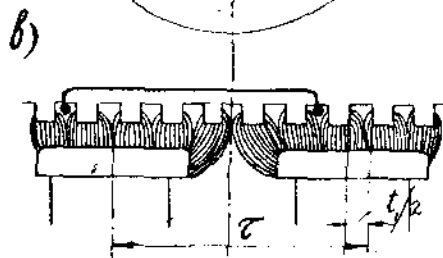
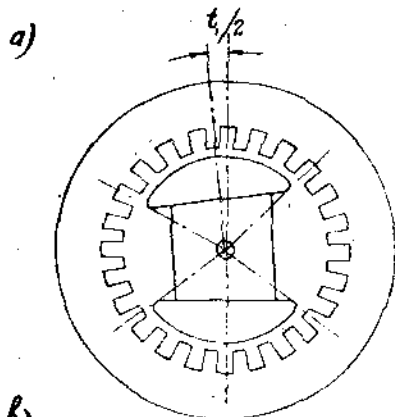


Рис. 96. Сдвиг полюсов в двухполюсной машине.

ваются (встречное включение проводников). Для того чтобы избавиться от гармоник, вызванных зубцами, необходимо или совсем уничтожить колебания потока, или сдвинуть эти колебания по фазе на 180° под разными полюсами.

Для уничтожения колебания потока, сцепляющегося с витком, применяют скошенные или ступенчатые полюсные наконечники (рис. 93 и 94)

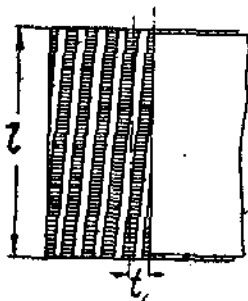


Рис. 95. Статор со скошенными впадинами.

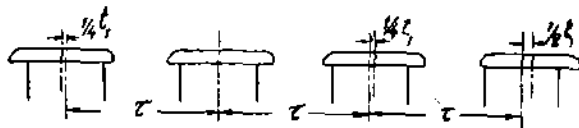


Рис. 97. Сдвиг полюсов в четырехполюсной машине.

или (в небольших машинах) скошенные впадины (рис. 95). Скос должен равняться шагу впадин t_1 . При таком скосе уменьшение потока у одной индуктируемой стороны витка компенсируется увеличением потока у другой индуктируемой стороны, в результате чего полный поток, сцепляющийся с витком, остается постоянным. Электродвижущие силы от пространственных гармоник при скосе впадин также уменьшаются (§ 61). Уменьшения колебаний потока достигаются также применением закрытых впадин.

Для изменения фазы колебаний под разными полюсами применяют сдвиг полюсов или, чаще, полюсных наконечников. Если разбить все полюса на две группы и сдвинуть одну группу полюсов (полюсных наконечников) по отношению к другой на половину шага впадин $\frac{1}{2}t_1$ (рис. 96), то под одной группой полюсов поток, колеблясь, перемещается в одну сторону, а под другой группой — в противоположную; э. д. с., индуцируемые этими колебаниями потока, взаимно уничтожаются. Разбив полюса на 4 группы и сдвинув каждую группу на $\frac{1}{4}t_1$ (рис. 97), можно уничтожить гармоники от зубцов как порядка $2Q \pm 1$, так и $4Q \pm 1$.

В обмотке с дробным q впадины разных пар полюсов расположены относительно магнитного потока не одинаково (§ 47); вследствие этого колебания потока под разными полюсами происходят со сдвигом по фазе; э. д. с., вызванные этими колебаниями, также не совпадают по фазе и могут почти полностью уничтожить друг друга. Поэтому в обмотках с дробным q временные гармоники обычно очень малы. Порядок гармоник от зубцов в них очень высок: $2QM \pm 1$, причем M имеет такое значение, что $2QM$ становится целым четным числом. На рис. 98 приведена кривая э. д. с. обмотки, имеющей $q = 3\frac{1}{2}$, $Q = 10\frac{1}{2}$; от зубцов здесь появляются только гармоники порядка $2 \times 2 \times 10,5 \pm 1$, т. е. 41 и 43.

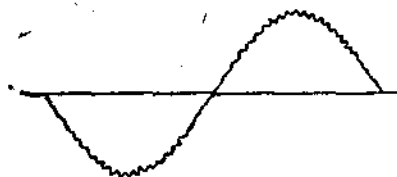


Рис. 98. Кривая линейной э. д. с. обмотки, $\pi = 3$, $q = 3\frac{1}{2}$, $Q = 10\frac{1}{2}$.

Таблица II.

Приведенные коэффициенты обмотки для трехфазных обмоток с целым числом впадин на полюс и фазу.

q	f_{π}	f_{π}	f_{π}	f_{π}	f_{π}	$f_{\pi 1}$	$f_{\pi 2}$
2	1	0,732	0,268	0,268	0,732	1	1
3	1	0,695	0,226	0,184	0,347	0,184	0,226
4	1	0,683	0,214	0,165	0,282	0,132	0,132
5	1	0,675	0,209	0,156	0,258	0,115	0,107
6	1	0,673	0,206	0,152	0,247	0,107	0,096
7	1	0,671	0,204	0,149	0,239	0,101	0,090
8	1	0,670	0,203	0,147	0,235	0,099	0,087
9	1	0,670	0,203	0,147	0,232	0,097	0,085
10	1	0,669	0,202	0,147	0,230	0,096	0,083
12	1	0,668	0,202	0,146	0,228	0,094	0,082
∞	1	0,667	0,200	0,142	0,222	0,091	0,076

ГЛАВА V.

РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ МНОГОФАЗНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

65. Общие замечания.

При нагрузке в синхронной машине возникает ряд явлений, обусловленных величиной и характером тока нагрузки; ток создает свой магнитный поток, взаимодействующий с основным потоком полюсов и изменяющий его. Вследствие изменения потока машины изменяется и индуцированная в ней э. д. с. Влияние тока нагрузки на основной поток машины (а следовательно, и на э. д. с.) носит название реакции якоря. Очевидно, для получения требуемой э. д. с. при заданной нагрузке необходимо учитывать реакцию якоря и в зависимости от ее действия увеличивать или уменьшать ток возбуждения. Как увидим ниже (§§ 115, 121, 141, 211) поток, создаваемый током нагрузки, влияет также на параллельную работу синхронных машин, на потери и т. д. Вследствие этого вопрос о реакции якоря и ее влиянии является одним из важнейших в теории синхронных машин, а количественный учет этого влияния необходим как при проектировании, так и при эксплуатации синхронных машин.

66. Разложение потока синхронной машины.

При холостом ходе в синхронной машине имеется только магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения. Часть его проходит через воздушный зазор в статор и индуцирует в обмотке статора пропорциональную потоку э. д. с. холостого хода $E_0 = 4,44 f_w \Phi_w 10^{-8}$ вольт. Эту часть потока назовем основным потоком полюсов. Другая, меньшая, часть потока, создаваемого обмоткой возбуждения, не входит в статор, а замыкается только вокруг обмотки возбуждения (рис. 99); это — поток рассеяния полюсов.

При нагрузке машины по обмотке статора проходит электрический ток, который создает свой магнитный поток (поток статора). Рассмотрим сначала случай, когда полюса не возбуждены, а по обмотке статора проходит ток от постороннего источника (в этом случае статор представляет собою своеобразную катушку самоиндукции с железом). Поток статора также разбивают на две части: 1) поток, проходящий через междужелезное пространство и входящий в ротор, — его называют потоком реакции якоря; 1) этот поток отчасти сцепляется и с обмоткой возбуждения; 2) поток, сцепляющийся только с обмоткой статора и не проникающий через междужелезное пространство в ротор, — поток рассеяния статора (рис. 100).

¹⁾ Поскольку в синхронной машине якорем является статор, вместо „поток реакции якоря“ иногда говорят „поток реакции статора“.

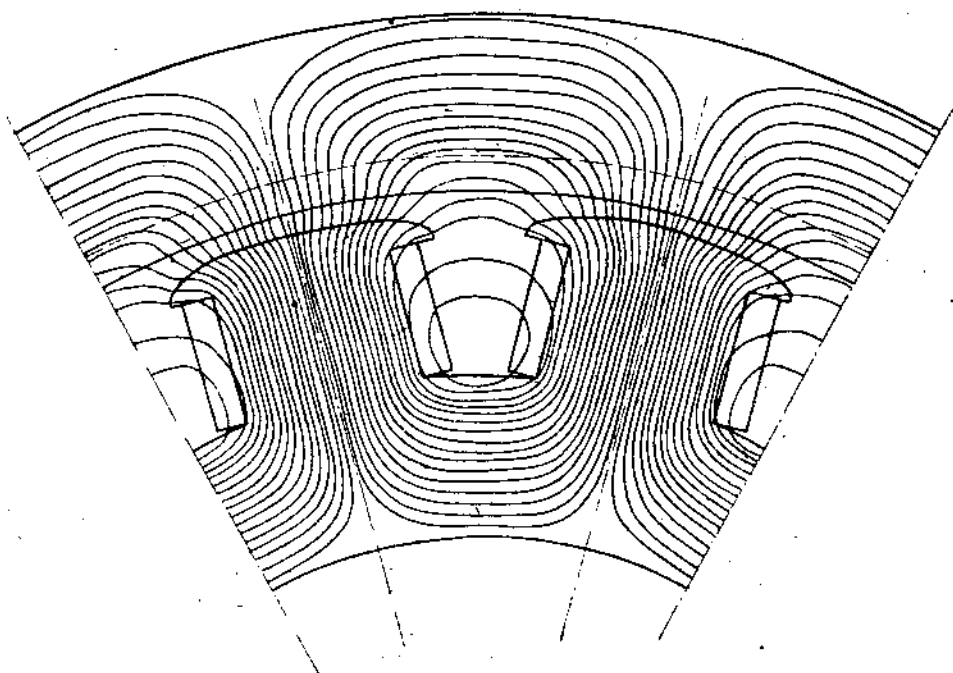


Рис. 99. Магнитный поток, создаваемый обмоткой полюсов.

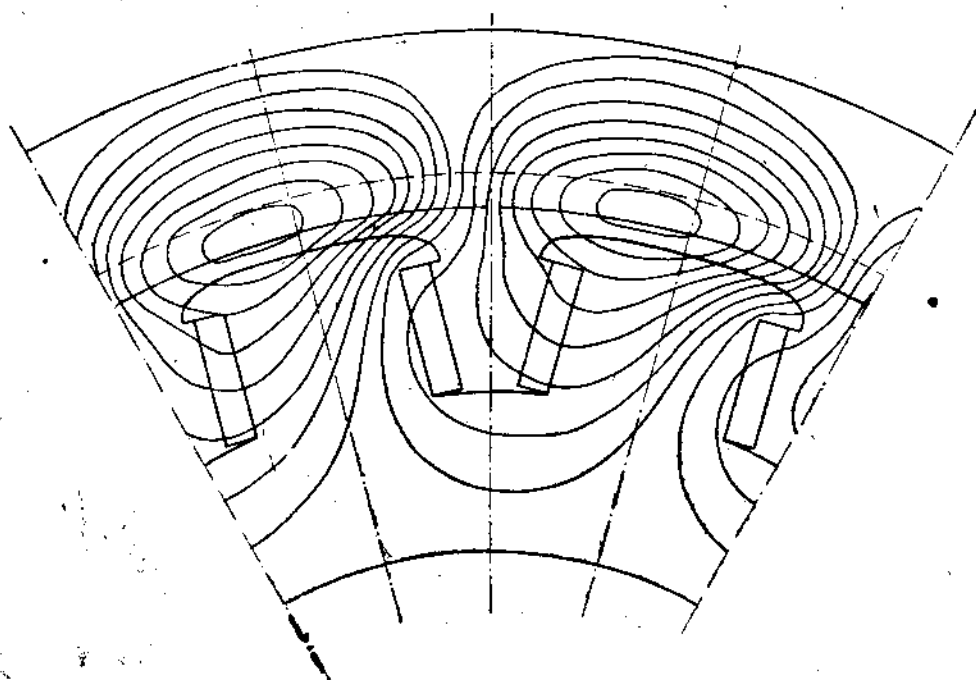


Рис. 100. Магнитный поток, создаваемый обмоткой статора.

Поток рассеяния статора необходимо, в свою очередь, разбить на две части: 1) поток рассеяния вокруг лобовых частей обмотки и 2) поток рассеяния вокруг активных частей обмотки.

При нагрузке возбужденной машины поток полюсов (рис. 99) и поток статора (рис. 100) накладываются друг на друга. Основным поток полюсов, поток реакции статора и поток рассеяния активных частей обмотки статора проходят, вообще говоря, по одним и тем же частям машины. Между тем, в одной точке пространства не может быть магнитных линий, имеющих разное направление; магнитные линии, взаимодействуя друг с другом, ориентируются в одном общем направлении. Вследствие этого в этих частях машины появляется один результирующий поток машины, образуемый взаимодействием основного потока полюсов, потока реакции статора и потока рассеяния активных частей обмотки статора (рис. 101). Через

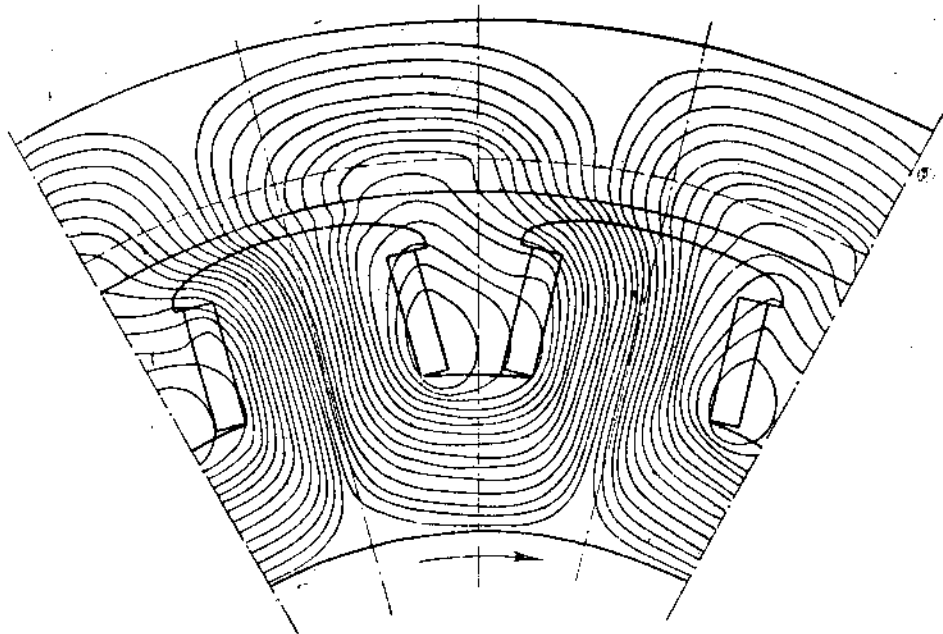


Рис. 101. Результирующий поток в машине.

междужелезное пространство при нагрузке проходит результирующий поток междужелезного пространства, представляющий собою результат взаимодействия потока полюсов и потока реакции статора. Достигая слоя зубцов и впадин статора, результирующий поток междужелезного пространства претерпевает дальнейшее искажение под влиянием потока рассеяния активных частей обмотки статора. Поток рассеяния полюсов и поток рассеяния лобовых частей обмотки статора замыкаются по самостоятельным путям, а потому не зависят от наличия остальных потоков.

Результирующий поток междужелезного пространства образуется путем взаимодействия потока реакции статора и основного потока полюсов. Основной поток полюсов создается магнитодвижущей силой (м. д. с.) обмотки возбуждения m_n (§ 9):

$$\Phi = \frac{m_n}{R};$$

здесь R — магнитное сопротивление. Поток реакции создается м. д. с. обмотки статора m_a :

$$\Phi_a = \frac{m_a}{R}.$$

Результирующий поток междужелезного пространства в общем случае не равен сумме потоков Φ и Φ_a ; сумма получается только в частном случае ненасыщенной машины. В насыщенной же машине магнитное сопротивление R не постоянно, а зависит от величины индукции, поэтому увеличение потока не пропорционально увеличению м. д. с. Величину результирующего потока, следовательно, нельзя определить как сумму отдельных составляющих Φ и Φ_a , вычисленных по вышеприведенным формулам. В насыщенной машине результирующий поток необходимо определять по результирующей м. д. с., представляющей собою сумму м. д. с. обмотки полюсов и обмотки статора (§ 9).

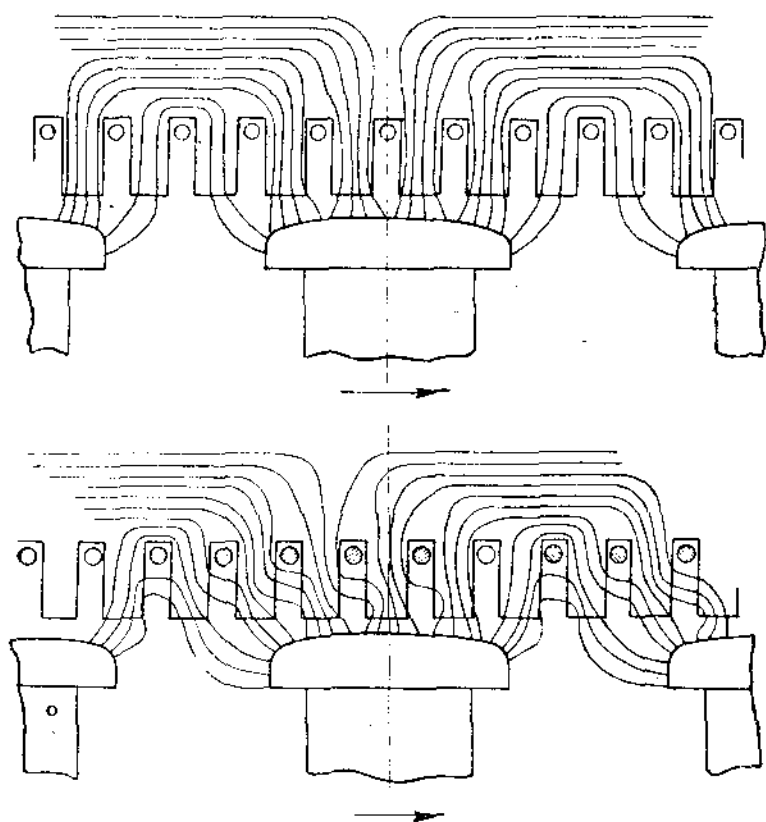


Рис. 102. Поток, проходящий через слой зубцов и впадин статора при холостом ходе и при нагрузке.

Поток рассеяния полюсов и поток рассеяния лобовых частей обмотки статора создаются каждый только одной м. д. с. — соответственно м. д. с. обмотки возбуждения и м. д. с. обмотки статора; замыкаются они по путям, сопротивление которых почти не зависит от других потоков; поэтому эти потоки рассеяния могут быть подсчитаны отдельно от других потоков.

Из рассмотрения общего потока, проходящего через слой зубцов и впадин статора при нагрузке (рис. 102) и представляющего собою результат взаимодействия результирующего потока междужелезного пространства и потока рассеяния активных частей обмотки статора, можно сделать заключение, что поток, сцепляющийся с обмоткой статора при нагрузке, меньше величины результирующего потока междужелезного пространства на величину потока рассеяния активных частей обмотки статора. Такое

заклучение вполне точно только в том случае, если зубцы не насыщены; в случае насыщенных зубцов поток зависит от результирующей м. д. с. Однако, вследствие того, что сопротивление для потока рассеяния активных частей, который проходит поперек впадин, заключается, главным образом, в воздухе, сопротивлением железа зубцов можно пренебрегать. Это позволяет весь поток рассеяния статора (как вокруг лобовых, так и вокруг активных частей обмотки) подсчитывать независимо от других потоков. Таким образом, весь магнитный поток, существующий в синхронной машине при нагрузке, с точки зрения расчета, можно рассматривать состоящим из трех частей: 1) результирующего потока между железного пространства; 2) потока рассеяния статора и 3) потока рассеяния полюсов (или потока рассеяния ротора).

Во многих случаях полезно пользоваться понятием результирующего потока машины. Результирующий поток машины представляет собою полный поток, сцепляющийся с обмоткой статора; он, очевидно, равен сумме результирующего потока междужелезного пространства и потока рассеяния статора.

67. Количественный учет влияния реакции якоря на работу синхронной машины.

Для количественного учета реакции якоря на разные стороны работы синхронной машины необходимо уметь находить величину потока реакции, величину потоков рассеяния (статора и ротора) и величину результирующего потока междужелезного пространства. Соответствующие вычисления и приводятся в настоящей главе. Так как для определения потока необходимо знать м. д. с., его создающую (§ 66), то сначала приведен подсчет м. д. с.

68. Магнитодвижущая сила катушки.

При прохождении тока по замкнутому контуру магнитный поток, создаваемый током, равен (§ 9):

$$\Phi = \frac{0,4 \pi i}{R}; \quad (5a)$$

здесь R — магнитное сопротивление пути, по которому проходит магнитный поток (магнитная цепь). Если контур тока представляет собою катушку с w_s витками, то поток этой катушки

$$\Phi = \frac{0,4 \pi i w_s}{R} = \frac{i w_s}{R/0,4 \pi} = \frac{i w_s}{0,8 R}. \quad (74)$$

Величина $0,4 \pi i w_s$ называется магнитодвижущей силой (м. д. с.) и выражается в гильбертах. Если отнести постоянный коэффициент $0,4 \pi$ к сопротивлению, то в числителе остается величина $i w_s$ — произведение из силы тока на число витков. Эта величина также представляет м. д. с., но выраженную в ампер-витках. Последним выражением при расчете электрических машин обычно и пользуются (§ 9).

Из рис. 103 видно, что поток, создаваемый м. д. с. катушки, проходит через междужелезное пространство два раза (внутри катушки и снаружи), занимая два полюсных деления; при этом вследствие наличия других катушек он совершенно симметрично распределяется внутри и снаружи катушки. Направление магнитного потока определяется по правилу штопора (§ 7). На одном полюсном делении поток идет из статора в ротор,

на другом — из ротора в статор; таким образом, у него есть северный полюс (там, где магнитные линии выходят из статора в междужелезное пространство) и южный (магнитные линии входят из междужелезного пространства в статор). Соответственно этому м. д. с. $i\omega_s$ разбивают на две части и считают, что $\frac{1}{2} i\omega_s = a\omega$ действует на северном полюсе (направлена, как и поток, из статора в ротор), другая часть $\frac{1}{2} i\omega_s = a\omega$ действует на южном полюсе (направлена из ротора в статор); одна часть $i\omega_s/2$ действует внутри катушки, другая $i\omega_s/2$ — снаружи. Направление м. д. с. определяется, как и направление потока, по правилу штопора. Каждая из м. д. с. $a\omega$ проводит поток по половине длины магнитной цепи.

Если развернуть в плоскость окружность статора и изобразить графически величину м. д. с., то получим рис. 104. Магнитодвижущую силу, направленную из ротора в статор, откладываем вверх; из статора в ротор — вниз. Поток, проходящий внутри любой магнитной трубки сечением ds , может быть подсчитан по формуле

$$d\Phi = \frac{a\omega}{0,8 dR};$$

здесь dR — сопротивление половины длины магнитной трубки.¹⁾ Из этой формулы видно, что для любой точки полюсного деления можно брать одно и то же значение ампер-витков $a\omega$, подставляя только разные значения магнитного сопротивления. Поэтому м. д. с. $a\omega$ откладываем по всей длине полюсного деления в виде прямой линии.

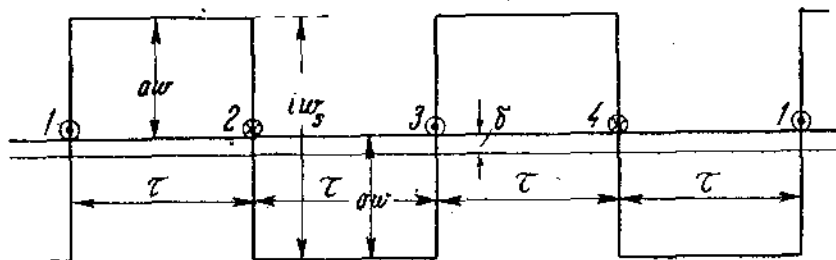


Рис. 104. Кривая м. д. с. однофазной обмотки при $q = 1$.

Если пренебречь сопротивлением железа, то сопротивление всей магнитной трубки $2dR$ (где dR — сопротивление половины длины) сведется только к сопротивлению воздушного зазора $2dR = 2 \frac{l}{ds}$, откуда

$$d\Phi = \frac{i\omega_s}{0,8 \times 2l/ds} = \frac{a\omega}{0,8 \delta} ds.$$

¹⁾ В этих формулах d — знак дифференциала.

Так как поток, деленный на площадь поперечного сечения, равен индукции $d\Phi/ds = B$, то в пренебрежении сопротивлением железа кривая м. д. с. дает в другом масштабе и индукцию

$$B = \frac{aw}{0,8\pi} \quad (75)$$

Если по катушке проходит переменный ток

$$i = I_{\max} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t,$$

то м. д. с. также переменна:

$$aw = \frac{i w_s}{2} = \frac{\sqrt{2} I w_s}{2} \sin \omega t; \quad (76)$$

изменение ее происходит по тому же закону, что и изменение тока; получаем пульсирующую м. д. с., амплитуда которой равна $\frac{\sqrt{2}}{2} I w_s$. Таким образом, высота прямоугольника, изображающего м. д. с. на рис. 104, при переменном токе не постоянна во времени, а переменна.

69. Магнитодвижущая сила многокатушечной однофазной обмотки.

Если на полюсном делении имеется несколько катушек, расположенных в разных впадинах и включенных последовательно, то м. д. с. создается всеми катушками; результирующая м. д. с. представляет сумму м. д. с. отдельных катушек. М. д. силу каждой катушки можно изобразить прямоугольником (рис. 105). На участках 3—4 и 6—7 м. д. с. всех катушек действуют согласно; результирующая м. д. с. на этих участках при трех катушках в три раза больше м. д. с. одной катушки. На участках 1—2 и 2—3 м. д. с. одной из катушек действует навстречу м. д. с. остальных катушек; результирующая м. д. с. равна алгебраической сумме м. д. с. и получается меньше, чем на участке 3—4. Последовательно вычисляя м. д. с. на каждом участке, получаем ступенчатую кривую (рис. 105). При очень большом числе катушек на фазу (распределенная обмотка) число ступеней результирующей м. д. с. увеличивается и ее с достаточной точностью можно заменить трапецией (рис. 106). При переменном токе м. д. с. каждой катушки пульсирует во времени. Так как по каждой катушке проходит один и тот же ток (катушки включены

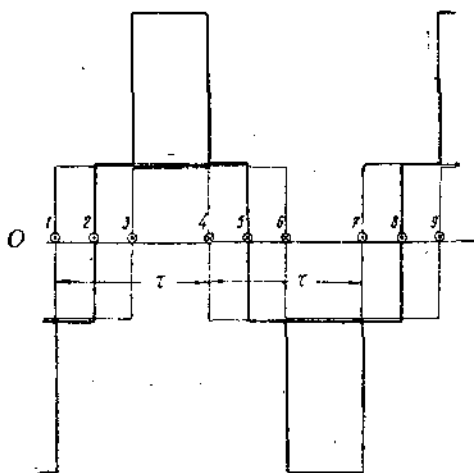


Рис. 105. Кривая м. д. с. однофазной обмотки при $q = 3$.

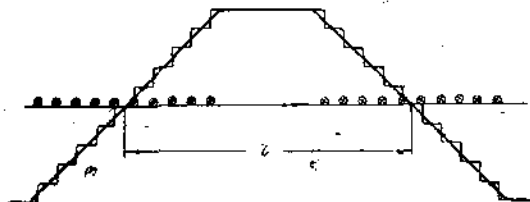


Рис. 106. Кривая м. д. с. однофазной обмотки при большом q .

последовательно), то пульсации всех м. д. с. протекают одновременно, а следовательно, и результирующая м. д. с. пульсирует во времени по тому же закону.

При аналитическом изучении м. д. с. оперировать с прямоугольниками и трапециями неудобно. Поэтому в этих случаях прямоугольную кривую м. д. с. каждой катушки разлагают в ряд Фурье на основную и высшие гармоники (§ 15). Для первой катушки имеем

$$aw_1 = \frac{\sqrt{2} I w_s}{2} \sin \omega t = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I w_s \sin \omega t \left(\sin \frac{2\pi}{X} x + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{2\pi}{X} x + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \sin 5 \frac{2\pi}{X} x + \dots \right); \quad (77)$$

здесь x — переменная координата — расстояние от начала координат O , совпадающего с левой стороной катушки, до рассматриваемой ординаты кривой; X — период кривой м. д. с., в данном случае равный двойному полюсному делению $X = 2\tau$ (рис. 105). Амплитуды каждой из составляющих гармоник, сохраняя неизменное положение в пространстве (относительно сторон катушки), изменяются синхронно во времени по закону $\sin \omega t$ (так же, как и высота прямоугольника, представляющего сумму этих гармоник); максимальное значение соответствует моменту времени, когда $\sin \omega t = 1$. М. д. с. второй катушки, сдвинутой от первой на угол $\alpha = \pi/Q$ эл. градусов при сохранении начала координат в точке O равна:

$$aw_2 = \frac{\sqrt{2} I w_s}{2} \sin \omega t = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I w_s \sin \omega t \left[\sin \left(\frac{2\pi}{X} x - \alpha \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \sin 3 \left(\frac{2\pi}{X} x - \alpha \right) + \frac{1}{5} \sin 5 \left(\frac{2\pi}{X} x - \alpha \right) + \dots \right]. \quad (78)$$

Во времени амплитуды гармоник м. д. с. второй катушки изменяются синхронно с изменением амплитуд м. д. с. первой катушки. Для получения результирующей м. д. с. нескольких катушек необходимо складывать гармоники одного порядка разных катушек; это даст составляющие гармоник результирующей м. д. с. Основная гармоника результирующей кривой представляет сумму q синусоид, сдвинутых друг от друга на угол α ; амплитуда результирующей кривой равна геометрической сумме амплитуд отдельных синусоид, сдвинутых друг от друга на угол α (§ 14). Угол α представляет собою угол между смежными впадинами. Принимая во внимание сказанное относительно э. д. с. (§ 56), можем сразу написать, что амплитуда первой гармоники результирующей кривой равна:

$$AW_1 = q f_{m1} aw_1 = \frac{4\sqrt{2}}{2\pi} q f_{m1} I w_s \sin \omega t = 0,9 f_{m1} q w_s I \sin \omega t; \quad (79)$$

здесь $\frac{4\sqrt{2}}{2\pi} = 0,9$. Амплитуда n гармоники результирующей кривой равна:

$$AW_n = q f_{mn} aw_n = \frac{0,9}{n} f_{mn} q w_s I \sin \omega t; \quad (79a)$$

здесь f_{m1}, f_{mn} — коэффициенты распределения обмоток для соответствующих гармоник (§ 60). Таким образом, результирующая м. д. с. равна:

$$AW = 0,9 q w_s I \sin \omega t \left[f_{m1} \sin \left(\frac{2\pi}{X} x - \gamma_1 \right) + \frac{1}{3} f_{m3} \sin \left(3 \frac{2\pi}{X} x - \gamma_3 \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} f_{m5} \sin \left(5 \frac{2\pi}{X} x - \gamma_5 \right) + \dots \right]. \quad (80)$$

Значения $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots$ см. § 14. Так как коэффициенты f_{m_k} меньше единицы, то результирующая кривая представляет собою не прямоугольник, а другую кривую (ступенчатую), более близкую к синусоиде.

До сих пор мы рассматривали м. д. с., действующую на одном полюсном делении. Так как при расчете магнитной цепи обычно подсчитывают м. д. с. полюсов для всей машины, то и м. д. с. реакции якоря в этом случае необходимо подсчитывать для всей машины. Для этого вышеприведенные выражения необходимо умножить на число полюсных делений $2p$. Амплитуда основной гармоники м. д. с. всей машины равна:

$$AW_p = 0,9 \times 2pqw_s f_{m1} I \sin \omega t.$$

Так как $pq w_s$ представляет собой полное число витков одной фазы машины $pq w_s = w$, то

$$AW_p = 2 \times 0,9 w f_{m1} I \sin \omega t. \quad (81)$$

Максимальное значение этой амплитуды соответствует времени, когда $\sin \omega t = 1$, т. е.

$$AW_{p\max} = 2 \times 0,9 w f_{m1} I. \quad (82)$$

Аналогичные выражения получаем и для высших гармоник:

$$AW_{p_k} = 2 \frac{0,9}{\gamma_k} w f_{m_k} I \sin \omega t;$$

$$AW_{p_k\max} = 2 \frac{0,9}{\gamma_k} w f_{m_k} I. \quad (83)$$

Резюмируя сказанное, получаем:

1) М. д. с. однофазной многокатушечной обмотки представляет собою сумму основной и высших гармоник м. д. с. Каждая из этих гармоник представляет собою синусоидально распределенную в пространстве кривую; положение их неизменно в пространстве.

2) Амплитуда основной гармоники м. д. с. отдельной катушки в пространстве расположена по оси соответствующей катушки, а амплитуда основной гармоники результирующей м. д. с. расположена по оси фазной обмотки.

3) Амплитуда каждой гармоники м. д. с. изменяется (пульсирует) во времени по тому же закону, как и ток.

Рассматривая только основную гармонику и считая, что ток изменяется по синусоиде, можем сказать, что м. д. с. однофазной многокатушечной обмотки представляет собою синусоидально распределенную неподвижную в пространстве кривую, пульсирующую во времени по закону синуса.

70. Магнитодвижущая сила многофазной многокатушечной обмотки.

В многофазной машине на каждом полюсном делении расположены обмотки m фаз, поэтому м. д. с. многофазной обмотки равна сумме м. д. с. обмоток всех m фаз. М. д. с. обмотки каждой фазы представляет собою неподвижную в пространстве кривую, пульсирующую во времени по закону изменения тока. Кривые м. д. с. каждой фазы сдвинуты в пространстве друг относительно друга на угол $2\pi/m$ эл. градусов, так как на такой угол сдвинуты оси обмоток. Во времени м. д. с. пульсируют тоже со сдвигом в $2\pi/m$ эл. градусов, так как фазы токов в обмотках сдвинуты во времени на этот угол. Рассмотрим трехфазную машину. Примем, что м. д. с. каждой фазы представляет собою трапециoidalную кривую. Тогда

для некоторого момента времени, соответствующего максимуму тока в первой фазе, получим кривые м. д. с., изображенные на рис. 107, *а*. Так как ток в первой фазе имеет положительный максимум, то и амплитуда м. д. с. первой фазы, расположенная по оси обмотки первой фазы, проходит через максимум и направлена из статора в ротор (кривая *а*, рис. 107). Во второй фазе ток отрицательный и равен половине максимального значения, поэтому амплитуда м. д. с. второй фазы, расположенная по оси второй фазы, в два раза меньше амплитуды м. д. с. первой фазы и направлена в обратную сторону — из ротора в статор (кривая *б*). То же самое получаем для третьей фазы (кривая *с*). Складывая эти три кривые, получаем результирующую кривую м. д. с. (кривая *т*). Для последующих моментов времени, сдвинутых друг от друга на $\frac{1}{12}$ часть периода, таким же путем, получаем кривые рис. 107, *б—г*. Рассматривая эти кривые, видим: в то время как кривые м. д. с. отдельных фаз неподвижны в пространстве и пульсируют во времени, кривая результирующей м. д. с. движется в пространстве (относительно обмотки статора), а по величине почти неизменна, переходя попеременно в треугольную или в трапециoidalную форму. Высота треугольника равна h , трапеции — $0,866 h$; следовательно, кривая имеет пульсации $14,35\%$ от средней высоты. Скорость движения кривой результирующей м. д. с. соответствует частоте тока: за то время, в течение которого вектор тока повернется на 360° эл. градусов (т. е. за один период) кривая м. д. с. передвигается на двойное полюсное деление (360° эл. градусов или $360/p$ простр. градусов). В минуту, следовательно, кривая передвинется на $\frac{360 \times 60 \times \nu}{p}$ простр. градусов, или сделает $n = 60\nu/p$ оборотов, так как одному обороту соответствует 360 простр. градусов. Как

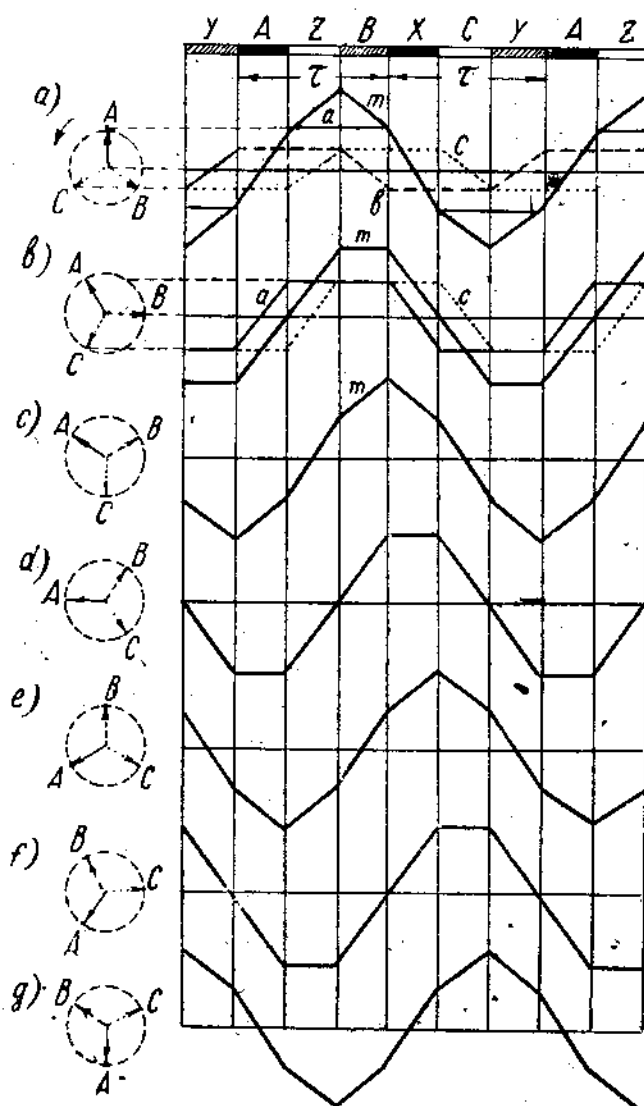


Рис. 107. Кривая м. д. с. трехфазной обмотки.

следует из § 24, эта скорость равна скорости вращения полюсов. Направление вращения кривой м. д. с. соответствует порядку расположения фаз: амплитуда результирующей кривой м. д. с. в пространстве всегда совпадает с осью той фазы, в которой в данный момент протекает максимальный ток (рис. 107), следовательно, кривая м. д. с. передвигается от оси первой фазы ко второй, от оси второй к третьей и т. д. Это направление соответствует направлению вращения полюсов. Таким образом, результирующая кривая м. д. с. вращается в пространстве (относительно статора) со скоростью, равной скорости полюсов в ту же сторону, и, следовательно, неподвижна относительно полюсов.

Если рассматривать в каждой фазе только основную гармонику м. д. с., то результирующая м. д. с. многофазной обмотки тоже представляет синусоиду (рис. 108). Амплитуда результирующей м. д. с. неизменна во времени и для трехфазной машины равна $\frac{3}{2}$ амплитуды м. д. с. одной фазы (для m -фазной машины $m/2$):

$$AW_a = \frac{m}{2} AW_{p_{\max}} = 0,9 f_{m1} \omega m l. \quad (84)$$

Скорость вращения основной гармоники результирующей м. д. с. в пространстве равна скорости вращения полюсов, т. е. эта кривая неподвижна относительно полюсов.

Выводы, аналогичные полученным выше графическим путем, можно получить и аналитически. Рассмотрим трехфазную машину. Кривая м. д. с. первой гармоники одной фазы при начале координат O , сдвинутом от оси первой фазы влево на 90 эл. градусов, может быть выражена формулой:

$$AW_{pA} = 2 \times 0,9 f_{m1} \omega l \sin \omega t \sin \frac{2\pi}{X} x.$$

Кривая м. д. с. второй фазы сдвинута в пространстве от кривой м. д. с. первой фазы на $2\pi/m = 120$ эл. градусов и пульсирует во времени со сдвигом в $2\pi/m = 120$ эл. градусов:

$$AW_{pB} = 2 \times 0,9 f_{m1} \omega l \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) \sin \left(\frac{2\pi}{X} x - \frac{2\pi}{m} \right).$$

Для третьей фазы аналогично получаем

$$AW_{pC} = 2 \times 0,9 f_{m1} \omega l \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{m} \right) \sin \left(\frac{2\pi}{X} x - 2 \frac{2\pi}{m} \right).$$

Кривая результирующей м. д. с. представляет собою сумму кривых м. д. с. отдельных фаз:

$$AW_a = AW_{pA} + AW_{pB} + AW_{pC}.$$

Разлагая произведения синусов по формуле

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \cos (\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos (\alpha + \beta), \quad (85)$$

получаем:

$$\begin{aligned} AW_a &= AW_{pA} + AW_{pB} + AW_{pC} = 2 \times 0,9 f_{m1} \omega l \left[\sin \omega t \sin \frac{2\pi}{X} x + \right. \\ &+ \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) \sin \left(\frac{2\pi}{X} x - \frac{2\pi}{m} \right) + \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{m} \right) \sin \left(\frac{2\pi}{X} x - 2 \frac{2\pi}{m} \right) \Big] = \\ &= 2 \times 0,9 f_{m1} \omega l \left[\frac{1}{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x \right) - \frac{1}{2} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x \right) + \right. \\ &+ \frac{1}{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x \right) - \frac{1}{2} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x - 2 \frac{2\pi}{m} \right) + \end{aligned}$$

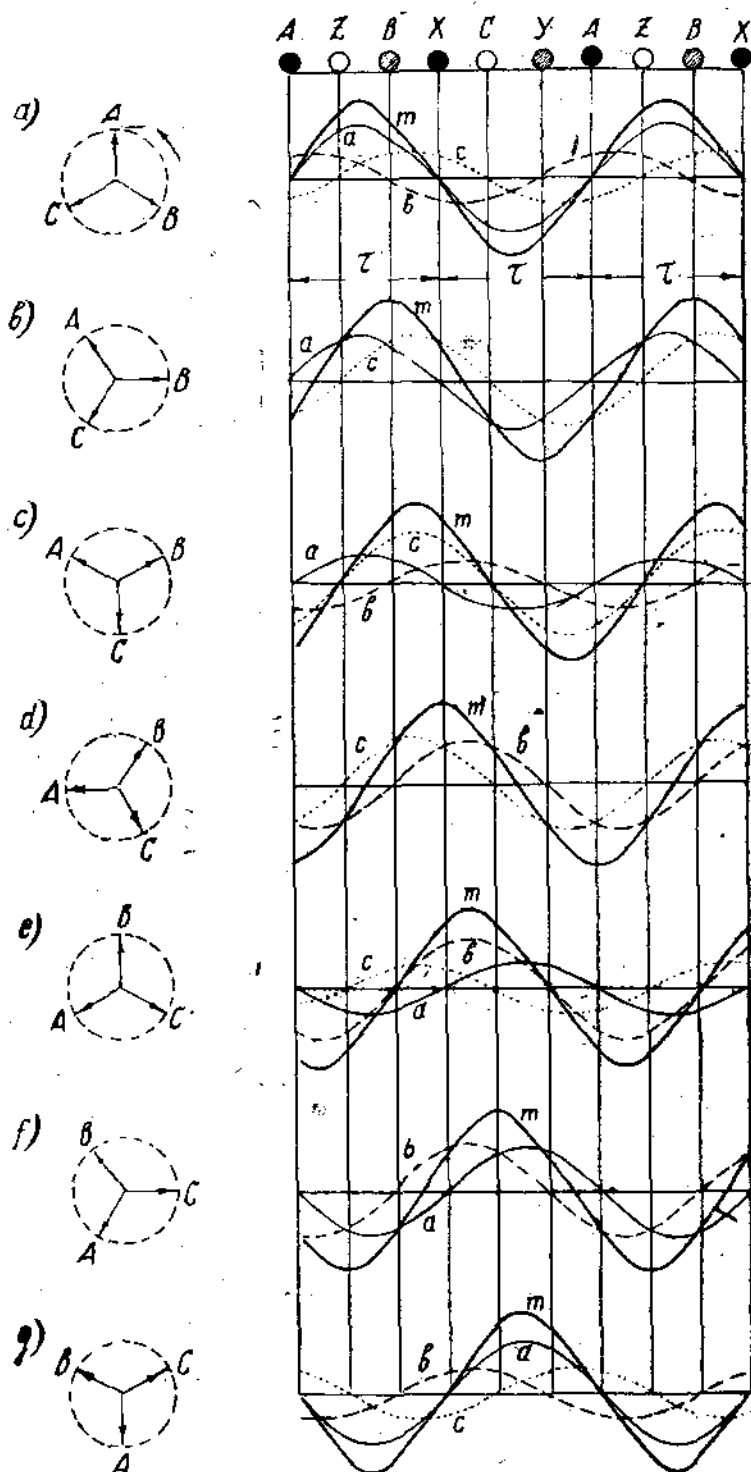


Рис. 108. Основная гармоника кривой m , d , c трехфазной обмотки.

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x \right) - \frac{1}{2} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x - 4 \frac{2\pi}{m} \right) \Big] = \\
& = 0,9 f_{m1} \omega l \left[3 \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x \right) - \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x \right) - \right. \\
& \left. - \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x - \frac{2\pi}{m} \right) - \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x - 2 \frac{2\pi}{m} \right) \right].
\end{aligned}$$

Три последних члена в этой сумме равны нулю,¹⁾ так как они представляют собою сумму трех косинусов, сдвинутых друг от друга на 120 эл. градусов. Следовательно, окончательно получаем

$$AW_a = 3 \times 0,9 f_{m1} \omega l \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x \right) = 3 \times 0,9 f_{m1} \omega l \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x + \frac{\pi}{2} \right). \quad (86)$$

В общем случае многофазной машины вместо коэффициента 3 следует подставить число фаз m ; тогда получаем

$$AW_a = 0,9 f_{m1} \omega m l \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x + \frac{\pi}{2} \right). \quad (86a)$$

Не трудно убедиться, что амплитуда основной гармоники результирующей кривой м. д. с., соответствующая значению

$$\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x + \frac{\pi}{2} \right) = 1,$$

не зависит от времени, так как при любом значении t можно найти на статоре точку с такой координатой x , при которой синус будет равен 1; положение амплитуды в пространстве изменяется в зависимости от времени, так как при разных значениях t амплитуде соответствуют разные значения x . Подставляя разные значения t , находим, что результирующая кривая передвигается в сторону вращения полюсов со скоростью, соответствующей угловой частоте тока ω ; ординаты кривой остаются постоянными во времени.

Производя подобные вычисления для высших гармоник, получим:

1) амплитуды гармоник результирующей м. д. с. с порядком кратным трем (3, 9, 15 и т. д.) равны нулю;

2) остальные гармоники результирующей кривой представляют собою синусоиды, амплитуды которых неизменны во времени и равны $m/2$ амплитуд м. д. с., соответствующих гармоник одной фазы. В пространстве эти м. д. с. перемещаются, причем за один период изменений тока м. д. с. каждой гармоники перемещается на свое двойное полюсное деление. Часть этих гармоник (7, 13, . . . $3a + 1$) движется в ту же сторону, что и основная гармоника; остальные же (5, 11, . . . $3a - 1$) — в обратную сторону.²⁾ Так как полюсное деление гармоники порядка x в x раз меньше полюсного деления основной гармоники, то и скорость движения этих гармоник во столько же раз меньше скорости движения основной гармоники. Вследствие этого все высшие гармоники м. д. с. перемещаются относительно полюсов.

Вследствие исчезновения в кривой м. д. с. многофазной обмотки гармоник кратных 3, а также вследствие того, что амплитуды остальных гармоник в $x f_{m1}/f_{mx}$ раз меньше амплитуды основной гармоники, кривая м. д. с. многофазной обмотки гораздо ближе к синусоиде, чем кривая

¹⁾ Здесь $\cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x - 4 \frac{2\pi}{m} \right) = \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x - \frac{2\pi}{m} \right)$, так как $2\pi/m = 120^\circ$.

²⁾ Направление движения кривых высших гармоник в трехфазной машине легко установить, воспользовавшись формулами: все гармоники порядка $3a + 1$, где a — любое целое число, включая и 0, движутся в ту же сторону, что и основная; гармоники порядка $3a - 1$ движутся в обратную сторону; гармоники порядка $3a$ исчезают.

м. д. с. одной фазы. Так как на основной поток полюсов оказывает влияние только основная гармоника, неподвижная по отношению к полюсам, то при учете реакции якоря высшими гармониками м. д. с. обычно пренебрегают.¹⁾ О влиянии высших гармоник кривой м. д. с. многофазной обмотки см. § 76.

Резюмируя сказанное, отмечаем:

1) амплитуда основной гармоники м. д. с. многофазной обмотки в $m/2$ раз больше амплитуды основной гармоники м. д. с. одной фазы;

2) амплитуда (и остальные ординаты) основной гармоники м. д. с. многофазной обмотки неизменны во времени и передвигаются относительно статора с синхронной скоростью в ту же сторону, что и полюса; следовательно, кривая м. д. с. неподвижна по отношению к полюсам.

71*. Кривые магнитодвижущей силы обмоток с укороченным шагом и обмоток с дробным числом впадин на полюс и фазу.

Магнитный поток катушки равен (§ 9):

$$\Phi = \frac{i w_s}{0,8 R};$$

здесь R — сопротивление для магнитного потока:

$$R = \sum \frac{l_x}{\mu_x s_x},$$

где μ_x , l_x и s_x — соответственно магнитная проницаемость, длина и площадь поперечного сечения участка x пути магнитного потока; пренебрегая магнитным сопротивлением железа, будем иметь $\mu = 1$, $\Sigma l_x = 2\delta$, $s = \tau l$, где δ — длина междужелезного пространства, τ — полюсное деление, l — длина статора. Следовательно:

$$\Phi = \frac{i w_s}{2 \times 0,8\delta} \tau l = \frac{aw}{0,8\delta} \tau l. \quad (87)$$

Из этого выражения видно, что магнитный поток пропорционален площади кривой м. д. с. $aw \times \tau$ (рис. 104), так как $1/0,8\delta = \text{const}$. Вследствие того, что магнитные линии всегда замкнуты, величина потока, пронизывающего катушку изнутри, должна равняться величине потока, замыкающегося снаружи катушки; следовательно, площадь кривой м. д. с. выше оси абсцисс должна равняться площади, расположенной ниже оси.

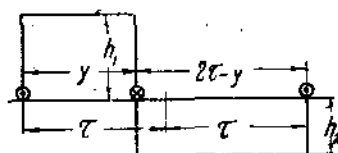


Рис. 109. Кривая м. д. с. катушки с укороченным шагом.

Рассмотрим катушку с укороченным шагом $y < \tau$ (рис. 109). Магнитное сопротивление для потока этой катушки (пренебрегая сопротивлением железа) равно:

$$R = \frac{\delta}{\tau l} + \frac{\delta}{(2\tau - y) l} = \delta \frac{2\tau}{y(2\tau - y) l}.$$

Магнитный поток катушки равен:

$$\Phi = \frac{i w_s}{0,8 R} = \frac{i w_s}{0,8\delta} \frac{y(2\tau - y) l}{2\tau}.$$

¹⁾ Среднее значение площади кривой м. д. с. (рис. 107), пропорциональное потоку реакции якоря (§ 73), для любого момента времени зависит только от основной гармоники. См. R. Richter. Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Berlin, 1920.

Разделив выражение для потока на постоянный коэффициент 1,083, получим площадь кривой м. д. с.:

$$S = iw_s \frac{y(2\tau - y)}{2\tau}.$$

Обозначив через h_1 и h_2 высоты прямоугольников м. д. с. внутри и снаружи катушки, получим:

$$h_1 = \frac{S}{y} = iw_s \frac{2\tau - y}{2\tau} = aw \left(2 - \frac{y}{\tau}\right) = aw + aw \frac{\tau - y}{\tau}; \quad (88)$$

$$h_2 = \frac{S}{2\tau - y} = iw_s \frac{y}{2\tau} = aw \frac{y}{\tau} + aw - aw = aw - aw \frac{\tau - y}{\tau}; \quad (89)$$

здесь $aw = iw_s/2$.

Часть м. д. с. $h_1 = iw_s \frac{2\tau - y}{2\tau}$ проводит магнитный поток через между-железное пространство внутри катушки; часть м. д. с. $h_2 = iw_s \frac{y}{2\tau}$ — снаружи. Полное значение м. д. с., действующей по всей длине магнитного пути $h_1 + h_2$, такое же, как и в катушках с диаметральной шагом:

$$h_1 + h_2 = iw_s. \quad (90)$$

Эта м. д. с. в обмотке с диаметральной шагом распределяется равномерно на каждое полюсное деление: $h_1 = h_2 = iw_s/2 = aw$; в обмотке с укороченным шагом м. д. с. одного полюса увеличивается на величину $aw \frac{\tau - y}{\tau}$, а другого — на такую же величину уменьшается. То же самое имеем и для индукции, так как кривая м. д. с. в другом масштабе представляет и кривую индукции (§ 68). Из выражений (88) и (89) следует, что построение кривой м. д. с. обмотки с укороченным шагом равносильно построению обычной кривой с равными высотами прямоугольников выше и ниже оси абсцисс $h_1 = h_2 = aw$ (как для обмотки с диаметральной шагом) и сдвигу этой кривой относительно оси абсцисс на величину $aw \frac{\tau - y}{\tau}$; сдвиг производится в ту сторону, в какую направлена м. д. с. внутри катушки (при ширине катушки $y > \tau$ — в обратную сторону). Необходимо иметь в виду, что длина каждого прямоугольника неодинакова (y и $2\tau - y$), соответственно укороченному шагу катушки y .

При построении кривой результирующей м. д. с. трехфазной симметрично расположенной обмотки (§ 47) с укороченным шагом нет необходимости вычислять и откладывать разны высоты прямоугольников h_1 и h_2 . Построение может быть произведено так же просто, как и для обмотки с диаметральной шагом. Результирующая м. д. с. в любой точке на окружности статора равна алгебраической сумме м. д. с., созда-

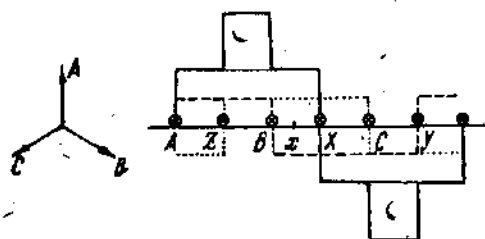


Рис. 110. Пояснение к формуле 91.

ваемых в этой точке всеми m фазами; каждая из этих м. д. с. переменна и пульсирует по закону $\sin \omega t$. Будем считать м. д. с. внутри катушки положительной; тогда снаружи катушки м. д. с. будет отрицательной, так как там она направлена в обратную сторону. Рассмотрим любую точку окружности статора трехфазной машины, например, точку x , находящуюся

внутри катушек первой и второй фазы и снаружи катушки третьей фазы (рис. 110). М. д. с. в точке x при диаметральной обмотке равна:

$$AW_x = AW \sin \omega t + AW \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) - AW \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{m} \right); \quad (91)$$

здесь AW — амплитуда м. д. с. одной фазы. В машине с укороченным шагом м. д. с. каждой фазы сдвинута относительно оси абсцисс на часть $\frac{\tau-y}{\tau}$ своей величины в ту сторону, куда направлена м. д. с. внутри катушки. Таким образом, высота прямоугольника м. д. с. внутри катушки увеличится на $aw \frac{\tau-y}{\tau}$, а снаружи — уменьшится на эту же величину (ср. выражения 88 и 89). Поэтому в обмотке с укороченным шагом в точке x будем иметь

$$AW_x = \left[AW \sin \omega t + AW \frac{\tau-y}{\tau} \sin \omega t \right] + \\ + \left[AW \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) + AW \frac{\tau-y}{\tau} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) \right] - \\ - \left[AW \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{m} \right) - AW \frac{\tau-y}{\tau} \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{m} \right) \right].$$

Раскрыв скобки, получаем

$$AW_x = AW \sin \omega t + AW \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) - AW \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{m} \right), \quad (91a)$$

так как остальные члены равны нулю (сумма трех синусов, сдвинутых на угол 120°):

$$AW \frac{\tau-y}{\tau} \sin \omega t + AW \frac{\tau-y}{\tau} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) + AW \frac{\tau-y}{\tau} \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{m} \right) = 0.$$

Результат получаем тот же, что и для обмотки с диаметральной шагом; это справедливо и для любой другой точки окружности статора. Следовательно, при построении результирующей кривой м. д. с. трехфазной машины над катушками одной фазы можно откладывать одинаковые высоты прямоугольников $h_1 = h_2 = h_3 = aw$.

Кривая м. д. с. однослойной обмотки с укороченным шагом получается несимметричной относительно оси абсцисс, вследствие чего в ней содержатся и четные гармоники, увеличивающие добавочные потери. В двухслойных обмотках с укороченным шагом кривая м. д. с. получается симметричной и четные гармоники отсутствуют; это является значительным преимуществом двухслойных обмоток с укороченным шагом перед однослойными. Симметричность кривой м. д. с. двухслойной обмотки с укороченным шагом обусловлена тем, что двухслойная обмотка по существу состоит из двух однослойных диаметральных обмоток, сдвинутых друг относительно друга на некоторый угол (§ 44). Строя кривую м. д. с. для каждого слоя в отдельности, получим две симметричные кривые; кривая м. д. с. двухслойной обмотки, представляющая собою сумму двух этих кривых, получается такой же симметричной, как и ее составляющие.

Обмотки с дробным числом полюсов и фазу q отличаются от обмоток с укороченным шагом тем, что катушки у них имеют разное укорочение. Построение кривой результирующей м. д. с. трехфазной симметрично расположенной обмотки с дробным q может быть произведено так же, как и для обмоток с диаметральной шагом. Рассмотрим одну фазу обмотки, имеющей катушки с разным укорочением (рис. 111). Из принципа замкнутости магнитных линий устанавливаем, что площадь кривой м. д. с. выше

оси абсцисс (сумма площадей прямоугольников 1, 2, 3, 4, рис. 111, б) должна равняться площади кривой ниже оси абсцисс (прямоугольники 5, 6, 7, 8). Так как для каждой катушки сумма $h_1 + h_2 \cong iw_s$, а при переходе через индуктируемую сторону катушки м. д. с. изменяется от h_1 до $-h_2$, т. е. на величину, одинаковую для всех катушек: $h_1 - (-h_2) = h_1 + h_2 = iw_s$, то высоты всех прямоугольников, расположенных выше оси абсцисс, равны друг другу; то же самое можем сказать относительно высот прямоугольников, расположенных ниже оси абсцисс. Подобно предыдущему находим

$$h_1 = iw_s \frac{2p\tau - Y}{2p\tau} = a\omega + a\omega \frac{p\tau - Y}{p\tau}; \quad (92)$$

$$h_2 = iw_s \frac{Y}{2p\tau} = a\omega - a\omega \frac{p\tau - Y}{p\tau}; \quad (93)$$

здесь Y — суммарная ширина всех катушек: $Y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4$; p — число пар полюсов. Кривая м. д. с. одной фазы получается путем сдвига относительно оси абсцисс кривой, построенной с одинаковыми высотами $h_1 = h_2$, на величину $a\omega \frac{p\tau - Y}{p\tau}$.

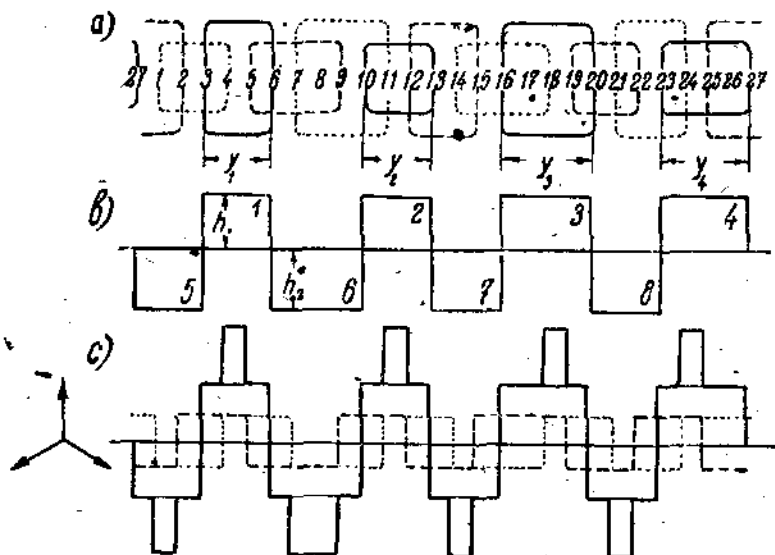


Рис. 111. Кривая м. д. с. обмотки с дробным q ($m = 3$, $p = 4$, $q \neq 1$, $Q = 3^3/4$, $Z = 27$, не заполненных обмоткой впадин 3): а) схема обмотки б) кривая м. д. с. для одной фазы, в) для трех фаз.

Переходя к результирующей кривой м. д. с. трехфазной симметричной обмотки с дробным q , можем, подобно предыдущему, установить, что в любой точке окружности статора м. д. с. равна алгебраической сумме м. д. с. всех трех фаз. Так как кривые м. д. с. двух фаз сдвинуты относительно оси абсцисс в одну сторону, а третьей фазы — в другую, причем алгебраическая сумма всех трех кривых равна нулю, то построение результирующей кривой может быть произведено так же, как и для обмоток с диаметральной шаг: откладыванием над катушками одинаковых высот $a\omega$ и суммированием их алгебраически. На рис. 111, в изображена результирующая кривая м. д. с. обмотки, изображенной на рис. 111, а.

Если на одном из полюсных делений число катушек больше, чем на других (рис. 112,а), то лишнюю катушку рассматриваем отдельно. Ее м. д. с. изображена на рис. 112,б, причем

$$h_1 = i\omega_s \frac{2p\tau - y_1}{2p\tau}; \quad h_2 = i\omega_s \frac{y_1}{2p\tau}. \quad (94)$$

Так как обмотка симметричная, то подобные катушки имеются в каждой фазе; результирующая м. д. с. таких трех катушек (рис. 112,с) получается построением м. д. с. с прямоугольниками одинаковой высоты $h_1 = h_2$. Результат получается тот же, как и при суммировании трех кривых, подобных рис. 112,б. На рис. 112,д построены кривые остальных катушек обмотки. Магнитодвижущая сила всей обмотки (рис. 112,е) получается суммированием кривых рис. 112,с и 112,д.

Результирующая кривая м. д. с. обмоток с дробным q получается обычно очень несимметричной, причем при разложении ее в ряд Фурье, кроме нечетных и четных высших гармоник, получаются еще гармоники, период которых больше периода основной гармоники (больше двойного полюсного деления).¹⁾ Так как частота их получается меньше, чем частота основной гармоники, то они называются низшими. Низшие гармоники вызывают большие добавочные потери от пульсаций. Если обмотка с дробным q одинакова под каждой парой полюсов, то низшие гармоники отсутствуют.

Амплитуда основной гармоники м. д. с. катушки с укороченным шагом равна:²⁾

$$AW = 0,9 \times 2\omega_s I \cos \frac{\pi(\tau - y)}{2\tau} = 0,9 \times 2\omega_s I f_s; \quad (95)$$

¹⁾ Q. Graham. The MMF Wave of Polyphase Windings with Special Reference to Sub-synchronous Harmonics. J. A. I. E. E. 1927, стр. 118.

²⁾ Получается при разложении кривой в ряд Фурье. См. R. Richter. Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen, Berlin, 1920.

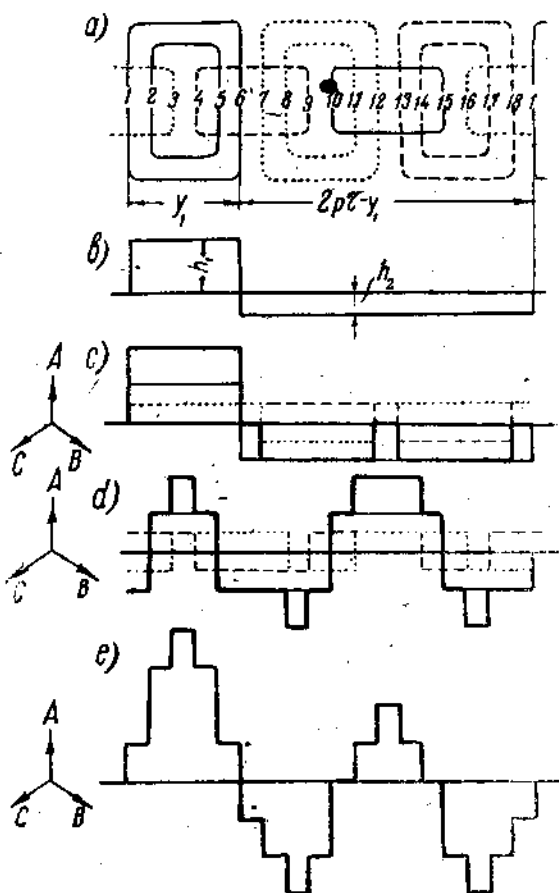


Рис. 112. Кривая м. д. с. обмотки с дробным q
($m = 3$, $p = 2$, $q = 1\frac{1}{2}$, $Q = 4\frac{1}{2}$).

здесь $\cos \frac{\pi(\tau - y)}{2\tau} = f_1$ — коэффициент укорочения шага катушки (§ 59). Амплитуда результирующей м. д. с. многокатушечной обмотки с укороченным шагом

$$AW_a = 0,9 m \omega I f_w; \quad (96)$$

здесь $f_w = f_m f_c$ — коэффициент обмотки (§ 61).

72*. Кривые магнитодвижущей силы двойных обмоток.

В генераторах с двойными обмотками токи каждой секции обмотки могут отличаться друг от друга как по величине, так и по фазе. Кривая м. д. с. строится для каждой секции обмотки отдельно и затем обе кривые суммируются. Построение кривой м. д. с.

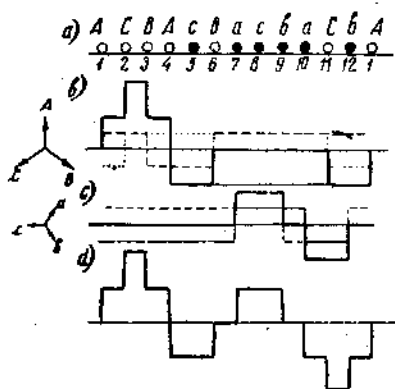


Рис. 113. Кривая м. д. с. двойной обмотки с чередованием через q впадин.

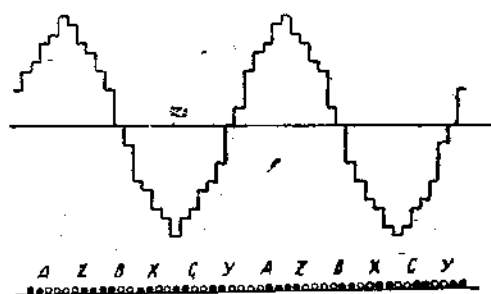


Рис. 114. Кривая м. д. с. двойной обмотки с чередованием через $q/2$ впадин.

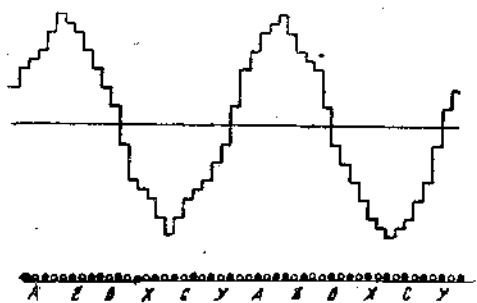


Рис. 115. Кривая м. д. с. двойной обмотки с чередованием через 1 впадину.

одной секции обмотки для случая симметрично расположенной обмотки после сказанного в § 71 не представляет затруднений. На рис. 113, б представлено построение результирующей кривой м. д. с. одной секции обмотки с чередованием через q впадин, изображенной на рис. 113, а.

Кривая м. д. с. второй секции обмотки расположена над катушками второй секции и, если нагрузка секций неодинакова, имеет ординаты другой величины. Пусть в первой секции протекает ток I_1

при $\cos \varphi_1$, а во второй — ток I_2 при $\cos \varphi_2$. На рис. 113, в изображена кривая м. д. с. второй секции в предположении, что $I_2 = 0,5 I_1$, а $\varphi_2 = -\varphi_1 = 30^\circ$. Суммарная кривая м. д. с. всей обмотки представлена на рис. 113, д. На рис. 114 и 115 представлены кривые м. д. с. обмоток с чередованием соответственно через $q/2$ впадин и через 1 впадину для неодинаковой нагрузки секций: $I_2 = 0,5 I_1$, при $\varphi_2 = \varphi_1$.

Рассматривая рис. 113—115, можно установить: симметричная кривая м. д. с. получается только при одинаковой нагрузке обеих обмоток; при неодинаковой нагрузке наиболее симметричная кривая получается

у обмотки с чередованием через 1 впадину; на втором месте стоит обмотка с чередованием через $q/2$ впадин, на третьем — с чередованием через q впадин.

73. Поток реакции якоря многофазной машины с цилиндрическим ротором.

М. д. с. обмотки статора многофазной машины распределена в пространстве (по окружности статора) по ступенчатой или трапецеидальной кривой (§ 70); для подсчета магнитного потока реакции можно, однако, принимать во внимание только основную гармонику м. д. с. (§ 70); в этом случае м. д. с. распределена по окружности статора по синусоиде:

$$AW_x = AW_{\max} \sin \frac{x\pi}{\tau}. \quad (97)$$

Магнитный поток элементарной магнитной трубки, проходящей через точку x , равен:

$$d\Phi_x = \frac{AW_x}{0,8 R_x};$$

здесь AW_x — ампер-витки статора, действующие в точке x , а R_x — сопротивление половины пути магнитной трубки (AW_x соответствуют только половине пути, § 68). В машине с цилиндрическим ротором, если пренебречь насыщением и принять, что зубцы на роторе распределены равномерно по всей окружности, сопротивление для магнитного потока статора одинаково при любом положении оси потока относительно оси полюсов ротора. При отсутствии насыщения сопротивление сводится, главным образом, к сопротивлению одного воздушного зазора, одинаковому для любой магнитной трубки:

$$R_x = \frac{\delta}{ds_x};$$

здесь ds_x — сечение магнитной трубки. Следовательно:

$$d\Phi_x = \frac{AW_x}{0,8 \delta} ds_x,$$

откуда получаем величину индукции, т. е. потока, приходящегося на единицу площади:

$$B_x = \frac{d\Phi_x}{ds_x} = \frac{AW_x}{0,8 \delta}. \quad (98)$$

Так как δ — величина постоянная, то кривая индукции (распределения потока по окружности статора) представляет ту же кривую м. д. с., но с ординатами, поделенными на $0,8 \delta$.

Величина потока, проходящего по всему полюсному делению, очевидно, пропорциональна площади кривой м. д. с.

Для подсчета потока реакции можно воспользоваться кривой намагничивания машины. Кривая намагничивания представляет собою зависимость между потоком, проходящим по машине, и ампер-витками возбуждения. Так как в машине с цилиндрическим ротором путь магнитного потока реакции совершенно одинаков с путем магнитного потока полюсов, то, очевидно, сопротивления для этих потоков одинаковы. Таким образом, кривая намагничивания дает и зависимость потока реакции от амплитуды ампер-витков якоря.

Если сопротивлением железа пренебречь нельзя (насыщенная машина) или магнитное сопротивление не одинаково для разных точек окру-

ности ротора (неравномерное распределение зубцов ротора по окружности), то индукция по окружности статора изменяется по кривой, отличной от кривой распределения м. д. с. Для подсчета потока реакции необходимо в этом случае поступать так же, как и для машин с явно выраженными полюсами.

74. Поток реакции якоря многофазной машины с явно выраженными полюсами.

В машине с явно выраженными полюсами в отличие от машины с цилиндрическим ротором магнитное сопротивление для разных магнитных трубок неодинаково (разная длина воздушного зазора в различных точках окружности статора). Поэтому при одной и той же величине м. д. с. магнитный поток может быть неодинаков. Величина его зависит от того, расположена ли амплитуда кривой м. д. с. против середины полюса или против нейтральной зоны, так как в первом случае магнитное сопротивление невелико, во втором же, вследствие большой величины участка пути по воздуху, оно значительно увеличивается. Рассмотрим разные случаи положения амплитуды м. д. с. относительно полюсов.

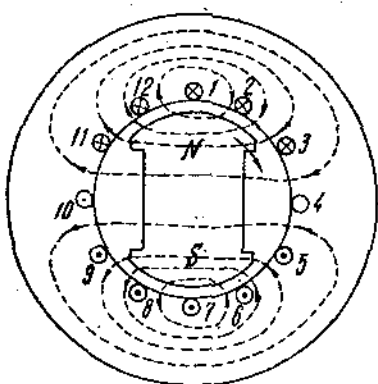


Рис. 116. Поперечный поток реакции якоря.

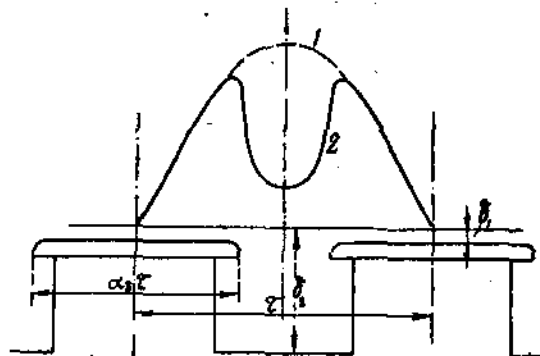


Рис. 117. Кривая м. д. с. (1) и кривая индукции (2) поперечного потока реакции якоря.

а) Активная нагрузка, угол сдвига фаз между э. д. с. и током $\psi = 0$. В этом случае фазный ток достигает максимума одновременно с э. д. с., т. е. в тот момент времени, когда ось данной фазной обмотки совпадает с нейтральной линией, а проводники находятся над серединами полюсов. Амплитуда результирующей м. д. с. совпадает с осью фазы, по которой протекает максимальный ток; очевидно, при $\psi = 0$ она всегда совпадает с нейтральной линией, так как максимальный ток при $\psi = 0$ проходит всегда по той фазе, ось которой совпадает в данный момент с нейтралью. Поток реакции в этом случае называют поперечным, так как он направлен поперек оси полюсов (рис. 116). Кривая распределения потока реакции (кривая индукции) значительно отличается от кривой распределения м. д. с. якоря. Для точек окружности, расположенных против полюсов, магнитное сопротивление незначительно, поэтому индукция велика (рис. 117):

$$B_{\pi} = \frac{AW_{\pi}}{0,8 \delta_1}$$

(пренебрегая сопротивлением железа). Для точек окружности, расположенных между полюсами, магнитное сопротивление очень велико (большая величина δ_2); несмотря на большую величину м. д. с. для этих точек, индукция в них почти равна нулю:

$$B_{x2} = \frac{AW_{x2}}{0,5\delta_2} \approx 0.$$

Поэтому кривая распределения потока получает седлообразную форму.

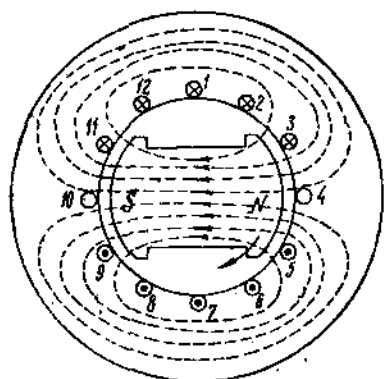


Рис. 118. Продольный поток реакции якоря при индуктивной нагрузке.

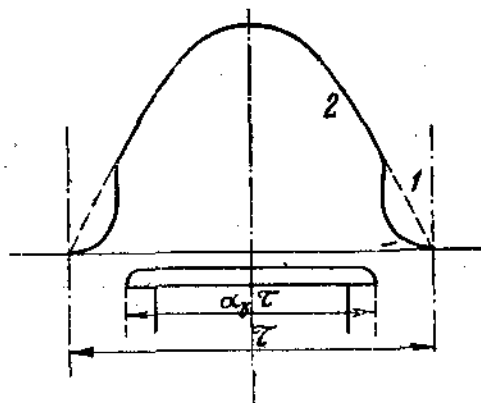


Рис. 119. Кривая м. д. с. (1) и кривая индукции (2) продольного потока реакции якоря.

б) Индуктивная нагрузка, $\psi = -90^\circ$. В этом случае ток отстает на 90° от э. д. с., следовательно, максимальный ток протекает в тех проводниках, которые четверть периода (90°) назад находились над серединой полюсов, т. е. в проводниках 1 и 7 (рис. 118). Ось фазы, к которой принадлежат эти проводники, расположена над серединой полюсов. Поэтому поток реакции направлен вдоль полюсов, — продольный поток реакции. При индуктивной нагрузке он размагничивающий — направлен навстречу потоку полюсов. Кривая распределения потока (рис. 119) под полюсными наконечниками почти не отличается от кривой распределения м. д. с. Там же, где полюсные наконечники кончаются, кривая распределения потока резко спадает почти до нуля.

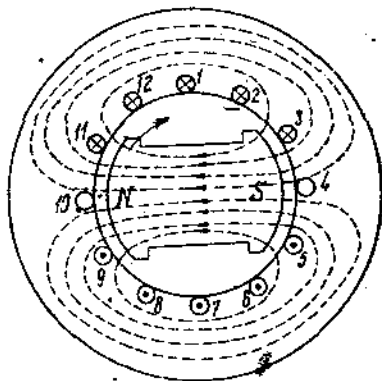


Рис. 120. Продольный поток реакции якоря при емкостной нагрузке.

с) Емкостная нагрузка, $\psi = +90^\circ$. Ток опережает на 90° э. д. с. Максимальный ток в этом случае протекает по проводникам 7 и 1 (рис. 120), — по тем проводникам, которые через четверть периода расположатся над серединой полюсов. Магнитный поток реакции в этом случае тоже продольный, но намагничивающий — направлен в ту же сторону, что и поток полюсов.

д) В промежуточном случае $0 < \psi < 90^\circ$ магнитодвижущая сила статора направлена под углом ψ к оси полюсов так же как и создаваемый ею поток; последний в этом случае имеет как поперечную составляющую, так и продольную.

Соответственно названиям потоков, пути, по которым они проходят, называют (§ 75): продольной осью машины — путь, проходящий через оси полюсов, поперечной осью машины — путь, проходящий через нейтральные зоны. Поток полюсов проходит, очевидно, по продольной оси.

Если по известным ампер-виткам необходимо вычислить поток реакции якоря, то в машине с явно выраженными полюсами нельзя непосредственно воспользоваться кривой намагничивания. Кривая намагничивания машины строится для потока полюсов, т. е. для продольной оси машины. Так как поток полюсов в междужелезном пространстве проходит только по дуге $\alpha_p \tau$ (рис. 119), где α_p — отношение теоретической полюсной дуги b_p к полюсному делению τ , то сопротивление междужелезного пространства вычисляют для дуги $\alpha_p \tau$, а не для всего полюсного деления τ . Поток реакции якоря в общем случае проходит под некоторым углом к оси полюсов; в предельных случаях он проходит либо в поперечной оси, сопротивление которой совершенно иное по сравнению с тем, для которого построена кривая намагничивания, либо в продольной оси. Но и в последнем случае ампер-витки статора распределены по всей дуге полюсного деления τ , соответственно чему и магнитный поток проходит по всей дуге τ . Поэтому, хотя сопротивление пути в железе для потока полюсов и для продольного потока реакции и одинаково, сопротивление междужелезного пространства для обоих потоков различно.

Таким образом, непосредственно воспользоваться кривой намагничивания даже для продольного потока статора нельзя. Обычно поступают следующим образом. Рассматривая картину распределения продольного потока реакции якоря (рис. 119), можно заключить, что поток реакции якоря проходит, главным образом, по длине полюсной дуги $\alpha_p \tau$ и обусловлен м. д. с. (ампер-витками), расположенными на этой дуге. Если вычислить ампер-витки, расположенные на дуге $\alpha_p \tau$, то для определения создаваемого ими потока можно воспользоваться кривой намагничивания. Ампер-витки, расположенные на дуге $\alpha_p \tau$, выражают, обычно в долях от амплитуды полных продольных ампер-витков статора:

$$AW_{ad} = k_d AW_{ad}'; \quad (99)$$

здесь AW_{ad}' — полные продольные ампер-витки (расположенные по всей дуге τ); ампер-витки AW_{ad} , соответствующие дуге $\alpha_p \tau$, называют эквивалентными продольными ампер-витками. Коэффициент k_d всегда меньше единицы. Он зависит только от теоретической величины полюсной дуги $b_p = \alpha_p \tau$ и может быть получен путем разложения кривой распределения продольного потока реакции (рис. 119) в ряд Фурье.¹⁾ Значения его для разных α_p приведены в табл. III.

Аналогичным образом для поперечных ампер-витков следует учитывать только часть ампер-витков, расположенных на дугах $1/2 \alpha_p \tau$ (рис. 117). Эти ампер-витки (эквивалентные поперечные ампер-витки) можно выразить некоторой частью от амплитуды полных поперечных ампер-витков:

$$AW_{aq} = k_q AW_{aq}'. \quad (100)$$

Значения k_q для разных α_p приведены в таблице III. Из рассмотрения пути прохождения потока поперечных ампер-витков видно, что сопротивление для потока сводится, главным образом, к сопротивлению воздушного зазора, так как путь потока по железу незначителен по длине и про-

¹⁾ См., напр., В. А. Толвинский. Синхронные машины. Петроград, 1923 г.

ходит по ненасыщенным частям машины. Следовательно, поперечный поток прямо пропорционален ампер-виткам и определение его следует производить по начальной прямолинейной части кривой намагничивания.

В том случае, когда ампер-витки реакции якоря направлены под углом ψ к оси полюсов, всегда можно разложить их на продольную и поперечную составляющие (рис. 121):

$$AW_{ad}' = AW_a \sin \psi \quad (101)$$

$$AW_{aq}' = AW_a \cos \psi. \quad (102)$$

Первая составляющая действует вдоль оси полюсов, вторая — перпендикулярно к оси. Благодаря этому достаточно знать коэффи-

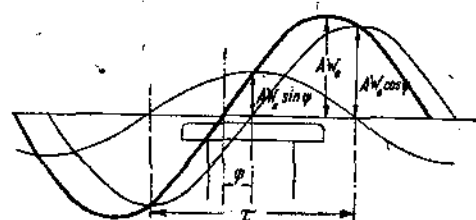
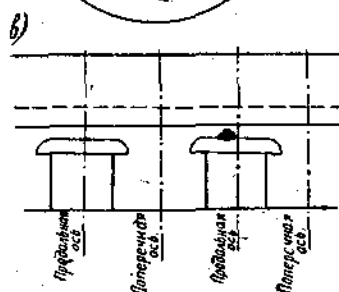
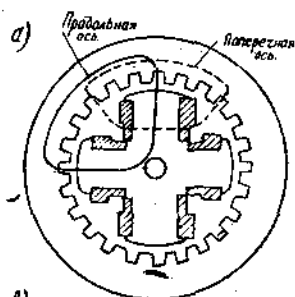


Рис. 121. Разложение потока реакции якоря на продольную и поперечную составляющие.

Рис. 122. Продольная и поперечная оси машины.

циенты k_d и k_q только для продольных и поперечных ампер-витков. Таким образом, при любом ψ эквивалентные ампер-витки продольные и поперечные соответственно равны:

$$AW_{ad} = k_d AW_{ad}' = 0,9 k_d f_{w1} m \omega l \sin \psi; \quad (103)$$

$$AW_{aq} = k_q AW_{aq}' = 0,9 k_q f_{w1} m \omega l \cos \psi. \quad (104)$$

Значения коэффициентов k_d и k_q .

Таблица III.

$a_0 = 0,773$	0,728	0,682	0,635	0,587	0,536	0,486
$a = 0,750$	0,700	0,650	0,600	0,550	0,500	0,450
$k_d = 0,825$	0,836	0,850	0,866	0,881	0,900	0,916
$k_q = 0,531$	0,496	0,461	0,430	0,404	0,380	0,364

В таблице приведены также значения $\alpha = b/\tau$ — отношение действительной полюсной дуги к полюсному делению; при переходе от a_0 к a принято, что $b/\tau = 1/35$.

75. Влияние потока реакции якоря на результирующий поток междужелезного пространства.

Все нижеприведенные рассуждения относятся как к машинам с цилиндрическим ротором, так и к машинам с явно выраженными полюсами. Как уже указывалось в § 74, средняя линия (ось) пути магнитного потока, проходящего через ось полюсов, называется продольной осью машины; ось пути потока, проходящего через нейтральную зону, называется поперечной осью машины; эти термины относят обычно

лишь к участкам пути по междужелезному пространству (рис. 122). При холостом ходе машины имеется поток только в продольной оси — основной поток полюсов. При активной нагрузке появляется еще поток в поперечной оси — поперечный поток реакции. Результирующий поток междужелезного пространства ненасыщенной машины в этом случае равен геометрической сумме основного потока полюсов и потока реакции. Влияние потока реакции в этом случае сказывается главным образом в искажении основного потока: с одной стороны полюса поток реакции направлен в ту же сторону, что и основной поток, получается сгущение магнитных линий, с другой стороны полюса — разрежение магнитных линий. При чисто реактивной (индуктивной или емкостной) нагрузке поток реакции появляется в продольной оси; в этом случае результирующий поток междужелезного пространства ненасыщенной машины равен алгебраической сумме основного потока полюсов и потока реакции. При индуктивной нагрузке получается уменьшение результирующего потока, при емкостной — увеличение (§ 74). В промежуточном случае ($0 < \psi < 90^\circ$) поток реакции состоит из двух составляющих: продольной и поперечной, причем каждая составляющая действует так, как указано выше. Количественный учет влияния потока реакции производят обычно графически при помощи так называемых диаграмм напряжения (§ 78). О влиянии насыщения и учете его см. § 84.

76. Поток рассеяния статора.

Часть полного потока статора, не проникающая в ротор и сцепляющаяся только с обмоткой статора, представляет собою поток рассеяния статора Φ_s . Так как большая часть этого потока проходит по воздуху и, следовательно, не зависит от насыщения (ср. § 66), практически считают этот поток прямо пропорциональным величине тока статора i . Так как для индуктирования э. д. с. значение имеет не реально существующий магнитный поток (действительное число магнитных линий Φ_s), а число потокосцеплений,¹⁾ то в дальнейшем под потоком рассеяния всегда будем понимать число потокосцеплений, т. е. число возможных пересечений витков обмотки магнитным потоком рассеяния, в случае исчезновения последнего; это избавит нас от необходимости учитывать неодинаковое число сцеплений реально существующего потока с обмоткой статора. Число потокосцеплений будем обозначать через Ψ . Таким образом, поток рассеяния статора равен:

$$\Psi_s = Si; \quad (105)$$

здесь i — сила тока статора, S — коэффициент самоиндукции для потока рассеяния обмотки статора. Так как ток i переменный, то поток Ψ_s тоже переменный, изменяющийся так же, как и ток. При своем изменении поток Ψ_s пересекает обмотку статора и индуктирует в ней э. д. с. самоиндукции или, как обычно ее называют, э. д. с. рассеяния. Величина э. д. с. рассеяния

$$e_s = \omega \Psi_s 10^{-8} = \omega Si 10^{-8} = x_s i \text{ вольт.}$$

Коэффициент $x_s = \omega S 10^{-8}$ носит название реактивного сопротивления обмотки статора. Принимая ток изменяющимся по синусоиде, получаем действующее значение э. д. с. рассеяния

$$E_s = \frac{x_s I_{\max}}{\sqrt{2}} = x_s I; \quad (106)$$

¹⁾ См. В. Ф. Миткевич. Физические основы электротехники, § 99. Ленинград, 1932.

здесь $I_{\max}$ — амплитуда тока, I — действующее значение. Вычисление x_s производится по формуле:

$$x_s = \omega S 10^{-8} = \omega \frac{\Psi_s}{I} 10^{-8}; \quad (107)$$

таким образом, для вычисления x_s необходимо знать величину Ψ_s . Кривая м. д. с. якоря состоит из основной гармоник, неподвижной относительно полюсов и ряда высших гармоник, движущихся относительно полюсов (§ 70). Поток основной гармоник, проходящий через междужелезное пространство в ротор, называется потоком реакции якоря (§§ 66, 73 — 74); остальная часть этого потока (не проникающая в ротор), а также поток, создаваемый всеми высшими гармониками м. д. с. якоря, относят к потоку рассеяния статора. Учет потока высших гармоник можно производить одновременно с учетом потока рассеяния основной гармоник, так как э. д. с., индуцируемые ими, имеют одинаковую частоту, равную частоте сети. Это происходит потому, что высшие гармоники движутся в пространстве со скоростью, обратно пропорциональной порядку гармоники, но имеют числа полюсов, пропорциональные порядку гармоники. Для вычисления поток рассеяния Ψ_s разбивают обычно на четыре части:

1) поток, создаваемый высшими гармониками м. д. с. якоря и проходящий в радиальном направлении через междужелезное пространство; эта часть потока не зависит от основного потока полюсов; остальная часть потока учитывается одновременно с перечисленными ниже составляющими потока рассеяния основной гармоник; 2) поток рассеяния, замыкающийся вокруг лобовых частей обмотки; он проходит почти исключительно по воздуху; от основного потока полюсов он не зависит; 3) поток, замыкающийся вокруг активных частей обмотки и проходящий поперек впадины; 4) поток, замыкающийся вокруг активных частей и проходящий через головки зубцов и междужелезное пространство. Последние два потока не могут существовать самостоятельно, так как по этим частям машины проходит и результирующий поток междужелезного пространства, имеющий одинаковую с ними скорость относительно статора. Под действием потока рассеяния результирующий поток отклоняется от своего пути (рис. 102). Вследствие такого отклонения с данным витком сцепляется несколько меньший результирующий поток; величина уменьшения равна величине потока рассеяния активной части проводника. Если пренебречь насыщением зубцов, то поток рассеяния активных частей обмотки будет прямо пропорционален току и влияние его на э. д. с. можно учесть отдельно от результирующего потока. Практически так и поступают, так как пренебрежение насыщением зубцов при учете величины потока рассеяния вносит очень незначительную ошибку. Величина x_s характеризует поток рассеяния статора только при установившемся режиме. При неустановившихся режимах поток рассеяния статора зависит от уравнивающих токов в роторе и поэтому при изучении неустановившихся режимов вместо x_s вводят другие значения реактивных сопротивлений; при этом уже нельзя пренебрегать насыщением (см. §§ 180 — 184, 206 — 208).

77. Поток рассеяния полюсов.

Полный поток полюсов Φ_n равен:

$$\Phi_n = \Phi + \Phi_{\sigma n}; \quad (108)$$

здесь Φ — поток, входящий в статор, — основной поток полюсов; $\Phi_{\sigma n}$ — поток рассеяния полюсов, или поток рассеяния ротора (§ 66). Основной поток полюсов Φ зависит от насыщения машины;

поэтому в насыщенной машине прямой пропорциональности между током возбуждения и потоком Φ нет; пропорциональность наблюдается только в ненасыщенной машине. Поток рассеяния полюсов Φ_{sn} проходит, главным образом, по воздуху (в машинах с явно выраженными полюсами) или по ненасыщенным частям ротора (в машинах с цилиндрическим ротором), поэтому проводимость для него можно считать постоянной. Следовательно, поток Φ_{sn} прямо пропорционален току возбуждения.

Обозначая

$$\tau_r = \frac{\Phi_{sn}}{\Phi}, \quad (109)$$

получаем

$$\Phi_n = \Phi (1 + \tau_r); \quad (110)$$

величина τ_r называется коэффициентом рассеяния Гейланда для ротора. Таким образом, поток рассеяния полюсов равен:

$$\Phi_{sn} = \tau_r \Phi. \quad (111)$$

Коэффициент рассеяния τ_r зависит от величины проводимости для магнитного потока рассеяния. На основании вышесказанного, в ненасыщенной машине τ_r является величиной постоянной. В этом случае, очевидно, поток рассеяния ротора прямо пропорционален основному потоку полюсов. Поэтому в таких машинах влияние потока рассеяния полюсов при нормальном режиме работы синхронной машины сказывается только в необходимости увеличивать на несколько процентов ампер-витки возбуждения, что обычно производится при расчете магнитной цепи. В машинах насыщенных коэффициент τ_r с увеличением тока возбуждения растет. Однако, в обычных машинах увеличение коэффициента τ_r редко превосходит 30%, от значения τ_r при холостом ходе,¹⁾ поэтому изменением τ_r при нагрузке можно пренебречь и производить учет влияния τ_r так же, как в ненасыщенных машинах при расчете магнитной цепи. Таким образом, специального учета влияния потока рассеяния полюсов на работу машины в нормальном режиме можно не производить. Специальный учет влияния потока рассеяния полюсов необходимо производить только при переходных (неустановившихся) режимах, в особенности, при коротких замыканиях (§ 182). Рассеяние полюсов часто учитывают коэффициентом рассеяния Голкинсона:

$$\sigma = 1 + \tau_r,$$

тогда

$$\Phi_n = \sigma \Phi.$$

Величина коэффициента рассеяния σ в синхронных машинах с явно выраженными полюсами приведена в табл. IV.

Таблица IV.

Значения коэффициента рассеяния σ .

Машины с малым полюсным делением τ и относительно большим отношением k высоты (радиальной) полюсного сердечника к его ширине	1,42 $\div$ 1,32
При $\tau = 20 \div 30$ см и $k = 1$	1,32 $\div$ 1,22
При больших τ и малых значениях k	1,22 $\div$ 1,15

¹⁾ В. А. Толвинский. Синхронные машины. Петроград, 1923.

ГЛАВА VI.

ДИАГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ синхронных машин.

78. Общие замечания.

При нагрузке синхронной машины напряжение на зажимах у нее U изменяется по сравнению с э. д. с. холостого хода E_0 по причинам: 1) изменения потока междужелезного пространства, вызванного реакцией якоря; 2) возникновения падений напряжения в обмотке статора. Разность $E_0 - U$ носит название изменения напряжения (§ 79). Так как все величины, от которых зависит изменение напряжения, могут изменяться не только по величине, но и по фазе, то определение изменения напряжения проще всего производить графически, пользуясь векторными диаграммами, или, как их обычно называют в данном случае, диаграммами напряжения. Из предложенных диаграмм получили распространение диаграмма Бен-Эшенбурга (Behn-Eschenburg), диаграмма Потье (Potier) и диаграмма Блонделя (Blondel), предложенная Блонделем и разработанная Арнольдом и Ла-Куrom (Arnold и la Cour).

79. Изменение напряжения при нагрузке.

Изменение напряжения при нагрузке $E_0 - U$ обычно выражают в процентах. Возможны два случая.

1) При холостом ходе на зажимах машины установлено номинальное напряжение $U_N = E_0$. При неизменных токе возбуждения и скорости вращения машина нагружается, причем напряжение у нее изменяется и становится равным U . В этом случае процентное изменение напряжения

$$\xi = \frac{U_N - U}{U_N} 100 = \frac{E_0 - U}{E_0} 100 \quad (112)$$

носит название процентного понижения напряжения, так как при обычно встречающихся индуктивной и активной нагрузках напряжение на зажимах при нагрузке понижается: $U < E_0$. Тот же термин сохраняют и при емкостной нагрузке, хотя тогда $U > E_0$; следовательно, при емкостной нагрузке ξ — величина отрицательная.

2) При нагрузке на зажимах машины установлено номинальное напряжение U_N . При неизменных токе возбуждения и скорости вращения машина разгружается; при этом напряжение у нее изменяется и становится равным э. д. с. холостого хода $U_0 = E_0$. В этом случае процентное изменение напряжения

$$\xi = \frac{U_0 - U_N}{U_N} 100 = \frac{E_0 - U_N}{U_N} 100 \quad (113)$$

называют процентным повышением напряжения, так как при обычно встречающихся индуктивной и активной нагрузках напряжение на зажимах при снятии нагрузки повышается: $U_0 > U_N$. При емкостной нагрузке $U_0 < U_N$; в этом случае ϵ — величина отрицательная.

По абсолютной величине в насыщенных машинах $\epsilon \geq$ (§ 94).

По нормам IX В. Э. С. повышение напряжения синхронного генератора при неизменных скорости вращения и токе возбуждения и при $\cos \varphi = 0,8$ не должно превосходить 50%. Нормальные значения повышения напряжения в синхронных машинах приведены в табл. V по данным P. Reinisch.¹⁾

Таблица V.

Процентное повышение напряжения $\epsilon\%$ синхронных генераторов.

Тип генератора	% повышение напряжения		Кратность тока короткого замыкания ²⁾
	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	
а) Трехфазные:			
Быстроходные машины	8 ÷ 15	18 ÷ 31	2,0 ÷ 1,4
Тихоходные "	9 ÷ 13	18 ÷ 25	2,5 ÷ 2,0
Трубогенераторы	16 ÷ 25	30 ÷ 48	1,2 ÷ 0,7
б) Однофазные:			
Генераторы для питания железных дорог . .	17 ÷ 20	35 ÷ 40	1,2 ÷ 0,8

Указываемое для машины значение повышения напряжения, согласно нормам, соответствует постоянству скорости вращения. В эксплуатационных условиях при внезапном отключении генератора от сети скорость вращения его обычно увеличивается, вследствие чего э. д. с. холостого хода получает добавочное приращение. Если возбудитель сидит на одном валу с генератором, то напряжение возбудителя, а следовательно, и сила тока возбуждения также возрастают. Поэтому получающееся повышение напряжения оказывается большим, чем это соответствует формуле (113). Влияние увеличения скорости вращения сказывается тем сильнее, чем меньше насыщена машина.

80. Диаграмма ненасыщенной машины с цилиндрическим ротором.

Рассмотрим ненасыщенную машину с цилиндрическим ротором. Основной поток полюсов Φ направлен по оси полюсов и индуцирует в обмотке статора э. д. с.

$$E_0 = 4f_B f_m \Phi v \cdot 10^{-8} \text{ вольт,}$$

отстающую во времени на 90° от потока. Изобразим поток Φ и э. д. с. E_0 в виде двух перпендикулярных векторов (рис. 123). Если машина нагружена током I , отстающим от э. д. с. E_0 на угол ψ , то в ней появляется еще поток статора Φ_1 . Этот поток состоит из двух составляющих: потока

¹⁾ Hütte, Berlin, 1926, 25 изд., том II, отд. 5. „Elektrotechnik. P. Reinisch. Elektrische Generatoren und Motoren.

²⁾ О кратности тока короткого замыкания см. § 217.

потока Φ_s , а так как последний совпадает по направлению с током, то э. д. с. E_s отстает, следовательно, на 90° от тока I :

$$\dot{E}_s = -jx_s I;$$

следовательно, э. д. с. E_s имеет одинаковое направление с E_a . Величина x_s называется реактивным сопротивлением рассеяния обмотки статора. Иногда пользуются величиной, обратной э. д. с. рассеяния, называемой реактивным падением напряжения: $jx_s I = -\dot{E}_s$; по абсолютной величине реактивное падение напряжения равно $x_s I$. Так как обмотка статора обладает активным сопротивлением r , то при прохождении по ней тока возникает активное падение напряжения rI ; по направлению rI совпадает с током. Напряжение на зажимах машины равно геометрической сумме всех э. д. с., индуктируемых в обмотке, минус падение напряжения (рис. 123):

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_s - rI;$$

активное падение напряжения rI на рис. 123 откладываем навстречу току, в соответствии со знаком минус. Иногда активное падение напряжения заменяют противоположной ему э. д. с. $\dot{E}_r = -rI$; эта э. д. с. идет на компенсацию падения напряжения; тогда, очевидно:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_s + \dot{E}_r.$$

Выше указывалось, что E_a и E_s имеют одинаковое направление и обе пропорциональны силе тока I ; поэтому их сумму обычно заменяют одной величиной

$$E_x = E_a + E_s = (x_a + x_s) I = x_d I;$$

по направлению E_x отстает на 90° от тока: $\dot{E}_x = -jx_d I$. Величину $x_d I$ называют синхронным падением напряжения. Сопротивление $x_d = x_a + x_s$ называют синхронным реактивным сопротивлением; оно учитывает реакцию якоря и сопротивление рассеяния.

§1. Диаграмма напряжения при коротком замыкании.

При коротком замыкании на зажимах машины напряжение равно нулю. Поэтому диаграмма напряжений имеет вид рис. 124. Очевидно, э. д. с. холостого хода при этом равна:

$$\dot{E}_{ok} = \dot{E}_r + \dot{E}_x \text{ или } E_{ok} = I_k \sqrt{r^2 + x_d^2}.$$

Так как r обычно очень мало по сравнению с x_d , то можно считать, что

$$E_{ok} = I_k x_d.$$

В этом случае реакция якоря является чисто размагничивающей. В пренебрежении активным сопротивлением r основной поток полюсов Φ полностью компенсируется потоком статора $\Phi_a + \Phi_s$. Так как в ненасыщенной машине потоки прямо пропорциональны ампер-виткам, то, очевидно, ампер-витки возбуждения при коротком замыкании AW_k затрачиваются на: 1) преодоление размагничивающих ампер-витков якоря AW_a и 2) на создание э. д. с. E_s , компенсирующей реактивное падение напряжения Ix_s . Обозначая ампер-витки, необходимые для создания E_s , через AW_s , получаем

$$AW_k = AW_a + AW_s.$$

Откладывая на характеристике холостого хода (рис. 125) ампер-витки AW_k и вычитая из них ампер-витки AW_a , находим ампер-витки AW_s , создающие э. д. с. $E_s = x_s I$. Треугольник ASK носит название треугольника Потье (A. Potier). Электродвижущая сила E_s прямо пропорциональна току I ; так как AW_a также пропорционально I , то стороны треугольника Потье прямо пропорциональны току статора I (см. также § 172). При коротком замыкании сторона $\overline{AS}$ треугольника Потье пропорциональна току короткого замыкания I_k . Откладывая для разных значений ампер-витков короткого замыкания AW_k отрезки $a_1 s_1, a_2 s_2, \dots$ пропорциональные сторонам $\overline{AS_1}, \overline{AS_2}, \dots$ треугольника Потье, получим зависимость тока короткого замыкания от ампер-витков возбуждения (рис. 126). Пока вершина A треугольника Потье движется по прямолинейной части характеристики холостого хода, характеристика короткого замыкания является прямой линией.

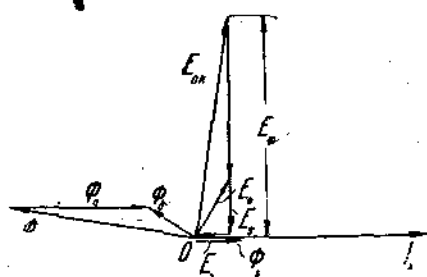


Рис. 124. Диаграмма напряжений при коротком замыкании.

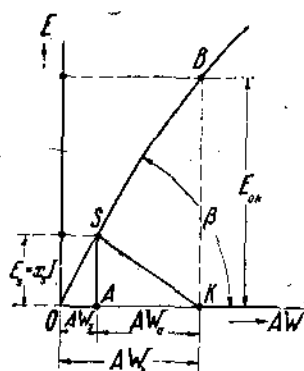


Рис. 125. Треугольник Потье.

До сих пор мы вели все рассуждения применительно к ненасыщенной машине. При коротком замыкании вследствие размагничивающего действия ампер-витков реакции якоря любую машину практически можно считать ненасыщенной, вследствие чего характеристика короткого замыкания у нее прямая линия (точка S треугольника Потье даже при больших значениях AW_k не выходит за пределы прямолинейной части характеристики холостого хода).

Синхронное сопротивление для ненасыщенной машины легко найти из опыта короткого замыкания. Находим из характеристики холостого хода э. д. с. E_{0k} , соответствующую ампер-виткам короткого замыкания AW_k (рис. 125). Тогда

$$x_d = \frac{E_{0k}}{I_k},$$

где I_k — ток короткого замыкания, соответствующий ампер-виткам AW_k . Так как для ненасыщенной машины э. д. с. пропорциональна ампер-виткам, то

$$E_{0k} = \overline{KB} = \overline{OK} \operatorname{tg} \beta = AW_k \operatorname{tg} \beta = (AW_s + AW_a) \operatorname{tg} \beta = (c_s + c_a) \sqrt{2} I_k \operatorname{tg} \beta;$$

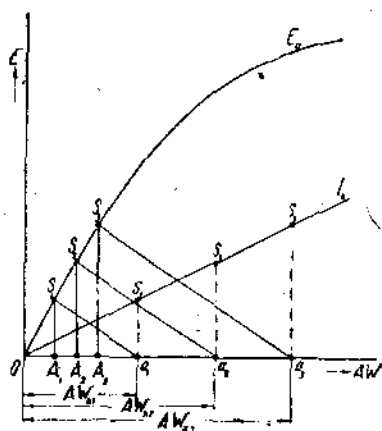


Рис. 126. Характеристика короткого замыкания.

отсюда

$$x_d = \frac{E_{0k}}{I_k} = \sqrt{2}(c_x + c_a) \operatorname{tg} \beta = c_1 \operatorname{tg} \beta.$$

Следовательно, синхронное сопротивление в ненасыщенной машине (т. е. в машине, имеющей прямолинейную характеристику холостого хода) пропорционально тангенсу угла наклона характеристики холостого хода.

82. Диаграмма Бен-Эшенбурга.

В ненасыщенной машине с цилиндрическим ротором все магнитные потоки пропорциональны вызвавшим их м.д.с.; так как э.д.с. прямо пропорциональны потокам, то в ненасыщенной машине э.д.с. пропорциональны м.д.с. Вследствие этого достаточно строить на диаграмме только одну из этих пропорциональных друг другу величин. В диаграмме Бен-Эшенбурга строят только э.д.с. (рис. 127); откладывая из конца вектора э.д.с. E_0 э.д.с. E_x , компенсирующую синхронное падение напряжения, и э.д.с. E_r , компенсирующую активное падение напряжения, находим U . Активное падение напряжения очень мало. Если пренебречь им (рис. 128), то

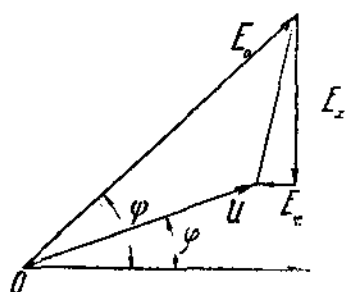


Рис. 127. Диаграмма Бен-Эшенбурга.

$$\vec{U} = \vec{E}_0 + \vec{E}_x.$$

Диаграмма Бен-Эшенбурга в действительности была предложена для насыщенных машин. В насыщенной машине характеристика холостого хода отклоняется от прямой линии (рис. 129). Определяя по предыдущему

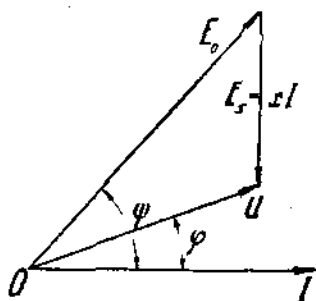


Рис. 128. Диаграмма Бен-Эшенбурга в пренебрежении активным падением напряжения.

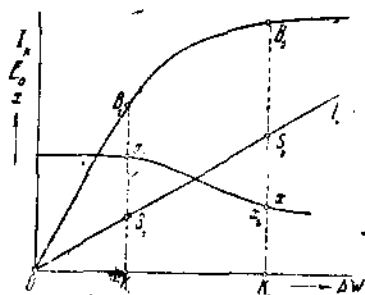


Рис. 129. Зависимость синхронного реактивного сопротивления от насыщения машины.

синхронное сопротивление x_d по характеристикам холостого хода и короткого замыкания, получим для насыщенной части характеристики холостого хода значение $x_2 = \frac{E_{02}}{I_{k2}} = \frac{\bar{K}_2 \bar{B}_2}{\bar{K}_2 \bar{S}_2}$ значительно меньшее, чем для прямо-

линейной части $x_1 = \frac{E_{01}}{I_{k1}} = \frac{\bar{K}_1 \bar{B}_1}{\bar{K}_2 \bar{S}_1}$. Будем синхронное сопротивление для насыщенной машины, используемое при построении диаграммы Бен-Эшенбурга, обозначать через x (без индекса). Уменьшение x при насыщении машины обусловлено тем, что при наступлении насыщения ампер-

витки реакции якоря создают гораздо меньший поток реакции, а следовательно, вызывают меньшее падение напряжения $E_x = xI$. На рис. 129 приведены значения x при разных значениях ампер-витков возбуждения. Таким образом, в насыщенной машине синхронное сопротивление x — величина переменная, зависящая от насыщения, а следовательно, от тока возбуждения. При построении диаграммы Бен-Эшенбурга приходится поэтому определять x каждый раз для данного возбуждения.

При определении x по характеристике короткого замыкания получаем величину x , соответствующую режиму короткого замыкания. При таком режиме результирующий поток междужелезного пространства очень мал (он равен потоку рассеяния статора), поэтому машина насыщена очень слабо. При нормальной работе синхронной машины результирующий поток междужелезного пространства значительно больше, поэтому реакция якоря сказывается слабее. Вследствие этого значения x для данного тока возбуждения, определенные по характеристике короткого замыкания, получаются все же большими, чем значение синхронного сопротивления при том же возбуждении, но при нормальной работе. Поэтому диаграмма Бен-Эшенбурга, построенная для нормальной работы, дает изменение напряжения всегда большее, чем в действительности.

Точной диаграмма Бен-Эшенбурга является лишь для ненасыщенных машин с цилиндрическим ротором. В машинах с явно выраженными полюсами величина потока реакции Φ_a зависит от угла сдвига фаз φ ; это обстоятельство в диаграмме Бен-Эшенбурга учтено быть не может.

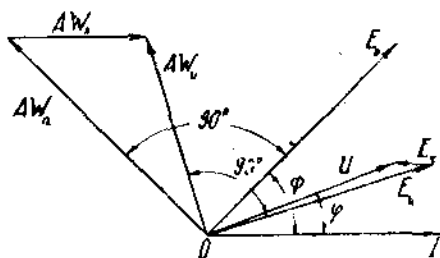


Рис. 130. Диаграмма Ротерта.

§5*. Диаграмма Ротерта.

Диаграмма Ротерта (A. Rothert) выводится из той же диаграммы для ненасыщенной машины (§ 80), что и диаграмма Бен-Эшенбурга, но, в отличие от последней, в диаграмме Ротерта пользуются векторами ампер-витков, а не э.д.с. Построение ее производится следующим образом (рис. 130). Из характеристики холостого хода (рис. 132) находят ампер-витки полюсов AW_p , соответствующие э.д.с. холостого хода E_p . Прибавляя к ним ампер-витки короткого замыкания $AW_k = AW_s + AW_a$, соответствующие потоку статора $\Phi_s + \Phi_a$, на-

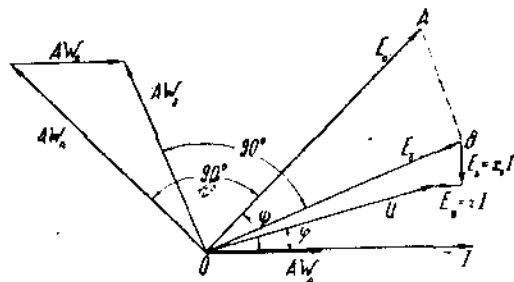


Рис. 131. Диаграмма Потье.

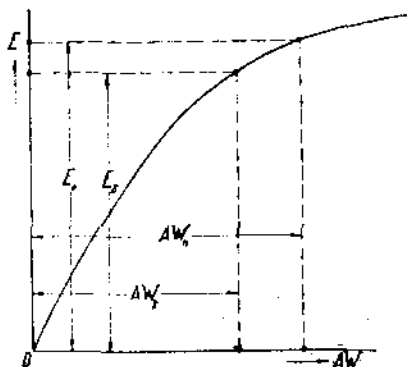


Рис. 132. Характеристика холостого хода.

ходим результирующие ампер-витки машины AW_n . Этим ампер-виткам на характеристике холостого хода соответствует э.д.с. E_n . Откладывая падение напряжения $E_r = rI$, находим напряжение на зажимах U .

Диаграмма Ротерта точна только для ненасыщенных машин, однако, предложена она была для насыщенных машин. Так как ампер-витки AW_n определяются из характеристики короткого замыкания, то величина AW_n соответствующая э.д.с. E_n , получается для ненасыщенного состояния машины. При насыщении той же э.д.с. E_n соответствуют гораздо большие ампер-витки AW_n (§ 206), поэтому для насыщенных машин диаграмма Ротерта дает всегда преуменьшенное значение падения напряжения. В настоящее время диаграмма Ротерта не применяется.

84. Диаграмма Потье.

Для насыщенной машины с цилиндрическим ротором диаграмма Бен-Эшенбурга (§ 82) несправедлива, так как в насыщенной машине результирующий поток междужелезного пространства Φ_z не равен сумме основного потока полюсов и потока реакции, вычисленных каждый в отдельности. Определение величины Φ_z в насыщенной машине можно произвести только по вызывающим его результирующим ампер-виткам.

Ампер-витки полюсов AW_n , создающие основной поток, направлены по оси полюсов; при холостом ходе этими ампер-витками создается э.д.с. E_0 , отстающая от AW_n во времени на 90° (рис. 131). При нагрузке машины током I , отстающим на угол ψ от э.д.с., появляется поток реакции Φ_a , обусловленный ампер-витками реакции якоря AW_a ; направление AW_a и Φ_a одинаково с направлением тока I . Результирующие ампер-витки AW_z равны геометрической сумме ампер-витков AW_n и AW_a :

$$AW_z = AW_n + AW_a.$$

Зная результирующие ампер-витки AW_z , можно по кривой намагничивания машины найти вызванный ими результирующий поток Φ_z ; направление его одинаково с направлением AW_z . Электродвижущая сила, индуцируемая потоком Φ_z в обмотке статора, равна E_z ; она отстает на 90° от Φ_z , а следовательно, и от AW_z . Практически пользуются не кривой намагничивания, а характеристикой холостого хода (рис. 132); в этом случае по ампер-виткам AW_z находят непосредственно E_z . Отложив э.д.с. $E_z = x_s I$ и $E_r = rI$ (см. § 80), находим напряжение на зажимах машины как геометрическую сумму:

$$U = E_z + E_s + E_r.$$

Падения напряжения $x_s I$ и rI пропорциональны току (§ 80). Отрезок AB представляет изменение э.д.с., вызванное реакцией якоря; он не пропорционален току и не перпендикулярен к нему.

Диаграмма Потье справедлива и точна для насыщенных машин с цилиндрическим ротором (для турбогенераторов); для машин с явно выраженными полюсами она не точна, так как в этих машинах поток реакции зависит не только от ампер-витков, но и от угла ψ .

85. Диаграмма Blondеля.

В машине с явно выраженными полюсами величина магнитного потока реакции якоря зависит от угла сдвига фаз между э.д.с. и током Φ , вследствие чего результирующий поток междужелезного пространства Φ_s в этом случае обусловлен не только величиной результирующих ампер-витков, но и расположением их относительно оси полюсов. Разложим результирующий поток на два направления—продольное (вдоль оси полюсов) и поперечное (перпендикулярно к оси полюсов); каждая составляющая потока создается соответствующей составляющей ампер-витков—продольной или поперечной. В продольной оси действуют ампер-витки полюсов и эквивалентные продольные ампер-витки реакции якоря (§ 74).

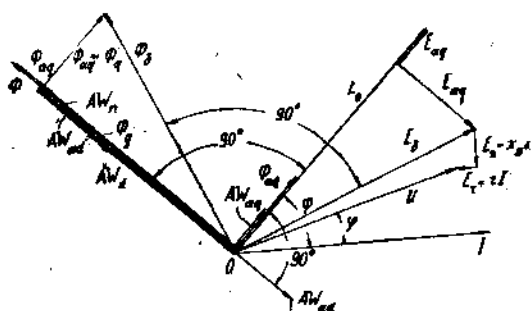


Рис. 133. Диаграмма Blondеля.

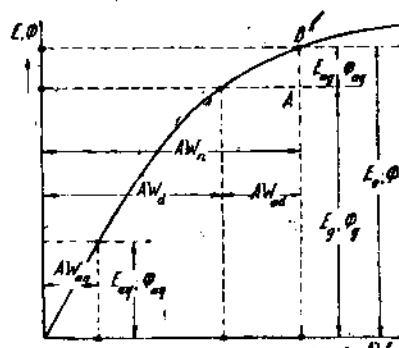


Рис. 134. К построению диаграммы Blondеля.

В поперечной оси действуют только эквивалентные поперечные ампер-витки реакции якоря (§ 74). Вычислив продольные и поперечные ампер-витки и найдя по ним соответствующие составляющие потока, можно определить поток Φ_s , равный геометрической сумме продольной и поперечной составляющих потока.

Пусть основной поток полюсов равен Φ (рис. 133); э.д.с. холостого хода равна E_0 , ток нагрузки отстает от E_0 на угол ψ . Ампер-витки реакции якоря $AW_a = 0,9 f_a m w l$, имеющие одинаковое направление с током, разложим на продольные $AW_a \sin \psi$ и поперечные $AW_a \cos \psi$ и учтем из них лишь эквивалентные продольные и поперечные ампер-витки:¹⁾

$$AW_{ad} = k_a AW_a \sin \psi;$$

$$AW_{aq} = k_q AW_a \cos \psi.$$

AW_{ad} направлены по оси полюсов, AW_{aq} — перпендикулярно к оси. Полные ампер-витки в продольной оси AW_d равны алгебраической сумме ампер-витков полюсов AW_p и ампер-витков AW_{ad} ; при индуктивной нагрузке это будет арифметическая разность, при емкостной—арифметическая сумма (§ 75). Отложив на кривой намагничивания машины резуль-

¹⁾ В дальнейшем всем величинам, относящимся к продольной оси, будем присписывать индекс *d* (direct axis), к поперечной оси — индекс *q* (quadrature axis). Обозначения с индексами *d* и *q* относятся всегда к величинам, не зависящим от насыщения или вычисленным для ненасыщенной машины. Там, где учтено насыщение для продольной оси, будем пользоваться индексом *g* (Gegenfeld); в поперечной оси можно принять все величин не зависящими от насыщения, поэтому оставляем индекс *q*.

тирующие продольные ампер витки AW_d (рис. 134), находим продольный поток Φ_g . В поперечной оси машины действуют только ампер-витки AW_{aq} ; по ним из кривой намагничивания находим поперечный поток $\Phi_q = \Phi_{aq}$. Результирующий поток междужелезного пространства Φ_s равен геометрической сумме потоков Φ_g и Φ_q ; здесь Φ_g — продольная, а Φ_q — поперечная составляющие результирующего потока Φ_s ; через Φ_{ag} и Φ_{aq} обозначены продольная и поперечная составляющие потока реакции якоря (рис. 133). Электродвижущая сила, индуцируемая в обмотке статора при нагрузке, равна $E_s = 4f_B f_w \Phi_s w 10^{-8}$ и по направлению отстает на 90° от потока Φ_s . Напряжение на зажимах машины U находим как геометрическую сумму индуцированной э.д.с. E_s и э.д.с. E_a и E_r (§ 80).

Так как э.д.с. прямо пропорциональна потоку, от E_s можно представить (как и поток Φ_s) в виде геометрической суммы э.д.с. E_0 , E_{ag} , E_{aq} (рис. 133). Здесь E_{ag} и E_{aq} — э.д.с., индуцируемые соответственно продольными и поперечными потоками реакции Φ_{ag} и Φ_{aq} или соответствующими им ампер-витками AW_{ad} и AW_{aq} . Если на характеристике холостого хода отложен не поток, а, как обычно делают, э.д.с., то E_{ag} и E_{aq} находят без предварительного определения потоков. Ампер-виткам AW_n соответствует E_0 ; по $AW_n + AW_{ad}$ находим $E_0 + E_{ag}$ (рис. 134). Очевидно, E_{ag} равна отрезку $\overline{AB}$, соответствующему ампер-виткам AW_{ad} , отложенным от ампер-витков AW_n в ту или другую сторону, в зависимости от того, индуктивная или емкостная нагрузка. По ампер-виткам AW_{aq} находим E_{aq} . По направлению все э.д.с. отстают на 90° от создающих их ампер-витков. Диаграмма Блонделя справедлива для всех машин.

86. Построение диаграмм напряжения.

Определение изменения напряжения обычно производится графически — при помощи диаграмм напряжения. Непосредственное определение изменения напряжения из опыта не экономично и при больших мощностях машин трудно выполнимо из-за необходимости наличия нагрузочных реостатов. При построении диаграммы могут встретиться два случая.

1. Известен ток возбуждения (или, что то же, э. д. с. холостого хода E_0) и величина нагрузки; требуется найти напряжение на зажимах U . Такая задача соответствует нахождению процентного понижения напряжения (§79), поэтому построение в этом случае называют построением диаграммы для случая понижения напряжения, сохраняя этот термин и в случае емкостной нагрузки, при которой напряжение при нагрузке больше э. д. с. холостого хода.

2. Известно напряжение на зажимах при нагрузке; требуется найти необходимый ток возбуждения (или э. д. с. холостого хода). Этот случай аналогичен определению процентного повышения напряжения, поэтому такое построение называют построением для случая повышения напряжения.

Соответственно этим двум случаям имеем два разных метода построения: в первом случае при нахождении U по E_0 мы должны прибавить к E_0 все э.д.с.; при этом падение напряжения I заменяем обратной ему э.д.с. E_r , см. § 80 (рис. 135, а). Во втором случае решаем обратную задачу: по сумме U находим одну из составляющих, а именно E_0 . Для этого из U нужно вычесть все э.д.с. (рис. 135, б). Для того чтобы вычесть какой-либо вектор, достаточно прибавить равный ему вектор, обратный по направлению. Поэтому все стрелки у э.д.с. и у падений напряжения на рис. 135, б изменяются на обратные по сравнению с рис. 135, а. Обычно

строят диаграммы для второго случая — повышения напряжения, вследствие большей простоты и точности построения (§§ 88 — 89). В дальнейшем на чертежах знак минус у э.д.с. и падений напряжения для упрощения ставить не будем.

Построение диаграмм производят для фазных значений тока и напряжения. В трехфазных генераторах, соединенных звездой, очевидно, изменение линейного напряжения при симметричной нагрузке в $\sqrt{3}$ раз больше фазного. Обычно для трехфазных машин характеристика холостого хода

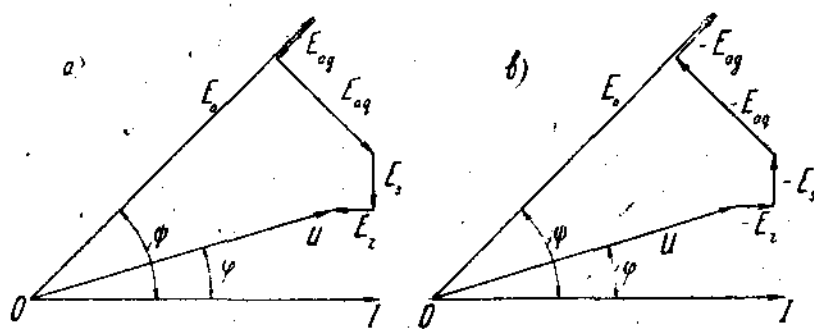


Рис. 135. Построение диаграммы Blondel для случая повышения напряжения (а) и для случая понижения напряжения (б).

снимается для линейного напряжения, поэтому и построение диаграммы напряжений целесообразнее вести для линейного напряжения. Пользуясь характеристикой холостого хода, снятой для линейного напряжения, и оставляя ампер-витки полюсов и реакции якоря без изменения, получаем соответствующие им э. д. с., увеличенные в $\sqrt{3}$ раз. Для того чтобы увеличить $\sqrt{3}$ раз и падения напряжений, достаточно, оставляя заданную силу тока неизменной, увеличить в $\sqrt{3}$ раз сопротивление одной фазы. Построенная по этим данным диаграмма дает изменение линейного напряжения.

87. Построение диаграммы Бен-Эшенбурга.

Для построения диаграммы Бен-Эшенбурга, кроме указанных ниже величин, характеризующих режим работы машины, необходимо знать два параметра машины — синхронное реактивное сопротивление x и активное сопротивление r . Оба сопротивления легко найти из опыта (§§ 82, 205). Сопротивление r обычно выражают в омах, x выражают в омах или в процентах. В последнем случае под x подразумевают выраженный в процентах от номинального напряжения U_N синхронное падение напряжения при номинальном токе I_N :

$$x\% = \frac{x I_N}{U_N} 100 = \frac{\sqrt{3} x I_N}{U_{Nl}} 100; \quad (114)$$

здесь x — синхронное реактивное сопротивление одной фазы в омах, а $x\%$ — то же, в процентах, I_N — линейный, I_{Nl} — фазный ток, U_{Nl} — линейное, U_N — фазное напряжение.

а) Повышение напряжения. Построение производят для определенных (обычно номинальных) напряжения U , силы тока нагрузки I , характера нагрузки, т. е. угла сдвига фаз φ между напряжением и силой

тока (обычно задан в виде функции $\cos \varphi$). Строим на рис. 136 U и под углом φ к нему I (при индуктивной нагрузке $\varphi < 0$, ток отстает от U ; при активной $\varphi = 0$ — совпадает по направлению, при емкостной $\varphi > 0$ —

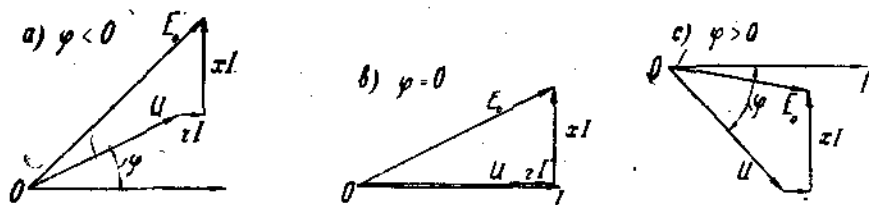


Рис. 136. Построение диаграммы Бен-Эшенбурга для случая повышения напряжения при индуктивной (а), чисто активной (б) и емкостной (с) нагрузке.

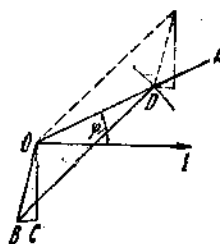


Рис. 137. Построение диаграммы Бен-Эшенбурга для случая понижения напряжения.

опережает). Для нахождения E_0 мы должны из U вычесть E_r и E_x , что равносильно прибавлению к U векторов $E_r = rI$, совпадающего с I , и $E_x = xI$, опережающего I на 90° . На рис. 136 произведено построение для индуктивной (а), активной (б) и емкостной (с) нагрузок. Построение во всех трех случаях одинаково.

б) Понижение напряжения. Построение ведут для заданных тока возбуждения i_n или э. д. с. холостого хода E_0 , тока нагрузки I , $\cos \varphi$ нагрузки. Величины i_n и E_0 связаны между собою характеристикой холостого хода, поэтому по известной величине одной всегда может быть найдена другая.

Под углом φ к вектору тока I проводим линию OA — направление вектора напряжения U (рис. 137). Строим у точки O треугольник падений напряжения OBC , стороны которого равны $BC = rI$ и $OC = xI$, и из точки B радиусом BD , равным E_0 , отсекаем на линии OA отрезок OD . Вектор OD равен U , в чем не трудно убедиться, перенеся треугольник OBC в точку D , параллельно самому себе.

88. Построение диаграммы Потье.

Для построения диаграммы Потье, кроме указанных ниже величин, характеризующих режим работы машины, необходимо знать следующие параметры машины: ампер-витки реакции якоря AW_a , реактивное сопротивление рассеяния x_s и активное сопротивление r . Все эти величины могут быть найдены из опыта (§§ 206, 215). Сопротивление r выражают обычно в омах, а x_s — в омах или, чаще, в процентах:

$$x_s \% = \frac{x_s I_N}{U_N} 100 = \frac{\sqrt{3} x_s I_N}{U_N} 100; \quad (115)$$

здесь x_s — реактивное сопротивление одной фазы в омах, $x_s \%$ — то же, в процентах; I_N и U_N — линейные ток и напряжение, I_N и U_N — фазные.

а) Повышение напряжения. Заданы U , I и $\cos \varphi$. Откладываем вектор тока I и под углом φ к нему вектор напряжения U (рис. 138). У конца вектора U строим треугольник падений напряжения: активное $rI = AB$

откладываем параллельно I и направляем в ту же сторону; реактивное $x_p J = \overline{BC}$ откладываем перпендикулярно к I в сторону опережения. (Такое направление векторов обусловлено тем, что строим диаграмму для случая повышения напряжения, см. § 86). Вектор $\overline{OC}$ представляет собою индуцированную результирующим потоком междужелезного пространства э. д. с.

$$E_s = \dot{U} + ri + x_p J.$$

По величине E_s из характеристики холостого хода (рис. 132) находим результирующие ампер-витки междужелезного пространства AW_s и откладываем их под углом 90° к вектору E_s в сторону опережения. Ампер-витки реакции якоря AW_a совпадают по направлению с током I . Чтобы

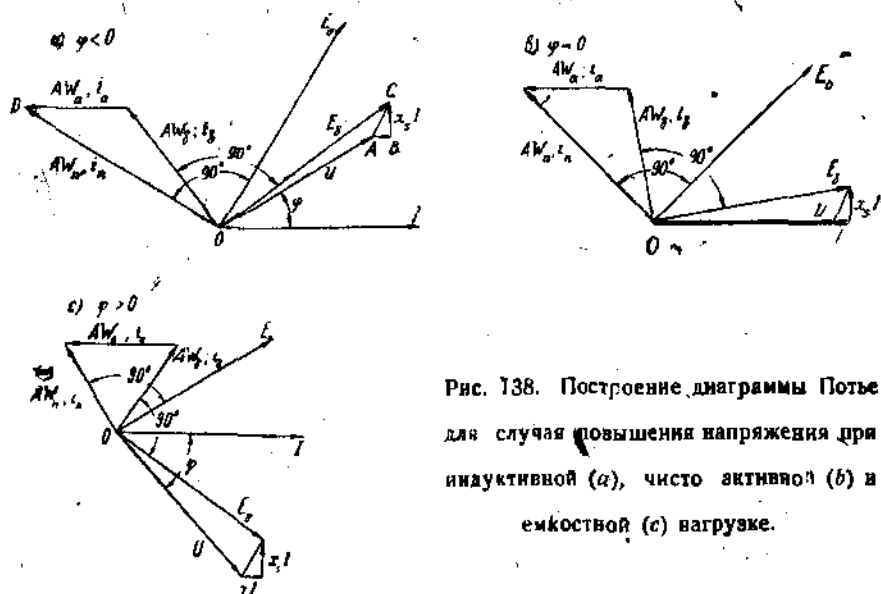


Рис. 138. Построение диаграммы Потье для случая повышения напряжения при индуктивной (а), чисто активной (б) и емкостной (в) нагрузке.

найти ампер-витки полюсов, вычитаем из AW_s ампер-витки AW_a , для чего откладываем AW_a из конца AW_s в сторону, обратную I . Вектор $\overline{OD}$ равен AW_n . По AW_n из характеристики холостого хода находим E_0 ; по направлению E_0 отстает на 90° от AW_n . Так как практически на характеристике холостого хода откладывают ток возбуждения i_n , а не ампер-витки AW_n , то и на диаграмме откладывают векторы ампер-витков в масштабе силы тока возбуждения, т. е. $i_s = AW_s / w_n$; $i_a = AW_a / w_n$; $i_n = AW_n / w_n$.

Для ускорения построения диаграммы Потье для случая повышения напряжения можно изменить ее следующим образом. Повернем векторы ампер-витков на 90° по часовой стрелке; тогда AW_n совпадет с E_0 , AW_s с E_s , AW_a будет перпендикулярно к току I (рис. 139). Построение лучше всего производить на том же графике, где построена характеристика холостого хода. Ход построения ясен из рис. 139, где ампер-витки отложены в масштабе тока возбуждения.

б) Падение напряжения. Заданы i_n (или E_0), I и $\cos \varphi$. Для построения диаграммы в данном случае необходимо знание угла φ между э. д. с. и током нагрузки. Так как этот угол до построения диаграммы не известен, построение приходится производить методом последователь-

ных приближений, вследствие чего диаграмма не может быть построена точно. Проводим под углом φ к вектору тока линию OA — направление вектора U (рис. 140). Под углом $\gamma \approx 1,08\varphi$ (индуктивная нагрузка) или $\gamma \approx 0,95\varphi$ (емкостная нагрузка) проводим линию OB — направление вектора E_s . Соотношения между γ и φ взяты из опытов, как наиболее близкие к действительности. Под углом 90° к OB проводим линию OC — направление вектора ампер-витков AW_s ; на направлении I откладываем в обратную сторону ампер-витки реакции AW_a и из конца их проводим линию $DF \parallel OC$. Из точки O радиусом, равным AW_a , засекаем точку F и находим $DF = AW_s$. По AW_s из характеристики холостого хода находим E_s ; вы-

читая падения напряжения $x_s I$ и rI , находим вектор U . При правильном построении точка N должна попасть на линию OA ; если этого не получается, построение необходимо повторить, изменив угол γ .

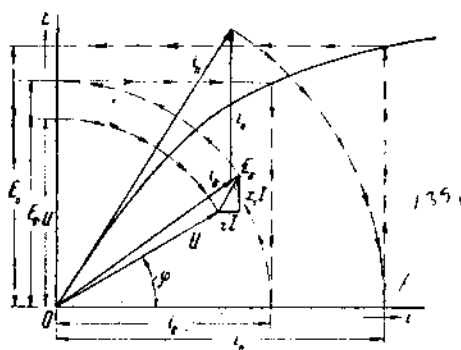


Рис. 139. Практический способ построения диаграммы Потье для случая повышения напряжения.

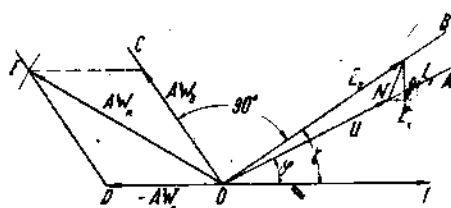


Рис. 140. Построение диаграммы Потье для случая понижения напряжения.

89. Построение диаграммы Blondеля.

Диаграмма Blondеля не может быть построена по данным, полученным из нормального испытания машины. Для построения необходимо знать эквивалентные продольные и поперечные ампер-витки реакции якоря AW_{ad} и AW_{aq} и сопротивления активное r и реактивное x_s . Ампер-витки AW_{ad} и AW_{aq} находят вычислением; опытное определение их требует сложной специальной установки. Диаграмму строят для определенного режима работы, определяемого величинами напряжения, тока и $\cos \varphi$.

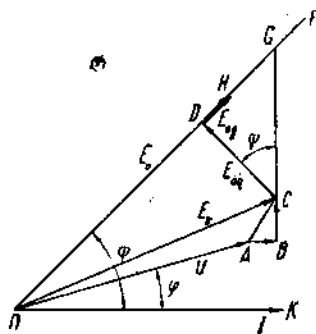


Рис. 141. Построение диаграммы Blondеля для случая повышения напряжения при индуктивной нагрузке.

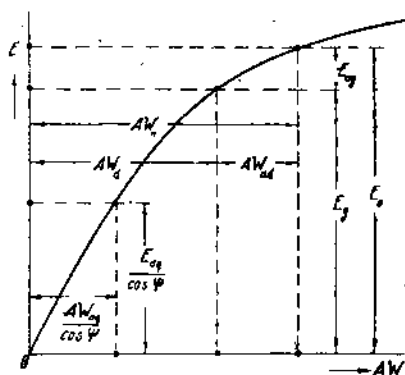


Рис. 142. К построению диаграммы Blondеля при индуктивной нагрузке.

а) **Повышение напряжения.** Построение производят для заданных U , I и $\cos \varphi$. Откладываем вектор тока I и под углом φ к нему вектор напряжения U (рис. 141). Вычитая из U э. д. силы E_r и E_s , находим э. д. с. E_0 , индуктированную результирующим потоком между-железного пространства. Для определения E_0 необходимо из E_s вычесть E_{aq} и E_{ag} . Эти векторы на характеристике холостого хода соответствуют ампер-виткам $AW_{aq} = k_q AW_a \cos \psi$ и $AW_{ad} = k_d AW_a \sin \psi$. До построения диаграммы угол ψ неизвестен, следовательно, и векторы E_{aq} и E_{ag} найдены быть не могут. Построение ведут на основании следующих соображений. Если продолжить линию BC до пересечения с OF , то отрезок $\overline{CG} = E_{aq}/\cos \psi$ что следует из прямоугольного треугольника CDG . Так как сопротивление для поперечного потока реакции

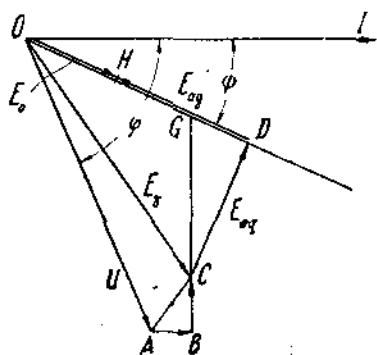


Рис. 143. Построение диаграммы Blondеля для случая повышения напряжения при емкостной нагрузке.

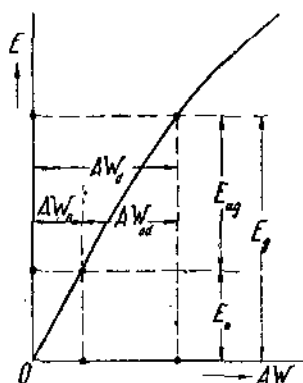


Рис. 144. К построению диаграммы Blondеля при емкостной нагрузке.

сводится, главным образом, к воздушному зазору, то можно считать E_{aq} прямо пропорциональным AW_{aq} (см. § 74). Следовательно, $E_{aq}/\cos \psi$ пропорционально $AW_{aq}/\cos \psi$. Для нахождения $AW_{aq}/\cos \psi$ знания $\cos \psi$ не нужно, так как

$$\frac{AW_{aq}}{\cos \psi} = k_q f_w m \omega I.$$

Таким образом, откладывая на прямоугольной части характеристики холостого хода ампер-витки $AW_{aq}/\cos \psi$, находим по ним $E_{aq}/\cos \psi$ (рис. 142). Откладываем $E_{aq}/\cos \psi$ по направлению BC и соединяем точку G с O . Направление OG дает направление вектора E_0 . Опуская перпендикуляр из C на OG , находим $\overline{CD} = E_{ag}$. Угол GOK равен ψ . Вычисляем продольные ампер-витки:

$$AW_{ad} = k_d AW_a \sin \psi = k_d f_w m \omega I \sin \psi.$$

Откладываем на характеристике холостого хода э. д. с. $E_g = \overline{OD}$ и по ней находим ампер-витки AW_d . Ампер-витки полюсов равны:

$$AW_n = AW_d + AW_{ad}.$$

По величине AW_n из характеристики холостого хода находим $E_0 = \overline{OH}$.

На рис. 143 приведено построение диаграммы для емкостной нагрузки. Отрезок $\overline{CG} = E_{aq}/\cos \psi$ находится по ампер-виткам $AW_{aq}/\cos \psi$ так же, как и в предыдущем случае (рис. 142). Опуская из C перпендикуляр CD на

линию OG , находим $\overline{OD} = E_g$. По E_g находим ампер-витки AW_d (рис. 144). Так как $\psi > 0$ (емкостная нагрузка), то продольные ампер-витки AW_{ad} являются намагничивающими. Вычитая из AW_d ампер-витки AW_{ad} , находим $AW_n = AW_d - AW_{ad}$, по которым определяем E_0 . В этом случае E_{ag} очевидно, надо откладывать от $E_g = \overline{OD}$ в обратную сторону (рис. 143).

б) Падение напряжения. Заданы i_n (или E_0), I и $\cos \varphi$. В этом случае диаграмма не может быть построена точно, вследствие отсутствия данных об угле ψ .

Проводя из точки F перпендикуляр к линии тока, находим $\overline{FH} = E_{ag}/\sin \psi$ (рис. 145). Продолжаем вверх линию BC и из точки F проводим линию FK параллельно $E_{aq} = \overline{CD}$. Очевидно, $\overline{CK} = \overline{FH} = E_{ag}/\sin \psi$. Так как угол KOF очень мал, можно считать $\overline{OK} = \overline{OF} = E_0$. Построение тогда можно произвести следующим образом (рис. 145). Строим треугольник падений напряжения ABC , продолжаем линию BC и откладываем на ней $\overline{CK} = E_{ag}/\sin \psi$. Из точки A проводим линию AQ под углом φ к AB ; линия AQ дает направление U ; засекая из точки K радиусом $\overline{KO} = E_0$ точку O , находим $U = \overline{AO}$. Требуемая для построения величина $E_{ag}/\sin \psi$ находится на основании следующих соображений. Э. д. с. E_{ag} определяется обычно из части характеристики холостого хода, лежащей за коленом, поэтому с достаточной точностью можно считать E_{ag} прямо пропорциональной ампер-виткам AW_{ad} , откладываемым на характеристике холостого хода от точки A , соответствующей AW_n (рис. 146); соответственно этому $E_{ag}/\sin \psi = AW_{ad}/\sin \psi$; последняя величина находится без

$$\frac{AW_{ad}}{\sin \psi} = k_d f_a m w l.$$

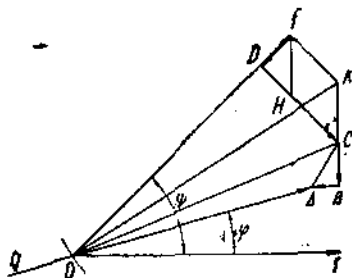


Рис. 145. Построение диаграммы Блонделя для случая понижения напряжения.

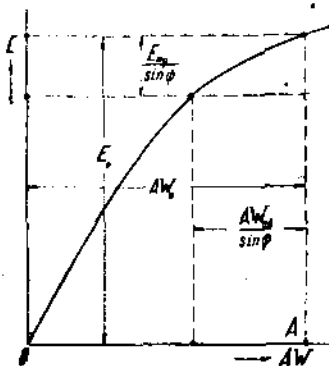


Рис. 146. К построению диаграммы Блонделя для случая понижения напряжения.

90. Диаграмма, рекомендованная Американским институтом инженеров-электриков.

American Institute of Electrical Engineers (сокращенно A.I.E.E.) рекомендует при определении изменения напряжения пользоваться диаграммой Бен-Эшенбурга (§ 82), но определение синхронного реактивного сопротивления рекомендует производить по характеристике холостого хода (кривая 1, рис. 147) и нагрузочной характеристике, снятой при $\cos \varphi = 0$ (кривая 2). Нагрузочная характеристика при $\cos \varphi = 0$ представляет собою зависимость напряжения на зажимах машины U от ампер-витков возбуждения при постоянной силе тока якоря (обычно характе-

ристика снимается при номинальном токе) и при $\cos \varphi = 0$ (§ 96). В пренебрежении активным сопротивлением статора все ампер-витки реакции якоря при $\cos \varphi = 0$ являются размагничивающими, поэтому алгебраическая разность между напряжением на зажимах и э. д. с. холостого хода представляет собою падение напряжения, обусловленное потоком реакции и потоком рассеяния статора (§ 96). Очевидно, это падение напряжения для данного возбуждения $AW_1 = \overline{Oc_1}$ равно отрезку $\overline{a_1b_1}$ между характеристиками холостого хода и нагрузочной при $\cos \varphi = 0$, снятой для данной силы тока якоря I . Этим значением падения напряжения пользуются при построении диаграммы Бен-Эшенбурга (рис. 148, а): откладывают отрезок $\overline{ab} = \overline{a_1b_1}$ и из конца его b проводят луч bc под заданным углом φ к го-

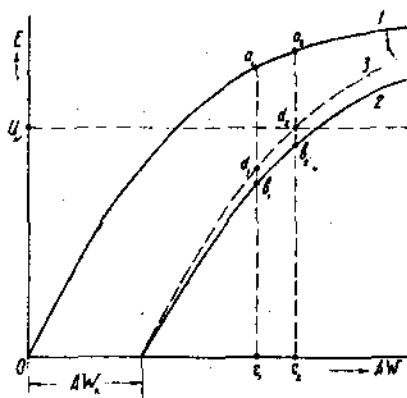


Рис. 147. Характеристика холостого хода и нагрузочная при $\cos \varphi = 0$.

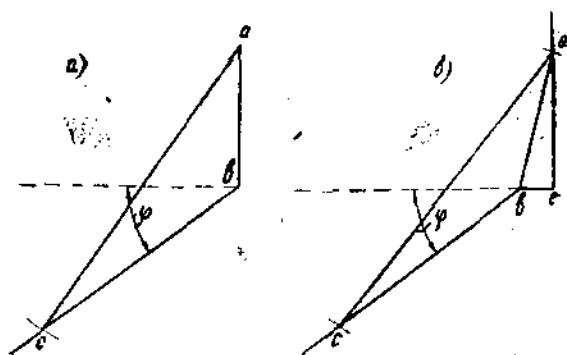


Рис. 148. Построение диаграммы Бен-Эшенбурга по способу А. И. Е. Е.

ризонталю; этот луч дает направление вектора напряжения U . Засекая из точки a радиусом ac , равным э. д. с. холостого хода $\overline{a_1c_1}$, определенной из характеристики (рис. 147), находим точку c . Очевидно, отрезок $\overline{bc}$ равен напряжению U при данном возбуждении $AW_1 = \overline{Oc_1}$. Так как изменение напряжения обычно требуется определить не для данного возбуждения AW_1 , а для данного (номинального) напряжения при нагрузке, то необходимо воспользоваться следующим способом. Сделав построение диаграммы (рис. 148) для разных значений ампер-витков возбуждения, но для одного и того же значения $\cos \varphi$, и откладывая значения напряжения $U = \overline{bc}$ в функции от ампер-витков возбуждения, получим кривую 3 (рис. 147). Тогда для требуемого значения напряжения на зажимах, например, $U_N = c_2 d_2$, повышение напряжения при данном $\cos \varphi$ равно:

$$\varepsilon\%_0 = \frac{\overline{a_2 d_2}}{c_2 d_2} 100.$$

Если необходимо учесть активное падение напряжения, то отрезок $\overline{ab} = \overline{a_1 b_1}$ откладывают не по вертикали, а засекают из конца b вектора активного падения напряжения $Ir = \overline{be}$ до пересечения с вертикалью ae ; отрезок $\overline{ae}$ равен реактивному падению напряжения (рис. 148, б). Дальнейшее построение кривой 3 производится по предыдущему.

Величину падения напряжения $\overline{ab}$ можно представить в виде $E_x = x_g I$, где x_g — реактивное сопротивление, эквивалентное реакции якоря и рассеянию статора, определенное с учетом насыщения машины.

Значения x_g , полученные по нагрузочной характеристике, значительно ближе к действительности при нормальной работе, чем величина x , которой пользуются в обычной диаграмме Бен-Эшенбурга и которая получена из характеристики короткого замыкания (§ 82), так как машина при снятии нагрузочной характеристики работает при нормальном насыщении. Очевидно, величина x_g изменяется с изменением тока возбуждения и тока статора. Для машин с цилиндрическим ротором изменение напряжения, полученное по способу А. И. Е. Е., оказывается очень близким к действительности; для машин с явно выраженными полюсами обычно получается преувеличенный результат (ср. § 85).

91. Диаграмма, рекомендованная шведскими нормами.

Для быстрого определения необходимого тока возбуждения при нагрузке с любым $\cos \varphi$ можно воспользоваться диаграммой Wannerberg'a, рекомендуемой шведскими нормами.

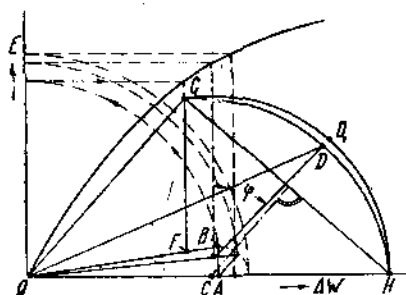


Рис. 149. Диаграмма Потье при разных значениях $\cos \varphi$.

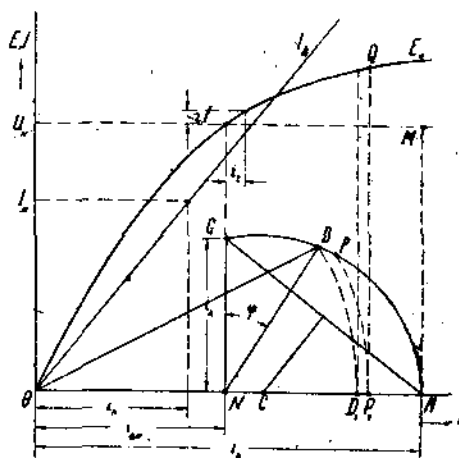


Рис. 150. Диаграмма, рекомендованная шведскими нормами.

На рис. 149 построена диаграмма Потье для одинаковой нагрузки I , но для разных значений угла сдвига фаз φ . Вектор напряжения $U = \overline{OA}$ направлен по оси абсцисс. Для значения $\varphi = 0$ перпендикулярно к нему отложено $Ix_s = \overline{AB}$ и определены ампер-витки $AW_s = \overline{OF}$ (§ 88). Перпендикулярно к току от $\overline{OF}$ отложены ампер-витки $AW_n = \overline{FG}$. Вектор $\overline{OG}$ равен ампер-виткам возбуждения AW_n (активным падением напряжения пренебрегаем). Если проделать такие же построения для разных значений φ (на рис. 149 сделано построение для $\varphi = 0^\circ, 45^\circ$ и 90°), то получим кривую GDH , представляющую собою геометрическое место концов вектора AW_n . Эта кривая очень близка к окружности GD_1H , построенной на хорде GH с центром C на оси абсцисс. Приняв за геометрическое место концов вектора AW_n окружность GD_1H , получим очень простую диаграмму (рис. 150). Отрезок $\overline{OH}$ в масштабе тока возбуждения равен току возбуждения i_n при номинальном напряжении U_N , номинальном токе статора I_N и $\cos \varphi = 0$; ток i_n находится по точке M нагрузочной характеристики при $\cos \varphi = 0$, соответствующей U_N . Отрезок $\overline{ON}$ равен току возбуждения i_{0N} при номинальном напряжении U_N и холостом ходе. Отрезок $\overline{NG}$ равен току возбуждения, соответствующему э. д. с. рассеяния и реакции якоря. Этот отрезок фирма А. С. Е. А. принимает равным i_k , где i_k — ток возбуждения, соответствующий номинальному току I_N при коротком замыкании, взятый

по характеристике короткого замыкания $I_k = f(i_n)$.¹⁾ Шведские нормы рекомендуют²⁾ брать этот отрезок равным $1,25 i_n$, учитывая этим увеличение рассеяния ротора при нагрузке (§ 77). Соединяя точки G и H и восстанавливая в середине $\overline{GH}$ перпендикуляр, находим центр окружности C . Ток возбуждения для данного $\cos \varphi$, в пренебрежении активным сопротивлением статора r , равен отрезку $\overline{OD} = \overline{OD_1}$, причем точка D построена таким образом, что угол $GND = \varphi$. Для учета активного падения напряжения rI откладывают от U_N величину rI , и соответствующие ей ампер-витки i_r откладывают на окружности $\overline{DP} = i_r$. Тогда ток возбуждения равен $\overline{OP} = \overline{OP_1}$; соответствующая ему э. д. с. холостого хода равна $E_0 = \overline{P_1Q}$. Если характеристика холостого хода построена для линейного напряжения, то необходимо откладывать $\sqrt{3} rI$.

92*. Построение диаграммы Блонделя в относительных единицах.

При расчетах крупных электрических систем, главным образом, при расчете различного рода переходных режимов (короткие замыкания, устойчивость параллельной работы и т. д.), пользуются диаграммами напряжения, построенными для эквивалентных генераторов, т. е. для генераторов, заменяющих собою все генераторы одной станции. Пользуются всегда диаграммой Блонделя, так как необходимо учитывать неодинаковое магнитное сопротивление в продольной и в поперечной оси машины. В отличие от нормального способа построения (§ 89), диаграмму строят не для э. д. с., а для ампер-витков; последние выражают не в абсолютных единицах, а в относительных—в долях от номинальных, т. е. от требующихся при холостом ходе для получения номинального напряжения. При таком способе построения диаграмма имеет ряд преимуществ при проектировании систем, так как не требуется знания действительных параметров генераторов.

Рассмотрим сначала ненасыщенную машину с явно выраженными полюсами. Характеристика холостого хода у нее прямая, наклон которой зависит от величины ампер-витков, требующихся для проведения потока через междужелезное пространство (рис. 151). Для номинального напряжения U_N требуются ампер-витки AW_N . Построим диаграмму Блонделя (рис. 152), причем одновременно с э. д. с. будем строить и соответствующие им ампер-витки. Так как характеристика холостого хода—прямая линия, то ампер-витки прямо пропорциональны э. д. с., а при соответственно выбранном масштабе (как на рис. 152) отрезки, изображающие ампер-витки, равны отрезкам, изображающим э. д. с. На рис. 152 обозначены:³⁾ AW_N —ампер-витки, соответствующие напряжению на зажимах U_N ; AW_s —ампер-витки, соответствующие э. д. с. рассеяния E_s ; AW_{ad} и AW_{aq} —

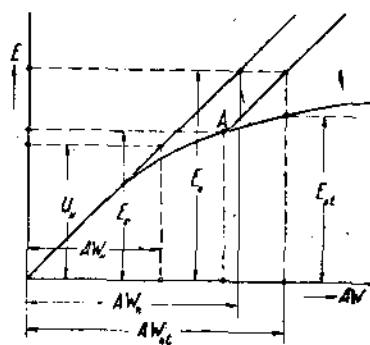


Рис. 151. К построению диаграммы Блонделя в относительных единицах.

¹⁾ См. брошюру A. S. E. A. Turbo Generators, No 600, Vesteras, 1928.

²⁾ См. G. Jahn. Messungen an Elektrischen Maschinen. Berlin, 1925.

³⁾ Так как машина не насыщена, то для продольной оси пользуемся индексом d (см. примечание к § 85).

эквивалентные продольные и поперечные ампер-витки реакции якоря, соответствующие э. д. с. E_{ad} и E_{aq} ; AW_n — ампер-витки полюсов, соответствующие э. д. с. холостого хода E_0 . Активным падением напряжения обычно пренебрегают. Ампер-витки рассеяния статора объединяют с ампер-витками реакции; тогда имеем полные продольные и поперечные ампер-витки статора (рис. 152):

$$AW_{d1} = AW_{ad} + AW_s \sin \psi;$$

$$AW_{q1} = AW_{aq} + AW_s \cos \psi.$$

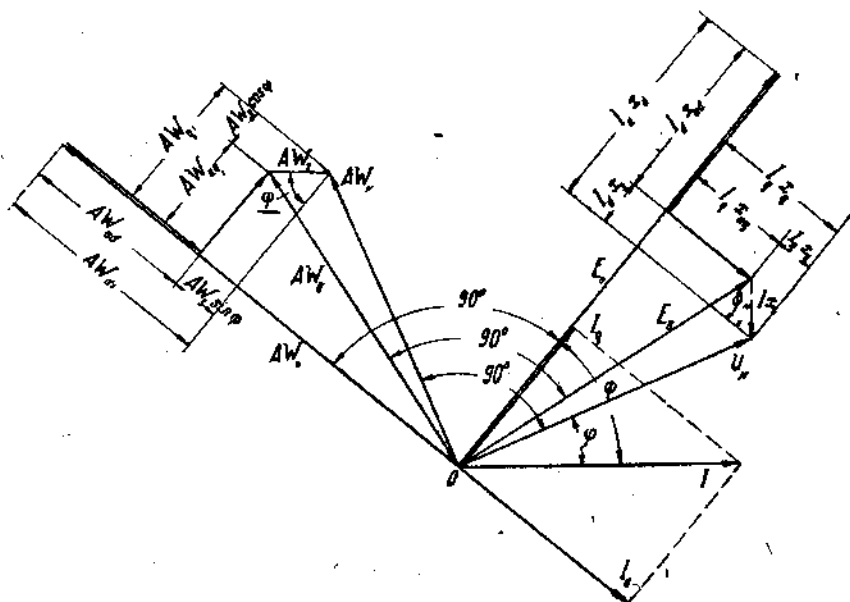


Рис. 152. Диаграмма Blondеля для ненасыщенной машины.

Обозначая все постоянные величины, входящие в формулы для ампер-витков, через c с соответствующими значками, можем написать:

$$AW_{ad} = c_{ad} I \sin \psi; \quad AW_{aq} = c_{aq} I \cos \psi; \quad AW_s = c_s I;$$

отсюда получаем:

$$AW_{d1} = c_d I \sin \psi = c_d I_d,$$

$$AW_{q1} = c_q I \cos \psi = c_q I_q;$$

здесь $c_d = c_{ad} + c_s$; $c_q = c_{aq} + c_s$; величины $I \sin \psi = I_d$ и $I \cos \psi = I_q$ представляют собою соответственно реактивный и активный (по отношению к э. д. с. холостого хода) ток статора. Аналогично создаваемым ими ампер-виткам эти составляющие тока называют продольной I_d и поперечной I_q . В дальнейшем будем пользоваться этими терминами, оставляя термины активный и реактивный для токов совпадающего и находящегося в квадратуре с напряжением (а не с э. д. с.). Так как все э. д. с. прямо пропорциональны ампер-виткам (ненасыщенная машина), то соответственно обозначениям ампер-витков, имеем:

$$E_{d1} = E_{ad} + E_s \sin \psi = x_{ad} I \sin \psi + x_s I \sin \psi = x_d I_d; \quad (116)$$

$$E_{q1} = E_{aq} + E_s \cos \psi = x_{aq} I \cos \psi + x_s I \cos \psi = x_q I_q; \quad (117)$$

здесь x_s — реактивное сопротивление рассеяния, x_{ad} и x_{aq} — сопротивления, эквивалентные реакции якоря для продольной и поперечной оси; x_d и x_q — синхронные сопротивления для продольной и поперечной оси:

$$x_d = x_{ad} + x_s; \quad x_q = x_{aq} + x_s. \quad (118)$$

Все векторы на диаграмме обычно выражают в относительных единицах, т. е. в долях или в процентах от номинальных: э. д. с. и падения напряжения ($x_d I_d$, $x_q I_q$ и т. д.) — в процентах от номинального напряжения, ампер-витки — в процентах от ампер-витков, требующихся при холостом ходе для получения номинального напряжения. В этом случае векторы ампер-витков и соответствующих им э. д. с. всегда будут равны (ненасыщенная машина), поэтому достаточно ограничиться построением одной лишь части диаграммы; строят обычно правую часть — векторы э. д. с. (рис. 152). В относительных единицах эта же диаграмма дает и ампер-витки, и ток возбуждения, и магнитные потоки.

В действительности ненасыщенных машин не бывает. Однако, и для насыщенных машин применяют ту же самую диаграмму. Так как E_{aq} и E_s определяются по начальной части характеристики холостого хода, а следовательно, они одинаковы в насыщенных и в ненасыщенных машинах, то значение угла расхождения между э. д. с. E_0 и напряжением U , которое необходимо для расчета систем, получается точным и для насыщенных машин. Как указано в § 113, мощность в случае насыщенных машин также может быть вполне точно определена по этой же диаграмме. Эти две величины являются основными для расчета устойчивости параллельной работы. Таким образом, надо лишь иметь в виду, что вектор E_0 по существу дает не э. д. с. холостого хода, а ампер-витки (или силу тока возбуждения). Так как при расчетах устойчивости величина э. д. с. холостого хода значения не имеет, а требуется лишь ток возбуждения, то никаких уточнений диаграмма не требует. Процентные значения реактивностей x_d , x_q и x_s приведены в § 208. Необходимо иметь в виду, что, как указывалось выше, эти реактивности соответствуют ненасыщенной машине; таким образом, по существу это есть процентные значения величин c_d , c_q и c_s . Для построения диаграммы знания характеристики холостого хода не требуется.

Построение диаграммы производится следующим образом (рис. 153). Из конца вектора U откладываем вектор $I x_q$ перпендикулярно к вектору тока I . Соединяя точку Q с O , получаем направление вектора E_0 . Откладывая по этому направлению из Q отрезок $I_a (x_d - x_q)$, находим вектор $E_0 = E_Q + I_a (x_d - x_q)$; здесь через E_Q обозначен вектор OQ . Опуская из конца вектора U перпендикуляр на E_0 , получаем $I x_q \cos \psi = I_q x_q$.

Ток возбуждения, получаемый непосредственно из диаграммы, соответствует ненасыщенной машине, что в большинстве случаев дает достаточно точную точность. Если требуется учесть насыщение, то это можно сделать, воспользовавшись характеристикой холостого хода. Ампер-витки AW_{aq} и AW_{ad} прямо пропорциональны току I и от насыщения не зависят. Поэтому надо учесть влияние насыщения лишь на ампер-витки AW_N и AW_s .

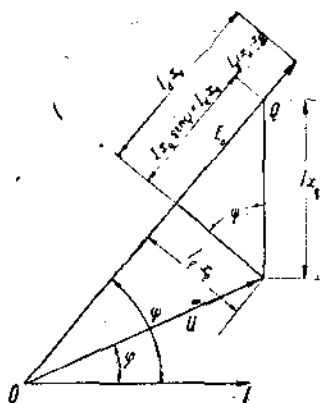


Рис. 153. Построение диаграммы Blondel в относительных единицах.

Для этого откладываем на характеристике холостого хода (рис. 151) э. д. с. E_0 , индуцированную потоком междужелезного пространства; этой э. д. с. соответствуют ампер-витки AW_0 . Разность $AW_0 - AW_N$ соответствует увеличению ампер-витков, обусловленному насыщением. Проводя из точки A прямую, параллельную начальной части характеристики холостого хода, и откладывая на оси ординат E_0 , взятое из диаграммы, находим действительные ампер-витки возбуждения AW_{m1} (рис. 151) и действительную э. д. с. холостого хода E_{m1} . Построение диаграммы для более сложных случаев приведено в статье W. M. Hanna.¹⁾

Диаграмма Блонделя, построенная в относительных единицах, имеет большое значение для изучения неустановившихся режимов; для этого в диаграмму надо внести ряд дополнений (§ 185).

93. Практические замечания о применении диаграмм напряжения.

Построение диаграмм напряжения приходится производить в следующих случаях: 1) при проектировании машины для определения изменения напряжения в ней при нагрузке; 2) при приемочных испытаниях готовой машины для определения изменения напряжения при нагрузке косвенным методом; 3) при изучении и расчете различных режимов работы синхронных машин (параллельная работа, короткое замыкание и т. д.).

При проектировании для машин с явно выраженными полюсами строят обычно диаграмму Блонделя, для машин с цилиндрическим ротором — диаграмму Потье. Диаграмму Бен-Эшенбурга при проектировании машины не строят, так как последняя не дает точных результатов для насыщенных машин.

При приемочных испытаниях готовой машины, когда расчетных данных не имеется, построение диаграммы Блонделя произведено быть не может. Поэтому применяют диаграмму Потье, которую легко построить по опытам холостого хода и короткого замыкания (§§ 206, 215). Для машин с цилиндрическим ротором диаграмма Потье совершенно точна; для машин с явно выраженными полюсами применять ее, по существу, нельзя. Однако, практика показывает, что при $\cos \varphi < 1$ построение диаграммы Потье для машины с явно выраженными полюсами дает незначительную погрешность. Поэтому при отсутствии расчетных данных и для этих машин применяют диаграмму Потье. В последнее время диаграмму Потье часто строят по методу, рекомендованному шведскими нормами. Диаграмма Бен-Эшенбурга для насыщенных машин не точна, поэтому для определения изменения напряжения ее применяют редко. В США обычно пользуются диаграммой Бен-Эшенбурга, построенной по способу, рекомендованному A.I.E.E.

Изучение различных режимов работы синхронных машин значительно облегчается при пользовании диаграммами напряжения. По диаграмме напряжения можно определить не только напряжение, э. д. с., мощность, силу тока, но и положение ротора машины; действительно, вектор э. д. с. E_0 на 90° отстает от вектора потока полюсов Φ , а последний всегда направлен по оси полюсов; поэтому по углу перемещения вектора э. д. с. можно определить и угол перемещения ротора. В зависимости от задачи применяют ту или другую диаграмму, практически диаграмму Бен-Эшенбурга или диаграмму Блонделя. В тех случаях, где режим работы

¹⁾ W. M. Hanna. Uses of Synchronous Machine Quantities in System Studies. G. E. R. 1933, стр. 116.

машины зависит от развиваемой ею мощности (колебания при параллельной работе, синхронный двигатель) пользуются диаграммой Бен-Эшенбурга, ибо мощность синхронной машины точно определяется по диаграмме Бен-Эшенбурга (§ 113). При изучении и расчете неустойчившихся режимов (устойчивость при параллельной работе, короткое замыкание) применяют диаграмму Blondеля, вводя в нее ряд добавлений (см. также § 185).

94. Внешняя характеристика синхронной машины.

В тех случаях, когда возможно осуществить непосредственную нагрузку синхронной машины, определение изменения напряжения можно произвести по внешней характеристике. Внешняя характеристика представляет собою зависимость напряжения на зажимах машины U от силы тока статора I при постоянных коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi$, токе возбуждения i и скорости вращения n . На рис. 154,а приведены внешние характеристики при токе возбуждения, соответствующем но-

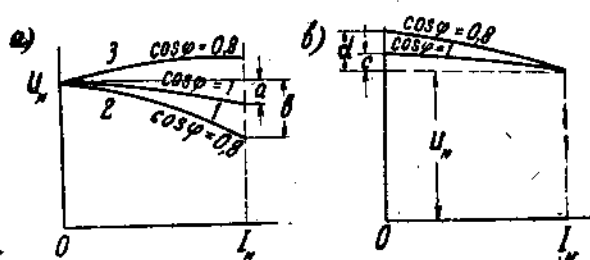


Рис. 154. Внешние характеристики синхронной машины.

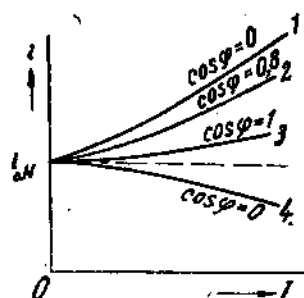


Рис. 155. Регулировочные характеристики синхронной машины.

минальному напряжению U_N при холостом ходе. При чисто активной и при индуктивной нагрузке (кривые 1 и 2) напряжение на зажимах падает с увеличением нагрузки; при емкостной нагрузке, вследствие намагнивающего действия реакции якоря, напряжение при небольших значениях $\cos \varphi$ увеличивается (кривая 3). Процентное падение напряжения соответственно при $\cos \varphi = 1$ и при $\cos \varphi = 0,8$ равно $\frac{a}{U_N} 100$ и $\frac{b}{U_N} 100$. На рис. 154, б приведены внешние характеристики при активной и индуктивной нагрузке при токе возбуждения, соответствующем номинальному напряжению при полной нагрузке. При сбросе нагрузки напряжение повышается. Процентное повышение напряжения соответственно равно $\frac{c}{U_N} 100$ и $\frac{d}{U_N} 100$. Процентное повышение напряжения всегда меньше, чем процентное падение напряжения; это объясняется тем, что для случая рис. 154,а э. д. с. холостого хода E_0 лежит на характеристике холостого хода ниже, чем для случая рис. 154,б, поэтому в первом случае э. д. с. E_{ag} , соответствующая продольным ампер-виткам реакции якоря, получается больше, чем во втором (ср. § 85).

95. Регулировочная характеристика синхронной машины.

Регулировочная характеристика представляет собою зависимость тока возбуждения от тока статора при постоянных коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi$, напряжении на зажимах U и скорости вращения n . На

рис. 155 приведены регулировочные характеристики при индуктивной нагрузке (кривые 1 и 2), чисто активной (3) и емкостной (4). Как видно из рисунка, при индуктивной и чисто активной нагрузках для поддержания постоянства напряжения на зажимах необходимо увеличивать ток возбуждения с увеличением нагрузки, чтобы компенсировать реакцию якоря и падение напряжения. При емкостной нагрузке, вследствие намагничивающего действия реакции якоря, необходимо уменьшать ток возбуждения с увеличением нагрузки.

96. Нагрузочная характеристика синхронной машины.

Нагрузочная характеристика представляет собою зависимость напряжения на зажимах от тока возбуждения при постоянных токе статора I , коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi$ и скорости вращения n . На рис. 156 приведены характеристики холостого хода (кривая 1) и нагрузочные характеристики при одинаковой силе тока статора для случая чисто активной нагрузки (кривая 2), индуктивной (3) и емкостной (4). При больших значениях тока статора нагрузочная характеристика при емкостной нагрузке идет выше характеристики холостого хода. Точка K соответствует короткому замыканию машины при силе тока статора I , соответствующей нагрузочным характеристикам (напряжение на зажимах U равно нулю). Все нагрузочные характеристики, снятые при одинаковом токе статора I , сходятся в этой точке. Ампер-витки OK равны ампер-виткам короткого замыкания, соответствующим на характеристике короткого замыкания (кривая 5) значению тока I , при котором сняты нагрузочные характеристики. Часть нагрузочной характеристики при емкостной нагрузке, обозначенная пунктиром, неустойчива.

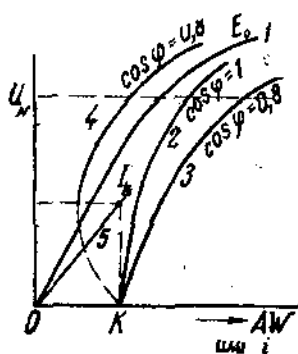


Рис. 156. Нагрузочные характеристики синхронной машины.

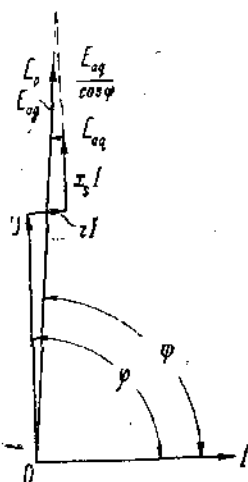


Рис. 157. Диаграмма напряжения при индуктивной нагрузке, $\cos \varphi = 0$.

Для исследования машины большое значение имеет нагрузочная характеристика, снятая при индуктивной нагрузке и $\cos \varphi = 0$. Как видно из рис. 157, при $\cos \varphi = 0$ все ампер-витки реакции якоря можно считать продольными (размагничивающими), поэтому алгебраическую разность между напряжением на зажимах U и э. д. с. холостого хода E_0 можно считать равной синхронному падению напряжения $E_x = Ix_g = E_0 - U$. На характеристике (рис. 158, а) имеем $\overline{AB} = U$; $\overline{AC} = E_0$; $\overline{BC} = E_0 - U = Ix_g = Ix_a + Ix_s$.

Вычитая из E_0 величину $Ix_a = \overline{CD}$, находим на характеристике холостого хода точку F ; очевидно $\overline{FH} = U + Ix_s$; $\overline{FG} = Ix_s$; $\overline{GB} = \overline{HA} = \overline{AW}_a$.

Таким образом, треугольник FGB представляет собою треугольник Потье (§ 81). При постоянной нагрузке стороны треугольника Потье неизменны, поэтому, передвигая треугольник Потье параллельно самому себе так, чтобы вершина F все время двигалась по характеристике холостого хода, можно построить нагрузочную характеристику при $\cos \varphi = 0$; последняя определяется вершиной B треугольника Потье. Опытная нагрузочная характеристика при $\cos \varphi = 0$ в насыщенных машинах обычно проходит ниже построенной (пунктирная кривая на рис. 158, а), так как вследствие увеличения потока рассеяния полюсов при увеличении тока возбуждения (§ 206) основной поток полюсов уменьшается, а вместе с ним уменьшается и напряжение на зажимах. Нагрузочную характеристику при $\cos \varphi = 0$ используют для определения x_g (§§ 90, 205) и для определения сторон треугольника Потье (§ 206).

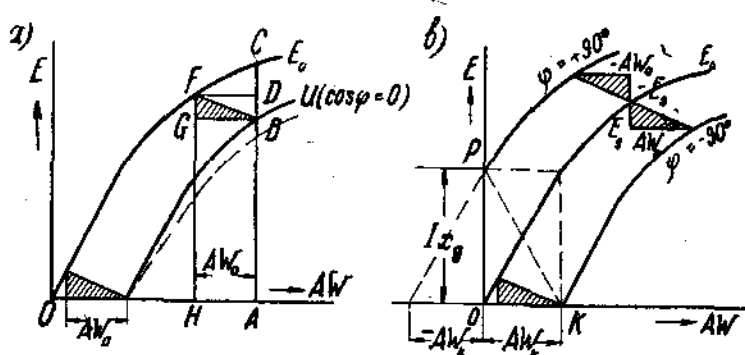


Рис. 158. Нагрузочные характеристики при $\cos \varphi = 0$.

На рис. 158, б построена еще нагрузочная характеристика при емкостной нагрузке и $\cos \varphi = 0$. Для построения ее следует откладывать стороны треугольника Потье $E_s = Ix_s$ и $\overline{AW}_a$ в обратную сторону. Характеристика пересекает ось ординат в точке P , причем $\overline{OP} = Ix_a = Ix_a + Ix_s$. В этой точке генератор может работать без возбуждения. Такое явление наблюдается иногда при работе генератора вхолостую на сеть, обладающую большой емкостью. 1) При большой величине зарядных токов сети напряжение на зажимах генератора Ix_g может стать больше номинального. Для уменьшения его необходимо давать обратного направления ток возбуждения; однако, обычно часть характеристики ниже точки P является неустойчивой. Если ток возбуждения остается прежнего направления, то характеристика пересекает ось абсцисс в точке K .

97. Характеристика короткого замыкания.

Характеристика короткого замыкания представляет собою зависимость тока статора от тока возбуждения при напряжении на зажимах, равном нулю, и при постоянной скорости вращения n (рис. 159). Характеристику короткого замыкания можно построить при помощи треугольника Потье ASK (§§ 81, 173). Пока вершина S треугольника Потье движется по прямо-

1) См. 1) R. Richter, Elektrische Maschinen, т. II, Berlin, 1930 (с указ. литературы).
2) J. F. H. Douglas and E. W. Kapp, Alternator Characteristics Under Conditions Approaching Instability. Tr. A.I.E.E., январь 1928, стр. 275.

линейной части характеристики холостого хода, характеристика короткого замыкания является прямой линией (§ 81). Если в машине имеется остаточное намагничивание, то характеристики холостого хода и короткого замыкания пересекают ось ординат выше оси абсцисс (рис. 160). Для возможности определения в этом случае сторон треугольника Потье необходимо перенести характеристику короткого замыкания параллельно самой себе так, чтобы она пересекалась с характеристикой холостого хода на оси абсцисс.

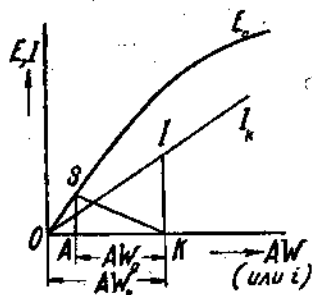


Рис. 159. Характеристики короткого замыкания и холостого хода.

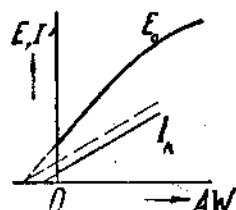


Рис. 160. Характеристики короткого замыкания и холостого хода при наличии остаточного намагничивания машины.

Поддержания постоянной скорости вращения при снятии характеристики короткого замыкания, вообще говоря, не требуется, так как ток короткого замыкания практически не зависит от скорости вращения (рис. 161). Ток короткого замыкания равен (§ 81):

$$I_k = \frac{E_0}{\sqrt{r^2 + x_d^2}}.$$

Так как x_d значительно больше, чем r , то последним можно пренебречь в сравнении с x_d . Тогда

$$I_k = \frac{E_0}{x_d}.$$

Электродвижущая сила E_0 прямо пропорциональна скорости вращения: $E_0 = c_1 n$. Синхронное сопротивление $x_d = x_s + x_a$. Сопротивление рассеяния равно (§ 76):

$$x_s = \omega S = 2\pi n S = 2\pi \frac{pn}{60} S = c_2 n;$$

здесь c_2 — постоянный коэффициент. Сопротивление, эквивалентное реакции якоря, равно (§ 80):

$$x_a = \frac{E_a}{I} = \frac{c_3 n \Phi_a}{I} = \frac{c_3 n c_a I}{I} = c_4 n;$$

здесь c_3 и $c_4 = c_3 c_a$ — постоянные коэффициенты.

Следовательно:

$$x_d = x_s + x_a = c_5 n,$$

отсюда

$$I_k = \frac{E_0}{x_d} = \frac{c_1 n}{c_5 n} = \frac{c_1}{c_5} = \text{const.}$$

При малых скоростях вращения $x_d = c_5 n$ становится небольшим, поэтому пренебрегать r в сравнении с x_d уже нельзя. При малых скоростях вращения ток короткого замыкания начинает с уменьшением n уменьшаться.

В машинах с закрытыми или полузакрытыми впадинами характеристика короткого замыкания в начальной части отклоняется от прямой линии

(рис. 162), так как сопротивление рассеяния x_s в такой машине не постоянно по величине. Поток рассеяния через впадину в машинах с закрытыми впадинами можно разбить на две части: 1) поток, проходящий поперек впадины, сопротивление для которого сводится к сопротивлению воздуха, а следовательно, остается постоянным; 2) поток рассеяния через

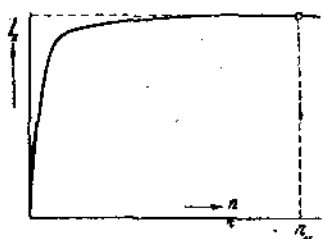


Рис. 161. Зависимость тока короткого замыкания от скорости вращения.

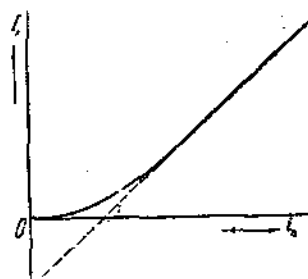


Рис. 162. Характеристика тока от короткого замыкания машины с закрытыми впадинами.

перемычку; этот поток проходит целиком по железу, поэтому он зависит от насыщения. При малых значениях тока этот поток с увеличением тока растет очень быстро, что соответствует большому значению реактивного сопротивления. По наступлении насыщения перемычки поток рассеяния через перемычку с увеличением тока растет медленнее, вследствие чего реактивное сопротивление уменьшается, и ток короткого замыкания начинает увеличиваться быстрее (рис. 162).

ГЛАВА VII.

ОДНОФАЗНЫЕ СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.

98. Общие замечания.

Однофазная синхронная машина имеет ряд недостатков по сравнению с трехфазной, из которых главнейшие: 1) большие размеры при одинаковой мощности, 2) большие потери. Поэтому однофазные машины не получили распространения даже там, где требуется иметь однофазный ток; предпочитают питать однофазную нагрузку от трехфазной сети непосредственно или через вращающийся преобразователь трехфазного тока в однофазный. Лишь в небольшом числе установок, главным образом для питания электрифицированных на однофазном токе железных дорог, применяют однофазные генераторы.¹⁾

Таким образом, с точки зрения важности однофазных машин, теория их не имеет большого значения. Однако, процессы, происходящие в нагруженном однофазном генераторе (именно, реакция якоря однофазного генератора) имеют большое значение для изучения трехфазных машин, так как с такими явлениями сталкиваемся при несимметричной нагрузке трехфазных машин и при несимметричном коротком замыкании. Поэтому из теории однофазных машин практическое значение имеет вопрос о реакции якоря.

99. Обмотки однофазных машин, см. §§ 35 — 42.

100. Сравнение однофазной машины с трехфазной при одинаковой частоте.²⁾

Выведем, какую мощность могут дать машины с одинаковыми размерами, но с обмотками, выполненными либо в виде трехфазной, либо в виде однофазной. При этом предварительно выясним, какую мощность может дать трехфазная машина при использовании ее в качестве однофазной, т. е. при приключении сети к зажимам двух фаз обмотки. Очевидно, максимальная мощность однофазного тока определяется допустимым нагреванием машины. Одинаковое нагревание получится при одинаковом значении магнитного потока и при одинаковых потерях в обмотке. В высоковольтных машинах теплопередача от обмотки статора

¹⁾ Описания однофазных генераторов см.: 1) В. В. С. — *Мил.* 1927, № 10/11; 2) *Е.Т.З.* 1927, стр. 789; 3) *Bull. Oerlikon*, дек. 1927, № 78; 4) *Е.Т.З.* 1915, стр. 225; 5) *V. D. I.* 1923, стр. 934; 6) *Е. u. М.* 1931, стр. 417, 437; 7) *Е. u. М.* 1932, стр. 689.

²⁾ В. Г. Ламме. *Comparative Capacities of Alternator for Polyphase and Single-phase Currents.* *El. J.* 1911, стр. 672.

к железу мала из-за толстого слоя изоляции, поэтому температура отдельных катушек может получиться гораздо выше, чем это соответствует полным потерям в меди; в таких машинах, следовательно, максимальная допустимая мощность при однофазном токе будет при силе тока в проводниках, равной силе тока этой машины при работе ее в качестве трехфазной. В остальных случаях максимальная мощность при однофазном токе будет при одинаковых полных потерях в меди.

Пусть допустимая сила тока на одну фазу равна I и фазовое напряжение равно U . Тогда мощность при трехфазном токе $3UI$ (в kVA). При работе на однофазную сеть при включении обмотки звездой и приключении сети к зажимам AB (рис. 163,а) напряжение на зажимах будет $\sqrt{3}U$ и мощность при той же силе тока $\sqrt{3}UI = 1,732 UI$, т. е. 57,7% от трехфазной мощности. Если сопротивление одной фазы r , то потери при трехфазном токе $3I^2r$, при однофазном $2I^2r$, следовательно, для получения равных потерь можно увеличить силу тока в отношении $\sqrt{3/2} = 1,225$ раза. Максимальная мощность при однофазном токе будет, следовательно, $57,7 \times 1,225 = 70,7\%$ от трехфазной. Если обмотка включена треугольником, то мощность при трехфазном токе $3UI$. При однофазном токе напряжение равно U . Сила тока в фазе AB (рис. 163,б) равна I ,

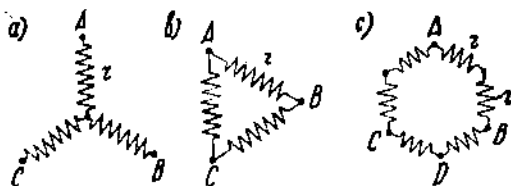


Рис. 163. К сравнению трехфазных и однофазных машин.

в фазе $ACB = \frac{1}{2}I$; сила тока внешней цепи $1,5I$. Мощность $1,5UI$, или 50% от трехфазной мощности. Потери при трехфазном токе $3I^2r$, при однофазном $I^2r + 0,25I^2 \times 2r = 1,5I^2r$. Следовательно, при равных потерях силу тока при работе однофазным генератором можно увеличить в $\sqrt{2}$ раз и тогда однофазная мощность $50 \times \sqrt{2} = 70,7\%$ от трехфазной, — то же самое значение, что и для обмотки, соединенной звездой.

Таким образом на основании рис. 163,а,б можно сделать заключение, что если обмотка однофазного генератора занимает $\frac{2}{3}$ впадин, то при одинаковых размерах с трехфазной машиной однофазная будет давать около 70% мощности трехфазной, а при одинаковой мощности размеры однофазной машины будут в $1/0,71 = 1,42$ раза больше трехфазной. Обычно, обмотка занимает несколько больше, чем $\frac{2}{3}$ впадин (иногда до 80% впадин), поэтому соотношение в размерах получается несколько лучшее. Заполнение всех впадин не дает почти никакой выгоды. Если напряжение $\overline{AB} = \overline{BC} = \overline{AC} = U$ (рис. 163,с), а сопротивления этих участков $2r$, то мощность трехфазной машины $3UI$. Напряжение однофазной машины $\overline{AD} = \frac{2}{\sqrt{3}}U$. Мощность при одинаковой силе тока в проводниках

$\frac{4}{\sqrt{3}}UI = 2,31 UI$, т. е. 77,0% от трехфазной. Потери при трехфазном токе $6I^2r$, при однофазном — $6I^2r$, следовательно, силу тока увеличить нельзя. Выигрыш мощности по сравнению с предыдущими случаями 8,95%, тогда как увеличение веса меди 50%.

101. Реакция якоря однофазного синхронного генератора.

Будем рассматривать только основную гармонику кривой м. д. с. (§ 69). Основная гармоника м. д. с. однофазной многокатушечной обмотки представляет собою синусоидально распределенную неподвижную в пространстве кривую, пульсирующую во времени по закону синуса (§ 69). Амплитуда кривой равна:

$$AW_{1a} = 0,9 f_{m1} q w_s l \sin \omega t; \quad (79a)$$

уравнение кривой имеет вид:

$$AW = 0,9 f_{m1} q w_s l \sin \omega t \sin \left(\frac{2\pi}{X} x + \gamma_1 \right). \quad (80a)$$

Выберем за начало координат точку O_1 , совпадающую с серединой дуги, занимаемой q впадинами (рис. 164); тогда $\gamma_1 = 0$ и уравнение (80a) примет вид:

$$AW = 0,9 f_{m1} q w_s l \sin \omega t \sin \frac{2\pi}{X} x. \quad (80b)$$

Неподвижную в пространстве м. д. с. с пульсирующей амплитудой можно разложить на две м. д. с., имеющие постоянные амплитуды и движущиеся в пространстве в разные стороны с одинаковой скоростью, соответствующей частоте пульсаций. Действительно, применив к формуле (80b) тригонометрическое преобразование, приведенное в § 70 (формула 85), получим

$$AW = \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s l \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x \right) - \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s l \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x \right). \quad (119)$$

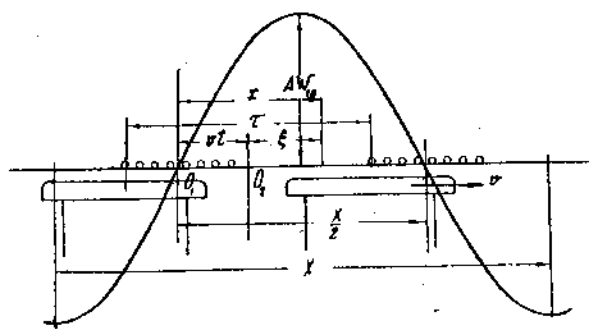


Рис. 164. Кривая м. д. с. однофазной обмотки.

Подставляя в эту формулу разные значения t , можно убедиться, что амплитуды каждого из членов разложения (соответствующие значениям косинусов, равным единице) не зависят от времени (любому значению t соответствует значение x , при котором косинус становится равным единице), но в разные моменты времени каждой амплитуде соответствует разное значение пространственной

координаты x ; следовательно, в пространстве амплитуды изменяют свое положение. При этом первый член разложения

$$AW_1 = \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s l \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{X} x \right) \quad (120)$$

представляет собою м. д. с., вращающуюся в ту же сторону, что и полюса с одинаковой с ними скоростью $n = 60 \nu/p$ (за один период изменения тока $T = 2\pi/\omega$ амплитуда передвигается на расстояние X , равное двойному полюсному делению, § 69). Второй член разложения

$$AW_2 = - \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s l \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{X} x \right) \quad (121)$$

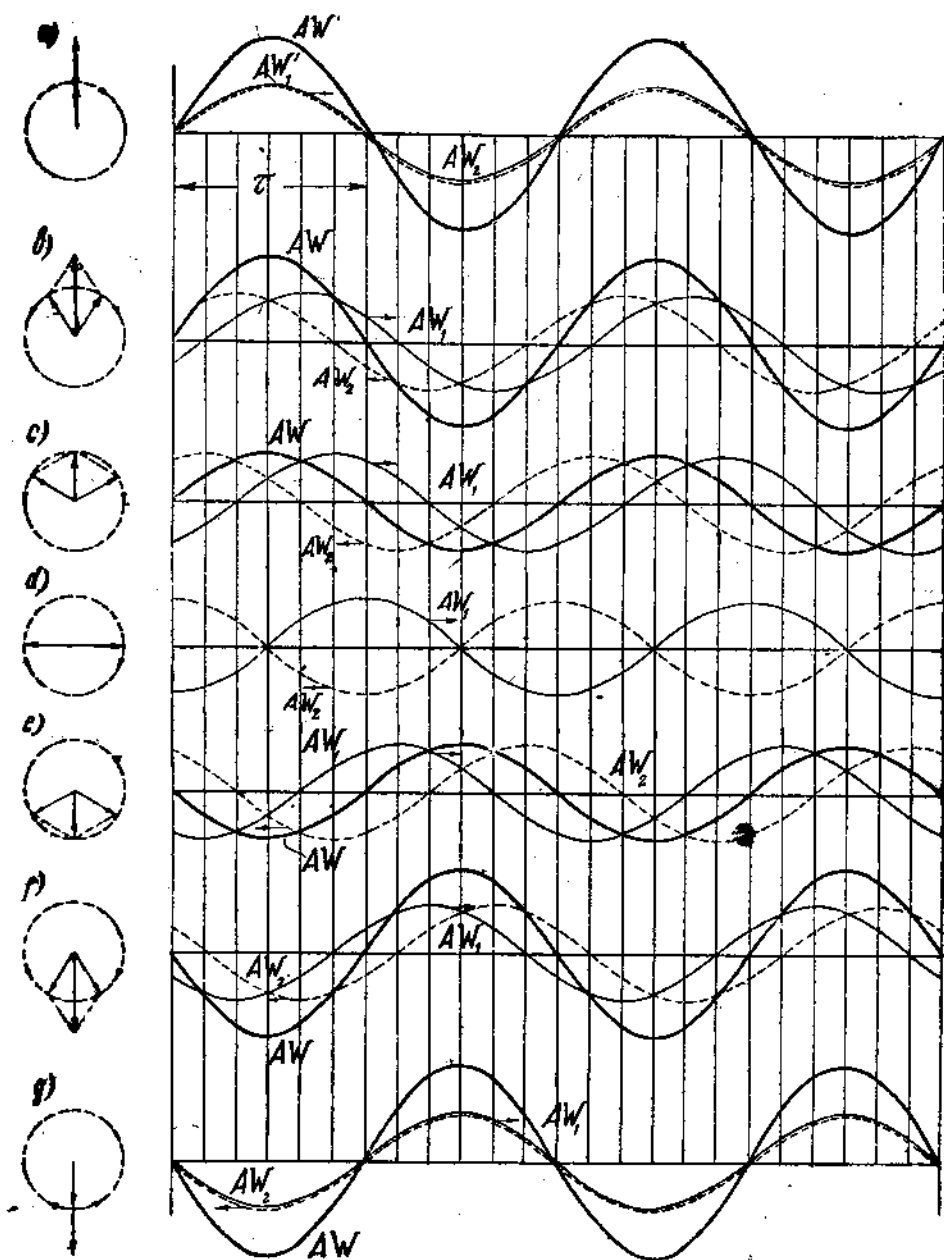


Рис. 165. Разложение пульсирующей кривой м. д. с. на две вращающихся.

представляет собой м. д. с., вращающуюся в сторону, обратную вращению полюсов; в пространстве скорость ее равна $n = 60 \nu / p$. На рис. 165 представлена геометрическая интерпретация разложения пульсирующей кривой м. д. с. на две вращающиеся.

Составляющая м. д. с. AW_1 , вращающаяся в ту же сторону, что и полюса, называется синхронно вращающейся составляющей; она неподвижна относительно полюсов. Ее влияние на работу машины такое же, как и влияние м. д. с. реакции якоря в трехфазной машине. Составляющая м. д. с. AW_2 движется в сторону, обратную вращению полюсов; она называется обратно синхронной составляющей. В пространстве (относительно статора) ее скорость равна $n = 60 \nu / p$; относительно полюсов ее скорость равна, очевидно, $2n = 2 \times 60 \nu / p$. Влияние ее на работу машины рассмотрено в §§ 102 — 104.

102. Обратно синхронная составляющая потока реакции якоря однофазной машины.

В машине с цилиндрическим ротором поток реакции пропорционален ампер-виткам. При разомкнутой обмотке возбуждения обратно синхронная составляющая м. д. с. AW_2 создает обратно синхронный поток реакции Φ_{a2} , вращающийся относительно ротора с двойной синхронной скоростью. Этот поток индуцирует в железе ротора токи Фуко, которые по закону Ленца создают поток, направленный навстречу обратно синхронному потоку Φ_{a2} , и уменьшающие, следовательно, величину Φ_{a2} . Если обмотка возбуждения замкнута, то в ней также индуцируются обратно синхронным потоком токи Фуко; вследствие меньшего электрического сопротивления обмотки возбуждения по сравнению с сопротивлением железа ротора, токи Фуко в ней получаются значительно большие. Но так как обмотка возбуждения расположена лишь в продольной оси машины, то эти токи противодействуют обратно синхронному потоку и уменьшают его величину лишь в те моменты времени, когда амплитуда ампер-витков AW_2 совпадает с продольной осью. При совпадении амплитуды ампер-витков AW_2 с поперечной осью, где действуют лишь токи Фуко, индуцированные в железе, уменьшение потока Φ_{a2} получается меньшее. Вследствие этого обратно синхронный поток испытывает при вращении пульсации во времени. Такого же характера пульсации получаются в машине с явно выраженными полюсами, причем в последней к неодинаковому действию токов Фуко в продольной и поперечной оси добавляется еще влияние неодинаковой магнитной проводимости в продольной и поперечной оси. Токи Фуко, индуцированные в железе и в обмотке возбуждения, вызывают большие потери, ведущие как к уменьшению к. п. д. машины, так и к сильному повышению температуры полюсов (§ 108), которое может сделать работу однофазной машины невозможной. При случайном замыкании обмотки возбуждения обратно синхронный поток индуцирует в ней э. д. с., которая вследствие большого числа витков обмотки возбуждения в 20—30 раз больше напряжения возбудителя, что может повести к пробое изоляции. Кроме того, обратно синхронный поток ухудшает форму кривой э. д. с. статора (§ 104). Вследствие этого в однофазных генераторах прибегают к специальным мерам для уничтожения обратно синхронного потока (§ 105). Для учета влияния обратно синхронного потока реакции, его обычно разлагают на продольную и поперечную составляющие (§ 103).

103.* Разложение обратно синхронного потока на продольную и поперечную составляющие.

Чтобы выяснить влияние обратно синхронного потока на работу синхронной машины, будем рассматривать его движение относительно ротора. Для этого перейдем к системе координат, связанной с ротором, приняв за начало координат точку O_2 , совпадающую с нейтральной линией и движущуюся вместе с ротором (рис. 164). В старой системе координат (связанной со статором и неподвижной в пространстве) пространственные координаты обозначены через x . В новой системе координат (связанной с ротором и движущейся с синхронной скоростью) обозначим координаты через ξ . Очевидно, между x и ξ имеем связь:

$$x = \xi + vt; \quad (122)$$

здесь v — скорость движения ротора относительно статора. За один оборот ротор проходит p двойных полюсных делений, или расстояние pX , так как длина X , равная периоду кривой м. д. с., соответствует двойному полюсному делению (§ 69). Скорость ротора (или путь, проходимый в секунду) равна, очевидно:

$$v = pX \frac{n}{60} = X\gamma = \frac{X}{T}; \quad (123)$$

здесь $T = 1/\gamma$ — период изменения тока (§ 10). Следовательно:

$$x = \xi + \frac{X}{T}t = \xi + \frac{X}{2\pi}\omega t; \quad (122a)$$

здесь T заменено через $\omega = 2\pi/T$ (§ 10). Обратно синхронную составляющую м. д. с. в новой системе координат можно написать в виде:

$$\begin{aligned} AW_2 &= -\frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s I \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{X} \xi + \frac{2\pi}{X} \frac{X}{2\pi} \omega t\right) = \\ &= -\frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s I \cos\left(2\omega t + \frac{2\pi}{X} \xi\right). \end{aligned} \quad (124)$$

Любое вращающееся поле с постоянной амплитудой можно разложить на два неподвижных пульсирующих поля, воспользовавшись тригонометрическим разложением:

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta. \quad (125)$$

Применяя эту формулу к обратно синхронной составляющей м. д. с. (формула 124), получим:

$$\begin{aligned} AW_2 &= \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s I \sin 2\omega t \sin \frac{\pi}{X} \xi - \\ &- \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s I \cos 2\omega t \cos \frac{2\pi}{X} \xi. \end{aligned} \quad (126)$$

Анализируя это выражение, можем установить: одна составляющая

$$AW_{2d} = \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s I \sin 2\omega t \sin \frac{\pi}{X} \xi \quad (127)$$

пульсирует во времени с двойной частотой и неподвижна относительно полюсов (максимуму м. д. с. во времени всегда соответствует одно и то же значение ξ , при котором $\sin \frac{\pi}{X} \xi = 1$); амплитуда AW_{2d} совпадает с осью полюсов, вследствие чего ее называют продольно пуль-

сирующей составляющей обратно синхронной м. д. с. Вторая составляющая

$$AW_{2q} = \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s I \cos 2\omega t \cos \frac{2\pi}{X} \xi \quad (128)$$

сдвинута от первой во времени и в пространстве на 90 эл. градусов. Она неподвижна относительно полюсов и пульсирует во времени с двойной частотой. Амплитуда ее совпадает с нейтральной зоной. Она называется поперечно пульсирующей составляющей обратно синхронной м. д. с. На рис. 166 представлена геометрическая интерпретация разложения вращающегося поля на два пульсирующих.

104*. Влияние продольно и поперечно пульсирующих составляющих обратно синхронного потока на работу однофазной синхронной машины.

Амплитуда продольно пульсирующей составляющей м. д. с. AW_{2d} совпадает с осью полюсов (обмотки возбуждения), поэтому м. д. с. AW_{2d} индуцирует в обмотке возбуждения э. д. с. и ток двойной частоты, соответственно двойной частоте пульсаций этой м. д. с. (рис. 167, а). Так как индуктивное



Рис. 167. Кривые изменения тока возбуждения (а) и э. д. с. статора (б) в однофазном генераторе без успокоительной обмотки.

Рис. 166. Разложение вращающегося поля на два пульсирующих.

сопротивление обмотки возбуждения очень велико по сравнению с ее активным сопротивлением (большое число витков), то ток двойной частоты отстает почти на 90° от э. д. с. Так как э. д. с. отстает на 90° от продольно пульсирующего потока, то магнитный поток, создаваемый током двойной частоты, направлен навстречу продольно пульсирующему потоку реакции и в результате последний будет почти полностью уничтожен.

Поперечно пульсирующий поток в машине с цилиндрическим ротором, если не имеется специальных обмоток в поперечной оси, уничтожен не

будет, так как токи Фуко в железе ротора, имеющем большое электрическое сопротивление, незначительны по величине. Поперечно пульсирующий поток индуцирует в обмотке статора значительной величины третью гармонику э. д. с., вследствие чего кривая э. д. с. статора сильно отличается от синусоиды (рис. 167, б). В появлении в статоре третьей гармоники можно убедиться следующим образом. Поперечно пульсирующий с двойной частотой поток разложим на два, вращающихся относительно ротора в разные стороны с одинаковой скоростью (равной двойной синхронной скорости $2n = 2 \times 60 \text{ в/р}$ относительно ротора). Так как ротор сам вращается в пространстве со скоростью n , то поток, вращающийся в ту же сторону, что и ротор, имеет в пространстве (относительно статора) скорость $2n + n = 3n$. Этот поток индуцирует в статоре э. д. с. тройной частоты (третью гармонику). Другой поток имеет относительно статора скорость $2n - n = n$; он индуцирует в статоре э. д. с. той же частоты, что и обмотка возбуждения.¹⁾

Для правильной работы однофазной синхронной машины желательно, наряду с продольно пульсирующей составляющей обратно синхронного потока, уничтожить и поперечно пульсирующую составляющую. Кроме того, желательно уничтожать продольно пульсирующий поток не обмоткой возбуждения, а другой специально устроенной обмоткой для того, чтобы избавиться от тока двойной частоты в обмотке возбуждения, ухудшающей коммутацию возбудителя и чтобы избежать опасности пробоя изоляции при случайном размыкании обмотки возбуждения (§ 102). Поэтому для уничтожения обратно синхронного потока обычно устраивают на роторе специальную короткозамкнутую (так называемую успокоительную) обмотку (§ 105).

105. Уничтожение обратно синхронного потока.

Для уничтожения обратно синхронного потока устраивают на роторе специальную обмотку, так называемую успокоительную, или демпферную обмотку. Успокоительная обмотка выполняется в виде медных стержней, уложенных на роторе и замкнутых друг с другом накоротко на торцевых концах медными кольцами. В машинах с цилиндрическим ротором роль стержней успокоительной обмотки играют бронзовые клинья, укрепляющие обмотку возбуждения во впадинах; для увеличения проводимости под бронзовые клинья подкладывают медные полосы. На торцевых концах эти полосы замкнуты специальными кольцами или массивными бандажными крышками. В машинах с явно выраженными полюсами стержни успокоительной обмотки, обычно круглого сечения, укладываются во впадины в полюсных наконечниках и замыкаются медными кольцами (рис. 168). Короткозамкнутые обмотки такого типа носят название беличьего колеса; по своей конструкции они аналогичны короткозамкнутой обмотке индукционных двигателей. В машинах с цилиндрическим ротором успокоительная обмотка обычно

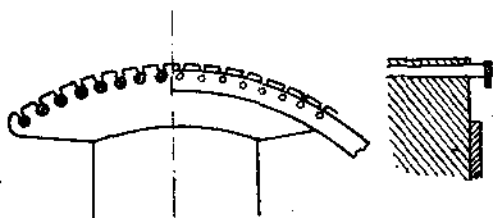


Рис. 168. Успокоительная обмотка в полюсных наконечниках.

¹⁾ Подробнее см. M. W e n g n e r. Teoretische und experimentelle Untersuchungen an der asynchronen Einphasen-Maschine. München u. Berlin, 1910.

симметрична по окружности ротора и вполне уничтожает обратно синхронный поток. Если успокоительная обмотка не симметрична, как всегда бывает в машинах с явно выраженными полюсами, где стержни успокоительной обмотки уложены лишь в полюсных наконечниках и отсутствуют в пространстве между полюсами, то обратно синхронный поток уничтожен не полностью. Продольно пульсирующая составляющая тушится токами, проходящими по стержням, уложенным на одном полюсе; поперечно пульсирующая составляющая может тушиться лишь стержнями двух смежных полюсов. Так как полюсные наконечники обычно близко расположены друг к другу, то несимметрия получается незначительной. От железа ротора успокоительная обмотка обычно не изолируется. Описанную конструкцию успокоительной обмотки называют иногда клеткой Леблана (Leblanc), предложившего впервые этот способ уничтожения обратно синхронного потока.

Успокоительная обмотка, очевидно, должна обладать незначительным активным сопротивлением по сравнению с реактивным для того, чтобы уменьшить, во-первых, потери от токов двойной частоты, индуктированных в ней обратно синхронным потоком, и, во-вторых, для того, чтобы эти токи отставали на 90° от э. д. с. и создаваемый ими поток был направлен навстречу обратно синхронному потоку. Полное сопротивление успокоительной обмотки также должно быть незначительным, иначе ток двойной частоты будет мал и создаваемый им поток не будет компенсировать обратно синхронный поток. Поэтому отставание тока в успокоительной обмотке на 90° от э. д. с. должно получаться не за счет увеличения реактивного сопротивления по сравнению с активным, а за счет уменьшения активного. Вследствие значительно меньшего сопротивления успокоительной обмотки по сравнению с сопротивлением обмотки возбуждения, последняя почти полностью разгружается от токов двойной частоты. В настоящее время все однофазные генераторы снабжаются, как правило, успокоительной обмоткой.¹⁾

106. Учет реакции якоря в однофазном генераторе с успокоительной обмоткой.

В однофазном генераторе с успокоительной обмоткой обратно синхронный поток почти полностью уничтожен, поэтому необходимо учитывать лишь синхронно вращающийся поток. Учет влияния последнего производится так же, как и в трёхфазной машине, так как синхронно вращающийся поток неподвижен относительно полюсов. Амплитуда синхронно вращающихся ампер-витков, рассчитанных на всю машину (на $2p$ полюсов), равна:

$$AW_p = \frac{1}{2} 0,9 f_{m1} q w_s 2p l = 0,9 f_{m1} w l. \quad (129)$$

¹⁾ Литература по успокоительным обмоткам для однофазных машин: 1) В. Г. Лаппе. Electrical Engineering Papers. East Pittsburgh. 1919, стр. 139: Dampers on Large Single-Phase Generators; 2) А. Маудуит. Diagrammes comparatifs des courants et des flux des amortisseurs à cage et à grille disposés sur les rotors à pôles saillants en rotation continue dans un champ. R. G. E. 1323, т. 26, стр. 131; 3) К. Шмидт. Anordnung der Dämpferstäbe bei elektrischen Maschinen. E. T. Z. 1915, стр. 187; 4) М. Венгнер. Theoretische und experimentelle Untersuchungen an der synchronen Einphasen-Maschine. München u. Berlin, 1910. См. также примечание к § 143.

107. Диаграммы напряжения однофазного генератора с успокоительной обмоткой.

Так как в обычных однофазных генераторах реакция якоря сводится лишь к синхронно вращающемуся потоку, то для однофазного генератора можно строить любую из диаграмм, приведенных для трехфазных машин.

108. Коэффициент полезного действия однофазных генераторов.

Коэффициент полезного действия однофазной машины всегда ниже, чем трехфазной, так как в однофазной машине к обычным потерям добавляются еще потери от токов Фуко, индуктированных в успокоительной обмотке и в железе ротора обратно синхронным потоком. Вследствие малого сопротивления успокоительной обмотки и почти полной компенсации ею обратно синхронного потока, потери в генераторах с успокоительной обмоткой всегда меньше, чем в генераторах без успокоительной обмотки. В табл. VI приведены сравнительные данные потерь в полюсах при работе машины трехфазным и однофазным генератором при одинаковой в обоих случаях силе тока в проводниках якоря. Машина двухполюсная на 25 пер. сек. Потери даны в процентах от однофазной мощности.¹⁾

Таблица VI.

Потери и повышение температуры полюсов в трехфазных и однофазных генераторах.

Мощность в kW	Тип полюса	Трехфазный без успок. обм.		Однофазный			
		Потери	Температура	без успок. обм.		с успок. обм.	
				Потери	Температура	Потери	Температура
750	Сплошной	0,53	27° C	3,75	95° C	0,8	34° C
1000	Сплошной	0,3	31° C	3,0	122° C	0,5	37° C
1000	Из листов железа	0,2	19° C	2,8	150° C	0,3	18° C

В этой же таблице приведено повышение температуры полюсов. Как видно из таблицы, токи Фуко в полюсных наконечниках в отсутствие успокоительной обмотки доводят температуру до недопустимых пределов, вследствие чего работа становится невозможной.²⁾

¹⁾ W. L. Waters. Modern Development in Single-phase Generators. Tr. A. I. E. E. 1908, стр. 1069.

²⁾ B. G. Lamme. Electrical Engineering Papers. East Pittsburgh, 1919, стр. 139; Dampers on Large Single-phase Generators.

ГЛАВА VIII.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ (СОВМЕСТНАЯ) РАБОТА СИНХРОННЫХ МАШИН.

109. Общие замечания.

Наличие на электрической станции только одного генератора в настоящее время бывает редко. Нагрузка электрической станции сильно изменяется как в течение суток, так и в течение года, поэтому было бы нерационально иметь на станции один генератор, рассчитанный на максимальную мощность станции, так как тогда большое количество времени он работал бы при малой нагрузке, когда его к. п. д., а в особенности, расход энергии первичного двигателя, отнесенный к единице полезной мощности, сильно ухудшаются. Поэтому на станциях обычно устанавливают несколько генераторов, включаемых параллельно; число одновременно работающих генераторов определяется величиной нагрузки сети в данный период. С целью избежать перерывов тока при аварии или при остановке на ремонт работающего генератора, на станции устанавливают, кроме того, резервные генераторы. Для уменьшения необходимого резерва большие промышленные районы питаются обычно одновременно от нескольких станций; при такой системе достаточно иметь резерв только на одной станции. В этом случае параллельно работают генераторы разных станций. Одновременное питание электрической сети от нескольких станций имеет и ряд других преимуществ: возможность рационального распределения нагрузок между станциями с целью повышения общего к. п. д., полное использование гидравлической энергии в случае параллельной работы гидравлической и паровых станций, увеличение надежности снабжения. Выгоды параллельной работы синхронных машин настолько значительны, что заставляют мириться с некоторыми недостатками параллельной работы. Последние заключаются в следующем.

Синхронные машины имеют особенность, не встречающуюся в других машинах, а именно, жесткую связь между частотой тока статора и скоростью вращения ротора:

$$v = \frac{p n}{60} \quad (29a).$$

Это обстоятельство ведет к важным последствиям, заставившим обратить серьезное внимание на изучение условий параллельной работы синхронных машин. Пока синхронный генератор работает на сеть в одиночку, отклонение его скорости вращения от номинальной не влечет за собою нарушения правильности работы, если не считать изменения частоты. Периодические изменения скорости, правда, могут вызывать неприятные для глаза пульсации силы света электрических ламп накаливания, что заставляет ограничивать величину изменения скорости, но с точки зрения работы самой машины они не представляют вреда. Совершенно другое

получается при приключении к одной сети нескольких синхронных машин (безразлично генераторов или двигателей). Работа электрической сети протекает нормально только в случае равенства частот всех э. д. с., приложенных к сети; в противном случае тока разных частот, накладываясь друг на друга, вызовут биения тока, мощности и напряжения, делающие совместную работу невозможной. Условие равенства частот требует, чтобы угловая скорость всех синхронных машин, приключенных к сети, выраженная в электрических градусах в секунду, была одинакова. Между тем, скорость ротора, как и всякого физического тела, обусловлена действующими на него силами: силами, приложенными со стороны первичного двигателя, силами сопротивления, силами инерции и пр.; при изменении одной из них скорость ротора изменяется, а это немедленно отражается на правильности работы сети.

Отсюда понятна необходимость тщательного изучения всех факторов, оказывающих то или иное влияние на угловую скорость ротора машины. Важнейшими факторами являются вращающие моменты сил, действующих на ротор.

110. Условия для параллельного включения синхронных машин.

В нормальных условиях между параллельно работающими машинами не должны проходить уравнительные токи, нагревающие бесполезно машины или перегружающие одни машины за счет недогрузки других. Для этого должны существовать определенные соотношения между величинами и фазами э. д. с. машин. Влияние величины и фазы э. д. с. на величину тока, проходящего по машине, рассмотрено ниже, в §§ 122—123. Избегать появления уравнительного тока следует, в особенности, в момент приключения синхронной машины параллельно к уже работающим машинам, так как, внезапно появляясь, этот ток может иметь очень большое значение (§ 194) и вредно отозваться на сети и на подключаемой машине. Для того чтобы в момент включения через машину не проходил уравнительный ток, э. д. с. ее должна быть равна по величине напряжению сети и сдвинута от него по фазе на 180° (т. е. направлена навстречу). Это условие должно удовлетворяться в любой момент времени, что требует, очевидно, равенства частот машины и сети; машина для этого должна вращаться синхронно (т. е. с одинаковой угловой скоростью, выраженной в электрических градусах в секунду) с уже работающими машинами. Если эти условия выполнены, то включение машины в сеть происходит без всякого толчка тока. Изменяя затем э. д. с. по величине или по фазе, можно вызвать прохождение тока по обмотке статора машины.

Таким образом, для правильного включения синхронной машины в сеть необходимо выполнение следующих трех условий:

- 1) напряжение (э. д. с.) подключаемой машины в каждой фазе должно быть равно по величине напряжению сети;
- 2) напряжение (э. д. с.) подключаемой машины в каждой фазе должно быть сдвинуто на 180° от напряжения сети;
- 3) частота подключаемой машины должна быть равна частоте сети.

О способах включения машин на параллельную работу см. §§ 125—127.

111. Уравнение для вращающих моментов, действующих на ротор синхронной машины.

Мощность $P_{\text{в}}$, получаемая синхронной машиной от первичного двигателя, по закону сохранения энергии равняется: 1) мощности $P_{\text{от}}$, отдаваемой машиной в виде электрической энергии тока; мощность $P_{\text{с}}$ состоит из

электромагнитной мощности P_ϕ , получающейся за счет взаимодействия потока ротора (полюсов) с током статора, и из асинхронной, или усконоительной, мощности P_D , получающейся за счет взаимодействия потока статора с токами в роторе; мощность P_ϕ включает и медные потери в обмотке статора mI^2r ; 2) мощности P_J , идущей на сообщение ротору машины ускорения, аккумулирующейся в виде кинетической энергии ротора; 3) мощности P_Q , идущей на покрытие потерь в машине, переходящей в конечном счете в теплоту; мощность P_Q состоит из мощности, идущей на покрытие железных потерь Q_{Fe} , и из мощности, идущей на покрытие механических потерь (от трения) Q_r :

$$P_Q = Q_{Fe} + Q_r.$$

Медные потери $Q_{ca} = mI^2r$ пропорциональны полезной мощности, отдаваемой машиной в сеть; их учитываем как составную часть мощности электрического тока P_ϕ ; потери от трения и железные можно считать постоянными: $Q_{Fe} + Q_r = P_Q = \text{const}$. Таким образом

$$P_d = P_\phi + P_D + P_J + P_Q. \quad (130)$$

Для изучения движения ротора синхронной машины удобнее вместо мощностей пользоваться вращающимися моментами. Если разделить все члены уравнения (130) на угловую скорость Ω , получим уравнение вращающихся моментов:

$$M_d = M_\phi + M_D + M_J + M_Q. \quad (131)$$

Угловая скорость Ω представляет собою скорость ротора в пространстве и выражается в простр. градусах/сек. (простр. радианах/сек.); через ω будем обозначать угловую частоту тока, выраженную в эл. град./сек. (эл. радианах/сек.).

Очевидно (§ 29)

$$\Omega = \frac{\omega}{p}. \quad (132)$$

Прежде чем оперировать с уравнением (131), рассмотрим каждую из входящих в него величин в отдельности.

112. Электромагнитный вращающий момент синхронной машины.

При вращении ротора машины синхронно с ним вращается магнитный поток междужелезного пространства, пересекающий проводники обмотки статора. Если по проводникам проходит электрический ток, то он создает собственный магнитный поток, и распределение магнитного потока междужелезного пространства искажается (рис. 169): с одной стороны проводника получается сгущение магнитных линий, а с другой — разрежение. Вследствие наличия бокового распора магнитных линий, между проводником с током и магнитным потоком возникает электромагнитная сила, величина которой может быть найдена по формуле Био-Савара (§ 6). Сила, действующая на проводник, направлена со стороны сгущения магнитных линий в сторону разрежения. По Ньютоновскому закону равенства действия и противодействия такую же силу, но направленную в обратную сторону, испытывают линии магнитного потока. Электромагнитная сила стремится изменить взаимное расположение проводника и магнитного потока. Про-

Обмотка закреплен неподвижно на статоре, поэтому он не может вращаться. Магнитный поток междужелезного пространства сцеплен обмоткой возбуждения и может двигаться только вместе с ротором. Вследствие этого электромагнитная сила действует на ротор. В синхронном генераторе ротор вращается первичным двигателем. Направление д. с. в проводниках можно определить по правилу правой руки (§ 5). Направление активного тока в генераторе совпадает с направлением д. с.; не трудно убедиться, что возникающая при этом электромагнитная сила действует на магнитный поток в сторону, обратную вращению ротора. Вращающий момент первичного двигателя должен, следовательно, преодолевать электромагнитную силу. Если извне приложенный вращающий момент исчезнет, а по статору будет проходить того же направления ток, то ротор под влиянием электромагнитной силы начнет вращаться в обратную сторону. Машина перейдет в режим синхронного двигателя.

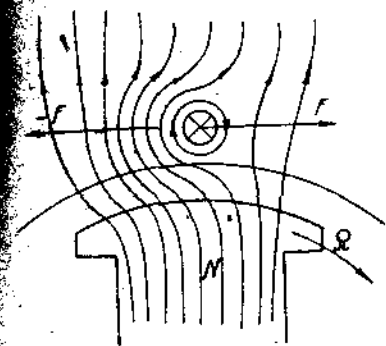


Рис. 169. Направление электромагнитной силы, действующей на проводник.

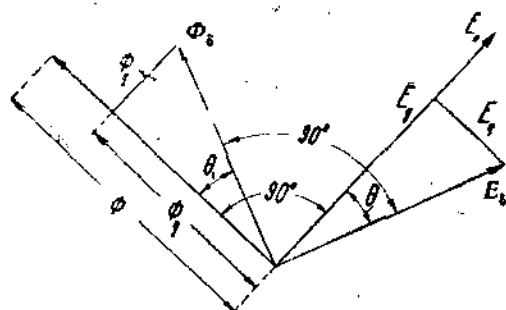


Рис. 170. Разложение потока синхронной машины на продольный и поперечный.

Вращающий момент, обусловленный электромагнитными силами, называется электромагнитным моментом. Для одного проводника электромагнитный момент M равен произведению из электромагнитной силы проводника на плечо, равное радиусу внутренней окружности статора:

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{2p\tau}{2\pi} = \frac{p\tau}{\pi};$$

$$M = FR_1 = \frac{p\tau}{\pi} F \text{ дин} \times \text{см}; \quad (133)$$

здесь D_1 — внутренний диаметр статора в см, τ — полюсное деление в см, p — число пар полюсов. Электромагнитная сила по формуле Био-Савара равна:

$$F = iB_x l 10^{-1} \text{ дин}; \quad (4b)$$

здесь i — сила тока в амперах, B_x — индукция магнитного поля в месте расположения проводника в гауссах, l — активная длина проводника в см. В междужелезном пространстве индукция равна:

$$B_x = \frac{d\Phi_s}{ds}, \quad (134)$$

где Φ_s — результирующий поток междужелезного пространства, s — площадь. Поток Φ_s равен геометрической сумме двух потоков: продольного

Φ_s , т. е. совпадающего с осью полюсов, и поперечного Φ_q , перпендикулярного к оси полюсов (рис. 170):

$$\Phi_s = \Phi_g + \Phi_q; \quad (135)$$

продольный поток междужелезного пространства равен:

$$\Phi_g = \Phi - \Phi_{ag}; \quad (136)$$

а поперечный

$$\Phi_q = \Phi_{aq}; \quad (137)$$

здесь Φ — основной поток полюсов, Φ_{ag} и Φ_{aq} — продольный и поперечный потоки реакции статора (§ 85). Из рис. 170 видно, что

$$\Phi_g = \Phi_s \cos \theta'; \quad \Phi_q = \Phi_s \sin \theta'; \quad (138)$$

где θ' — угол между осью полюсов и осью результирующего потока междужелезного пространства. Соответственно разложению потока Φ_s на две составляющие, индукцию B_x в точке расположения проводника x можно рассматривать также состоящей из двух составляющих, обусловленных продольным и поперечным потоками

$$B_x = \frac{d\Phi_g}{ds} + \frac{d\Phi_q}{ds} = B_{gx} + B_{qx}. \quad (139)$$

Следовательно, электромагнитный момент одного проводника равен:

$$M = FR_1 = \frac{p}{\pi} i B_x 10^{-1} = \frac{p}{\pi} i (B_{gx} + B_{qx}) 10^{-1} \text{ дин} \times \text{см}. \quad (140)$$

Примем, что индукция в междужелезном пространстве распределена по синусоиде. Тогда, принимая начало координат O_1 в геометрической нейтральной точке (система координат неподвижна относительно полюсов), получим, что составляющие индукции B_{gx} и B_{qx} изменяются вдоль окружности статора по закону:

$$B_{gx} = B_g \sin x; \quad B_{qx} = B_q \cos x; \quad (141)$$

здесь B_g и B_q — максимальные значения продольной и поперечной составляющих индукции; x — расстояние по окружности статора от начала координат O_1 до рассматриваемой точки (рис. 171).

Вращающий момент, создаваемый проводниками одной фазы, равен сумме моментов, создаваемых каждым проводником в отдельности. По

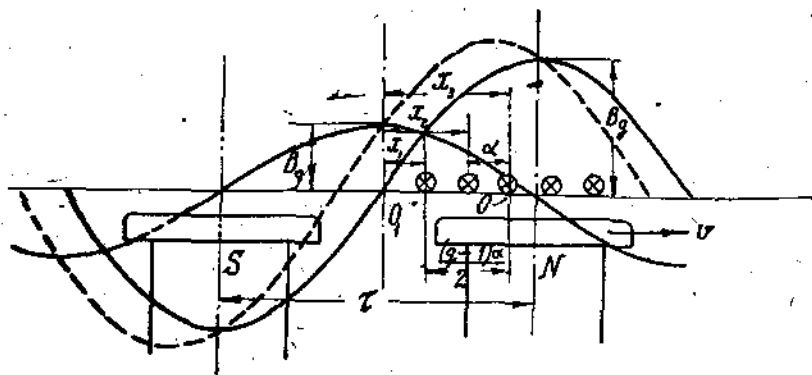


Рис. 171. Разложение индукции в междужелезном пространстве на продольную и поперечную составляющие.

всем проводникам одной фазы проходит один и тот же ток i , но индукция в точках расположения проводников не одинакова. Поэтому и вращающий момент, создаваемый каждым проводником, не одинаков.

При диаметральной шаге обмотки достаточно вычислить момент q проводников (индуктируемых сторон), лежащих под одним полюсом, так как под каждым полюсом проводники расположены совершенно одинаково относительно магнитного потока (§ 57), вследствие чего электромагнитный момент одной фазы в $2p$ раз больше электромагнитного момента q проводников, лежащих под одним полюсом. Для некоторого момента времени, когда проводники занимают положение относительно магнитного потока, указанное на рис. 171, электромагнитный момент q проводников равен:¹⁾

$$M_1 = \frac{p\tau}{\pi} i l 10^{-1} \left[B_g \sin x_1 + B_g \sin x_2 + \dots + B_g \sin x_q \right] + \\ + \frac{p\tau}{\pi} i l 10^{-1} \left[B_q \cos x_1 + B_q \cos x_2 + \dots + B_q \cos x_q \right]. \quad (142)$$

Так как расстояние между проводниками одинаково и равно α , то суммы, стоящие в скобках, представляют собою мгновенные значения геометрической суммы векторов, сдвинутых друг от друга на угол α . Так для первой суммы можно составить рис. 172. С вычислением такой суммы мы уже встречались при выводе формулы для э. д. с. (§ 56); поэтому для амплитуды $\overline{AB}$ можем сразу написать

$$\overline{AB} = f_{m1} q B_g;$$

здесь $f_{m1} = \frac{\sin q\alpha/2}{q \sin \alpha/2}$ — коэффициент обмотки. Треугольники ABO и ADO равнобедренные, следовательно, угол $OAD = 90 - \frac{\alpha}{2}$, а угол $OAB = 90 - q \frac{\alpha}{2}$. Угол BAD равен:

$$\angle BAD = \angle OAD - \angle OAB = \frac{(q-1)\alpha}{2}.$$

Мгновенное значение вектора $\overline{AB}$, таким образом, равно (ср. § 14):

$$\overline{AB} \sin \left[x_1 + \frac{(q-1)\alpha}{2} \right]. \quad (143)$$

Подобное выражение можем получить и для второй суммы. Подставляя их выражения в уравнение (142), получаем

$$M_1 = \frac{p\tau}{\pi} i l 10^{-1} q w_s f_{m1} \left\{ B_g \sin \left[x_1 + \frac{(q-1)\alpha}{2} \right] + B_q \cos \left[x_1 + \frac{(q-1)\alpha}{2} \right] \right\}. \quad (144)$$

Здесь сумма умножена на w_s , чтобы учесть, что в общем случае каждая индуктируемая сторона содержит w_s проводников.

Так как полюса движутся относительно статора, то в месте расположения проводников индукция с течением времени изменяется; координаты точек расположения проводников $x_1, x_2, \dots$ являются функциями времени. Примем за начало отсчета времени момент, когда ось полюсов совпадает с осью обмотки фазы. Если угловая скорость полюсов в эд.

¹⁾ Принимаем, что каждая индуктируемая сторона состоит из одного проводника; в противном случае выражение для M_1 необходимо умножить на w_s — число проводников в индуктируемой стороне катушки.

радианах/сек. равна ω , то координата точки O статора (фиг. 171), лежащей на линии, перпендикулярной к оси обмотки фазы, изменяется по закону:

$$x = \omega t, \quad (145)$$

в начальный момент времени точки O_1 (связанная с ротором) и O (связанная со статором) совпадают.

Крайний проводник обмотки фазы, которому соответствует координата x_1 , отстоит от точки O , как не трудно убедиться, на расстоянии $\frac{(q-1)\alpha}{2}$ в отрицательную сторону, следовательно:

$$x_1 = \omega t - \frac{(q-1)\alpha}{2}. \quad (146)$$

Подставляя это выражение в уравнение (144), получим

$$M_1 = \frac{p\tau}{\pi} i q \omega_s f_{m1} 10^{-1} [B_g \sin \omega t + B_q \cos \omega t]. \quad (147)$$

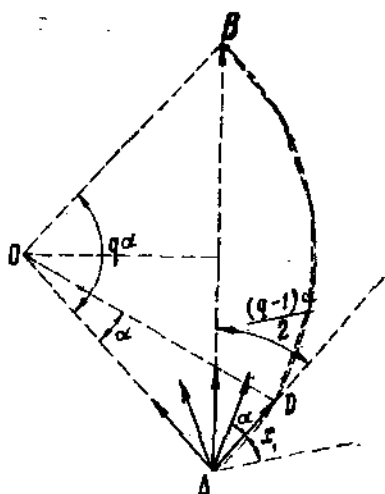


Рис. 172. Геометрическая сумма векторов B_g , сдвинутых друг от друга на угол α .

Для получения вращающего момента всей фазной обмотки умножаем это уравнение на $2p$ и, принимая во внимание, что $pq\omega_s = \omega$ — число витков одной фазы, находим:

$$M_p = 2 \frac{p\tau}{\pi} i f_{m1} \omega 10^{-1} [B_g \sin \omega t + B_q \cos \omega t]. \quad (148)$$

Входящая в это уравнение сила тока i также является синусоидальной функцией времени. При указанном выше выборе начала отсчета времени э. д. с. холостого хода изменяется по закону $e_0 = \sqrt{2} E_0 \sin \omega t$; если ток отстает на угол ψ от E_0 , то его выражение имеет вид:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t - \psi).$$

Следовательно:

$$M_p = 2 \frac{p\tau}{\pi} i f_{m1} \omega 10^{-1} I_{\max} \sin(\omega t - \psi) [B_g \sin \omega t + B_q \cos \omega t]. \quad (149)$$

Для второй и третьей фазы получаем такие же выражения, с той лишь разницей, что во времени изменения силы тока и индукции сдвинуты соответственно для второй и третьей фаз на углы $2\pi/3$ и $4\pi/3$.

Вращающий момент трехфазной машины равен сумме вращающихся моментов, создаваемых каждой фазой; для него получаем выражение:

$$M_{\phi} = 2 \frac{p\tau}{\pi} I_{f_{m1}} \omega 10^{-1} B_g I_{\max} [\sin(\omega t - \psi) \sin \omega t + \\ + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \psi) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \psi) \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})] + \\ + 2 \frac{p\tau}{\pi} I_{f_{m1}} \omega 10^{-1} B_g I_{\max} [\sin(\omega t - \psi) \cos \omega t + \\ + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \psi) \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \psi) \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})].$$

Произведя в этом уравнении тригонометрические действия, находим

$$M_{\phi} = 3 \frac{p\tau}{\pi} I_{f_{m1}} \omega 10^{-1} [B_g I_{\max} \cos \psi + B_g I_{\max} \sin \psi] \text{ дин} \times \text{см.} \quad (150)$$

Так как $I_{\max} \cos \psi = \sqrt{2} I_q$ — поперечный ток, а $I_{\max} \sin \psi = \sqrt{2} I_d$ — продольный ток, то момент пропорционален сумме произведения продольной индукции на поперечный ток и поперечной индукции на продольный ток.

Уравнение (150) дает момент в динах $\times \text{см}$; для выражения его в кгм уравнение (150) необходимо разделить на $9,81 \times 10^7$.

Выведенное выражение (150) является основным уравнением для электромагнитного вращающего момента синхронной машины; оно охватывает все режимы работы ее; более подробное исследование этого уравнения будет произведено в §§ 113, 128. Теперь же преобразуем его так, чтобы в него вошла э. д. с., что можно сделать на основании следующих уравнений:

$$\frac{p\tau}{\pi} I_{f_{m1}} \omega B_g 10^{-1} = \frac{p}{\pi} \frac{\pi}{2} f_{m1} \omega \Phi_g 10^{-1} \frac{\Omega}{\Omega} = \frac{p}{2} f_{m1} \omega \Phi_g 10^{-1} \frac{2\pi}{p} \frac{1}{\Omega} = \frac{E_g 10^7}{\sqrt{2} \Omega},$$

аналогично

$$\frac{p\tau}{\pi} I_{f_{m1}} \omega B_g 10^{-1} = \frac{E_g 10^7}{\sqrt{2} \Omega},$$

следовательно, вращающий момент равен:

$$M_{\phi} = \frac{3}{\Omega} E_g I \cos \psi 10^7 + \frac{3}{\Omega} E_q I \sin \psi 10^7 \text{ дин} \times \text{см}; \quad (151)$$

здесь $I = I_{\max} / \sqrt{2}$ — действующее значение тока, а $E_g = E_0 - E_{ag}$ и $E_q = E_{aq}$ — продольная и поперечная э. д. с. (§ 85). Так как 1 дина $\times \text{см} = 1$ эрг, а 10^7 эргов = 1 ватт $\times \text{сек.}$, то получаем

$$M_{\phi} = \frac{3}{\Omega} E_g \cos \psi + \frac{3}{\Omega} E_q I \sin \psi \text{ ватт} \times \text{сек.}; \quad (152)$$

здесь $\Omega = \omega / p = 2\pi / p$ выражено в простр. радианах/сек.

Вращающий момент M_{ϕ} зависит от величины угла θ , где θ — угол между векторами э. д. с. E_g и напряжением на зажимах U . Для того чтобы быстрее вывести эту зависимость, перейдем от электромагнитного момента M_{ϕ} к электромагнитной мощности P_{ϕ} (§ 113), что позволит воспользоваться векторными диаграммами

113. Электромагнитная мощность синхронной машины.

Так как мощность равна $P_\psi = M_\psi \Omega$, то по уравнению (152) имеем

$$P_\psi = 3E_g I \cos \psi + 3E_q I \sin \psi \text{ ватт}; \quad (153)$$

подставляя вместо E_g величину $E_0 - E_{ag}$, а вместо E_q величину E_{aq} (рис. 173, см. также § 85), получаем

$$P_\psi = 3E_0 I \cos \psi - 3E_{ag} I \cos \psi + 3E_{aq} I \sin \psi.$$

Обращаясь к рис. 173, видим, что:

$$E_0 I \cos \psi = I \times \overline{OC}$$

$$E_{ag} I \cos \psi = I \times \overline{AC};$$

$$E_{aq} I \sin \psi = I \times \overline{AB}.$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} P_\psi &= 3E_0 I \cos \psi - 3E_{ag} I \cos \psi + 3E_{aq} I \sin \psi = \\ &= 3I \times \overline{OC} - 3I \times \overline{AC} + 3I \times \overline{AB} = 3I \times \overline{OB}. \end{aligned}$$

Обозначим отрезок $\overline{OQ}$ через E_Q и назовем E_Q эквивалентной э. д. с.; тогда $\overline{OB} = E_Q \cos \psi$ и мощность

$$P_\psi = 3E_Q I \cos \psi = m E_Q I \cos \psi \text{ ватт}, \quad (154)$$

где $m = 3$ — число фаз. Электромагнитная мощность синхронной машины пропорциональна не напряжению и не э. д. с., индуктированной при холостом ходе или при нагрузке, а фиктивной эквивалентной э. д. с. E_Q . Как следует из диаграммы для ненасыщенной машины с цилиндрическим ротором (§ 80) и из вывода диаграммы Бен-Эшенбурга (§ 82), эквивалентная э. д. с. E_Q равна э. д. с. холостого хода ненасыщенной машины с цилиндрическим ротором. Поэтому в тех случаях, когда требуется принимать во внимание лишь мощность синхронной машины, можно пользоваться диаграммой Бен-Эшенбурга.

Выражение для мощности можно представить в другом виде. Проведем через точку O линию, упреждающую вектор $Iz = \overline{AC}$ на угол ψ (рис. 174). Проекция вектора Iz на эту линию равна:

$$Iz \cos \psi = \overline{QM} = \overline{OQ} + \overline{OM} = E_Q \cos \psi_a - U \cos(\psi_a + \theta);$$

$$\text{здесь } \overline{OM} = U \cos(180 - \psi_a - \theta) = -U \cos(\psi_a + \theta);$$

отсюда

$$P_\psi = m E_Q I \cos \psi = \frac{m \times \overline{QM} \times E_Q}{z} = \frac{m E_Q}{z} \left[E_Q \cos \psi_a - U \cos(\psi_a + \theta) \right]; \quad (155)$$

здесь U — напряжение на зажимах машины, $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ — полное синхронное сопротивление, $\psi_a = \arctg \frac{x}{r}$, где r — активное сопротивление, x — синхронное реактивное сопротивление обмотки статора.

Таким образом, электромагнитная мощность генератора есть функция угла θ :

$$P_\psi = f(\theta); \quad (156)$$

Угол θ есть угол между осью полюсов и осью результирующего потока машины; ¹⁾ θ также равно углу между э. д. с. холостого хода и напряжением; θ выражено в эл. радианах. Чтобы выявить влияние изменения угла θ , разложим функцию $f(\theta)$ в ряд Тейлора:

$$P_{\phi} = f(\theta) = f(\theta_1) + (\theta - \theta_1) f'(\theta_1) + (\theta - \theta_1)^2 f''(\theta_1) + \dots; \quad (157)$$

здесь θ — переменная величина; θ_1 — частное значение угла θ ; $f'(\theta_1)$, $f''(\theta_1)$ и т. д. — значения первой, второй и т. д. производной функции $f(\theta)$ при данном частном значении угла θ_1 . Пренебрегая членами высшего порядка, получим

$$P_{\phi} = f(\theta_1) + (\theta - \theta_1) f'(\theta_1). \quad (158)$$

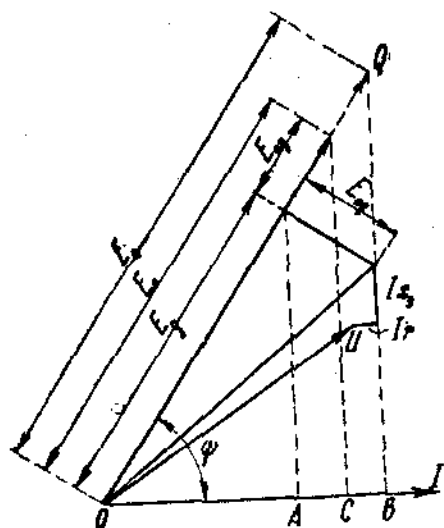


Рис. 173. К выводу формулы для электромагнитного момента.

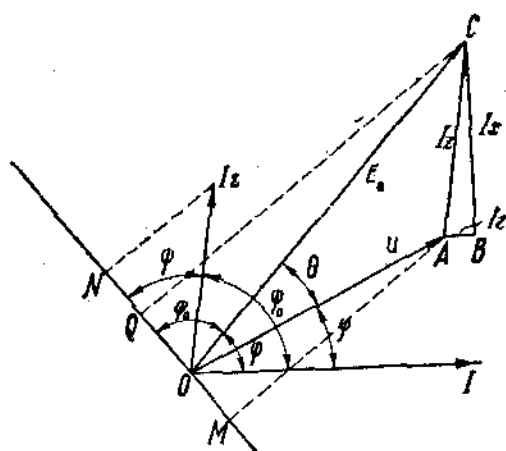


Рис. 174. К выводу формулы для электромагнитного момента.

Первый член правой части равен:

$$P_{\phi 1} = f(\theta_1) = \frac{mE_Q}{z} \left[E_Q \cos \psi_a - U \cos (\psi_a + \theta_1) \right] \text{ ватт}; \quad (159)$$

$P_{\phi 1}$ представляет собою электромагнитную мощность при данном режиме, определяемом частным значением угла θ_1 . Второй член правой части равен:

$$(\theta - \theta_1) f'(\theta_1) = (\theta - \theta_1) \frac{mE_Q}{z} U \sin (\psi_a + \theta_1) = (\theta - \theta_1) P_s \text{ ватт}. \quad (160)$$

Величина $P_s(\theta - \theta_1)$ носит название синхронизирующей мощности, величину P_s называют синхронизирующей силой: ²⁾

$$P_s = \frac{mE_Q U}{z} \sin (\psi_a + \theta_1) \text{ ватт}. \quad (161)$$

¹⁾ Здесь под результирующим потоком понимаем поток, равный сумме потока полюсов Φ , потока реакции Φ_a и потока рассеяния статора Φ_s (см. § 66).

²⁾ Название чисто условное, так как эта величина выражается в ваттах.

Очевидно, что при разных режимах, соответствующих разному значению угла θ_1 , величина синхронизирующей силы P_s различна (§ 121).

Таким образом, электромагнитная мощность равна:

$$P_\psi = P_{\psi_1} + P_s(\theta - \theta_1), \quad (162)$$

или, обозначая приращение угла $\theta - \theta_1$ через α :

$$P_\psi = P_{\psi_1} + P_s \alpha. \quad (163)$$

Соответственно этому электромагнитный момент равен:

$$M_\psi = M_{\psi_1} + S(\theta - \theta_1) = M_{\psi_1} + S\alpha, \quad (164)$$

здесь

$$S = \frac{P_s}{\alpha} = \frac{\pi E_Q U}{\omega z} \sin(\psi_a + \theta_1) = \frac{\pi p E_Q U}{\omega z} \sin(\psi_a + \theta_1) \text{ ватт} \times \text{сек.} \quad (165)$$

или

$$S = \frac{\pi p E_Q U}{\omega z} \sin(\psi_a + \theta_1) \frac{1}{9,81} \text{ кгм.}$$

В уравнениях (162—164) углы α и θ выражены в эл. радианах; для получения пространственных углов их надо делить на p . Очевидно, что при установившемся режиме, когда $\theta = \theta_1 = \text{const}$, члены $P_s(\theta - \theta_1)$ и $S(\theta - \theta_1)$ превращаются в нули и электромагнитная мощность P_ψ и момент M_ψ являются величинами постоянными.

Необходимо иметь в виду, что выражения (162 и 164) справедливы только при малых значениях угла $\alpha = \theta - \theta_1$, практически при $\alpha < 25$ эл. градусов; при больших значениях α членами высшего порядка в разложении (157) пренебрегать нельзя.

114. Успокоительный момент.

Успокоительный момент (иначе называемый демпферным, или асинхронным) возникает только в том случае, если поток реакции статора движется несинхронно с полюсами, поэтому при нормальной работе, когда поток статора вращается синхронно с полюсами, он равен нулю. Несинхронное вращение потока статора и полюсов может появиться лишь в случае возникновения при параллельной работе колебаний ротора, когда скорость ротора периодически изменяется вокруг средней (синхронной) скорости (§ 129); поток статора в случае, если машина работает параллельно с другими, продолжает вращаться синхронно, поэтому между ротором и потоком статора появляются взаимные перемещения. Если ротор получает движение относительно потока статора, то последний индуцирует в проводящих контурах ротора (обмотка возбуждения, полюсные наконечники и т. д.) ток, который, взаимодействуя с вызвавшим его потоком, создает вращающий момент. Величины э. д. с., а следовательно, и тока, индуцированных в роторе, пропорциональны относительной скорости движения ротора и потока $\frac{d\alpha}{dt}$, где α — угол относительного перемещения ротора от среднего положения, соответствующего нормальному режиму (§ 113). Следовательно, и вращающий момент пропорционален относительной скорости (скорости колебаний):

$$M_D = D \frac{d\alpha}{dt}; \quad (166)$$

здесь через D обозначен коэффициент пропорциональности (§ 115). Направление вращающего момента M_D по закону Ленца таково, что он препятствует относительному движению ротора; таким образом, этот момент успокаивает возникающие колебания скорости ротора. Если синхронная машина подвержена возникновению колебаний, то на роторе (в полюсных наконечниках) устраивают специальную успокоительную (демпферную) обмотку, благодаря чему достигают увеличения успокоительного момента. По конструкции такая обмотка аналогична успокоительной обмотке однофазных машин (§ 105).

Поток полюсов всегда неподвижен относительно ротора, поэтому он никакого успокоительного момента не создает.

115*. Величина успокоительного момента.

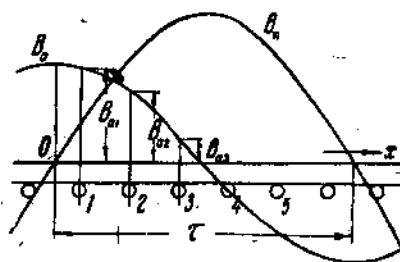


Рис. 175. Успокоительная обмотка.

Определим величину успокоительного момента, создаваемого успокоительной обмоткой, уложенной на роторе (рис. 175), причем примем, что обмотка симметрично расположена по всей окружности ротора, а последний имеет неявно выраженные полюса. Будем принимать, что колебания ротора (т. е. его движение относительно потока статора) происходят по синусоидальному закону:

$$\alpha = \alpha_{\max} \sin \omega_k t; \quad (167)$$

здесь α — угол отклонения ротора от нормального (среднего) положения в эл. радианах, $\alpha_{\max}$ — максимальный угол отклонения (амплитуда), ω_k — угловая частота колебаний в 1 сек. Скорость колебаний

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha_{\max} \omega_k \cos \omega_k t \text{ эл. радиан/сек.} \quad (168)$$

В стержне 1 успокоительной обмотки индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости движения стержня относительно потока и величине индукции B_{a1} в месте расположения стержня:

$$e_1 = B_{a1} l v_k 10^{-8} = B_{a1} l \frac{D_2}{2p} \frac{d\alpha}{dt} 10^{-8} = \frac{B_{a1} l D_2}{2p} \alpha_{\max} \omega_k \cos \omega_k t 10^{-8} \text{ вольт;} \quad (169)$$

здесь $v_k = \frac{D_2}{2p} \frac{d\alpha}{dt}$ — окружная скорость относительного движения стержня в см/сек., $\frac{d\alpha}{dt}$ — угловая скорость в простр. радианах/сек., D_2 — диаметр ротора в см, l — активная длина стержня в см, p — число пар полюсов; B_{a1} — индукция только потока статора, так как поток полюсов неподвижен относительно успокоительной обмотки. Сила тока в стержне 1 равна:

$$i_1 = \frac{B_{a1} l D_2 \alpha_{\max} \omega_k}{2p \sqrt{r_d^2 + x_d^2}} \cos(\omega_k t - \varphi_d) 10^{-8} \text{ ампер;} \quad (170)$$

здесь r_d и x_d — активное и реактивное сопротивления стержня в омах; $\varphi_d = \arctg x_d / r_d$ — угол сдвига фаз между э. д. с. и током в стержне (сопротивлением соединительных колец на торцевых концах будем пренебрегать).

небрегать). Вращающий момент, создаваемый током одного стержня, на основании закона Био-Савара, равен:

$$M_1 = B_{a1} i_1 10^{-1} \frac{D_1}{2} = \frac{B_{a1}^2 p D_2^2 a_{\max} \omega_k}{4p \sqrt{r_d^2 + x_d^2}} \cos(\omega_k t - \varphi_d) 10^{-9} \text{ дин} \times \text{см.} \quad (171)$$

Принимая во внимание только первую гармонику кривой м. д. с. статора, получим, что индукция потока статора распределена по окружности ротора по синусоидальной кривой:

$$B_a = B_{a\max} \cos x.$$

На одно полюсное деление этой кривой приходится Q_d стержней успокоительной обмотки, а на всю машину имеем $2p$ полюсных делений, поэтому успокоительный момент всей обмотки равен:

$$M_D = 2p \frac{p D_2^2 a_{\max} \omega_k}{4p \sqrt{r_d^2 + x_d^2}} \cos(\omega_k t - \varphi_d) [B_{a1}^2 + B_{a2}^2 + \dots + B_{aQ}^2] 10^{-9};$$

здесь $B_{a1}, B_{a2}, \dots$ — индукция в месте расположения стержня 1, 2 и т. д. Сумму, стоящую в скобках, при большом числе стержней Q_d можно заменить средним значением, умноженным на число стержней:

$$B_{a1}^2 + B_{a2}^2 + \dots + B_{aQ}^2 = Q_d \left(\frac{1}{\pi} \int_0^\pi B_{a\max}^2 \cos^2 x dx \right) = \frac{Q_d B_{a\max}^2}{2}.$$

Следовательно, момент успокоительной обмотки равен:

$$M_D = \frac{Q_d B_{a\max}^2 p D_2^2 a_{\max} \omega_k}{4p \sqrt{r_d^2 + x_d^2}} \cos(\omega_k t - \varphi_d) 10^{-9} \text{ дин} \times \text{см}; \quad (172)$$

для перевода в кгм это выражение надо разделить на $9,81 \times 10^7$.

Раскрывая выражение

$$\begin{aligned} \cos(\omega_k t - \varphi_d) &= \cos \omega_k t \cos \varphi_d + \sin \omega_k t \sin \varphi_d = \\ &= \cos \omega_k t \frac{r_d}{\sqrt{r_d^2 + x_d^2}} + \sin \omega_k t \frac{x_d}{\sqrt{r_d^2 + x_d^2}} \end{aligned} \quad (173)$$

и заменяя величину

$$\begin{aligned} B_{a\max} l D_2 &= B_{a\max} l \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{2}{\pi} B_{a\max} l p = \\ &= \Phi_a p \frac{4,44 \sqrt{f_{m1}} 10^{-8}}{4,44 \sqrt{f_{m1}} 10^{-8}} = E_a \frac{p}{4,44 \sqrt{f_{m1}} 10^{-8}}, \end{aligned}$$

где $\frac{2}{\pi} B_{a\max} = B_{a\text{med}}$ (§ 10), f_{m1} — коэффициент обмотки, ω — число витков обмотки статора, ν — частота, Φ_a — поток реакции, E_a — э. д. с., индуцированная потоком реакции в обмотке статора, равная в ненасыщенной машине $E_a = x_a l$ (§ 80), окончательно получаем

$$\begin{aligned} M_D &= \frac{E_a^2 p^2 Q_d}{2\pi^2 \nu^2 f_{m1}^2 \omega^2} \frac{a_{\max} \omega_k}{4(r_d^2 + x_d^2)} (r_d \cos \omega_k t + x_d \sin \omega_k t) \frac{10^{-7}}{9,81} = \\ &= D \frac{da}{dt} + S_d a \text{ кгм}; \end{aligned} \quad (174)$$

здесь

$$D = \frac{E_a^2 p^2 Q_d r_d}{8\pi^2 \nu^2 f_{m1}^2 \omega^2 (r_d^2 + x_d^2)} \frac{10^{-7}}{9,81} \text{ кгм} \times \text{сек}; \quad (175)$$

$$S_d = \frac{E_d^2 p^2 Q_d \omega_k x_d}{8\pi^2 f_{m1}^2 \omega^2 (r_d^2 + x_d^2)} \frac{10^{-7}}{9,81} \text{ кЗМ}; \quad (176)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = x_{\max} \omega_k \cos \omega_k t; \quad \alpha = x_{\max} \sin \omega_k t; \quad (168a)$$

углы выражены в эл. радианах.

Итак, вращающий момент, создаваемый успокоительной обмоткой, равен сумме двух составляющих: 1) успокоительного момента $D \frac{d\alpha}{dt}$, пропорционального скорости колебаний ротора и 2) синхронизирующего момента $S_d \alpha$, пропорционального углу отклонения ротора. Успокоительный момент пропорционален активному сопротивлению успокоительной обмотки r_d ; при данном x_d он имеет максимум при $r_d = x_d$. Синхронизирующий момент пропорционален реактивному сопротивлению успокоительной обмотки x_d ; этот момент увеличивает синхронизирующий момент обмотки статора (§ 135). Реактивное сопротивление стержня успокоительной обмотки равно:

$$x_d = 2\pi \omega_k L_d, \quad (177)$$

где L_d —коэффициент самоиндукции, ω_k —угловая частота колебаний. Так как частота колебаний $\omega_k = 2\pi \nu_k$ обычно очень мала (ν_k порядка 1 пер./сек.), то реактивное сопротивление x_d мало и величиной S_d можно пренебрегать.

В машинах с явно выраженными полюсами успокоительная обмотка не симметрична; в этом случае успокоительный момент зависит от угла ψ —угла сдвига фаз между током и э. д. с. в обмотке статора, так как на этот угол сдвинута амплитуда индукции потока статора от оси полюсов. Для подсчета D и S_d в этом случае надо разложить индукцию B_d на продольную и поперечную составляющие и вычислять вращающий момент для каждой составляющей отдельно.¹⁾

В формулы для x_d , D и S_d (175—177) входит частота колебаний ω_k , которая теоретически зависит от величин D и S_d (§ 135). Практически, однако, этим можно пренебречь и подставлять в формулы для x_d , D и S_d значения ω_k , вычисленные в предположении отсутствия успокоительной обмотки (§ 134).

Часто успокоительный момент выражают через скольжение ротора. Обозначим синхронную скорость ротора через Ω_N ; эта величина, очевидно, представляет в то же время скорость магнитного потока статора. Пусть ротор имеет скорость Ω , не равную синхронной. Тогда скольжение равно:

$$s = \frac{\Omega - \Omega_N}{\Omega_N} = \frac{\omega - \omega_N}{\omega_N},$$

¹⁾ M. Liwschitz. Das Drehmoment und die Gesichtspunkte für den Entwurf der Dämpferwicklung einer Mehrphasen-Synchronmaschine im Parallelbetrieb. A. f. E. 1921, т. 10, стр. 96; кроме того, литература по успокоительным обмоткам: 1) P. Boucherot. Amortissement et amortisseurs des alternateurs. Lum. él. ноябрь, 1913, стр. 166, 199 и 230; 2) A. Blondel. Application de la méthode des deux réactions à l'étude des phénomènes oscillatoires des alternateurs accouplés. R. G. E. февраль—март 1923, стр. 235 и след.; 3) В. М. Матюхин. К теории неполной демпферной клетки. Вестн. электротехн. 1930, № 4; 4) A. Mandl. Dämpferwicklung bei Synchronmaschinen mit pulsierendem Antriebsmoment. A. E. G.-Mitt. 1931, стр. 583; 5) В. М. Матюхин. Демпферный момент синхронной машины при параллельной работе с мощной сетью. Э. 1931, стр. 1146; 6) K. Schmidt. Anordnung der Dämpferstäbe bei elektrischen Maschinen. E. T. Z., 1915, стр. 187.

где $\omega_N = p\Omega_N$ и $\omega = p\Omega$ — угловые скорости, выраженные в эл. радианах/сек. По уравнению 188 (§ 119)

$$\frac{d\alpha}{dt} = p(\Omega - \Omega_N) = ps\Omega_N = s\omega_N$$

Пренебрегая синхронизирующим моментом успокоительной обмотки S_d , получаем

$$M_D = D \frac{d\alpha}{dt} = D\omega_N s.$$

Для турбогенераторов можно считать, что при скольжении $s = 3\%$, успокоительная обмотка создает вращающий момент, равный номинальному вращающему моменту машины: ¹⁾

$$M_D' = D\omega_N 0,03 = M_N = \frac{P_N}{\Omega_N 9,81} = \frac{60 P_N}{2\pi n_N 9,81} \text{ кгм},$$

отсюда

$$D = \frac{60 P_N}{2\pi n_N 9,81 \omega_N 0,03} = 0,1035 \frac{P_N}{n_N}; \quad (178)$$

здесь P_N — номинальная мощность в ваттах, n_N — номинальная скорость вращения ротора в об./мин.; $\omega_N = 2\pi n_N = 314$. Если мощность P_N выражена в кВт, то

$$D = 103,5 \frac{P_N}{n_N}. \quad (178a)$$

При колебаниях скорости ротора з. д. с., индуктированная в обмотке статора, также испытывает пульсации. Это явление аналогично появлению добавочного успокоительного момента; величина его большею частью незначительна, хотя при малом значении момента, создаваемого успокоительной обмоткой, он может достигать таких же значений как и последний. ²⁾

Успокоительный момент, создаваемый обмоткой возбуждения, вследствие высокого реактивного сопротивления последней, очень мал. Также мал и момент, создаваемый токами Фуко в полюсных наконечниках.

116. Мощность и вращающий момент, идущие на сообщение ротору ускорения.

Эта мощность аккумулируется в виде кинетической энергии вращающихся частей или, как их иногда называют, инерционных, или маховых масс. Кинетическая энергия маховых масс равна $\frac{1}{2} J \Omega^2$, где J — момент инерции вращающихся частей, Ω — угловая скорость. Величина J представляет сумму: 1) момента инерции ротора машины, 2) момента инерции вращающихся частей первичного двигателя, 3) момента инерции прочих вращающихся частей (муфт, шкивов и пр.). Поскольку по своей величине главную роль играет обычно первое слагаемое, в дальнейшем будем сокращенно называть J моментом инерции ротора, помня, однако, что он учитывает и моменты инерции остальных вращающихся частей.

Мощность равна производной от энергии по времени:

$$P_J = \frac{d\left(\frac{1}{2} J \Omega^2\right)}{dt} = J \Omega \frac{d\Omega}{dt}. \quad (179)$$

¹⁾ H. Rengier. Grobsynchronisierung leerlaufender Turbogeneratoren. A. E. G.-Mitt. 1931, стр. 426.

²⁾ A. Mauduit. Machines électriques, т. II. Paris, 1931.

Момент инерции выражают обычно в $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (§ 218); так как Ω выражается в $1/\text{сек.}$, а $\frac{d\Omega}{dt}$ — в $1/\text{сек.}^2$, то мощность по формуле (179) получается выраженной в $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{сек.}$ Для перевода в kW выражение необходимо разделить на $102 = 10^3/9,81$.

Вращающий момент равен:

$$M_J = \frac{P_J}{\Omega} = J \frac{d\Omega}{dt} \text{ кг} \cdot \text{м}; \quad (180)$$

здесь $\frac{d\Omega}{dt}$ — ускорение ротора. Поскольку величина J постоянна, вращающий момент M_J представляет собою функцию только ускорения ротора.

117. Мощность первичного двигателя.

Под мощностью первичного двигателя везде будем подразумевать не мгновенную мощность, а среднюю мощность за один оборот ротора.

Величина мощности, получаемой от первичного двигателя, управляется регулятором. Так как обычно применяют регуляторы, работающие на принципе изменения скорости (так называемые регуляторы скорости, § 145), то величина мощности, развиваемой первичным двигателем, представляет собою функцию угловой скорости Ω :

$$P_d = f(\Omega).$$

Практически с большой точностью зависимость $P_d = f(\Omega)$ можно принять за прямую (рис. 176). Изменение скорости $\Omega_0 \rightarrow \Omega_N$ при изменении нагрузки от нуля до номинальной, отнесенное к номинальной скорости Ω_N , называется коэффициентом неравномерности регулятора:

$$\delta_r = \frac{\Omega_0 - \Omega_N}{\Omega_N} = \frac{n_0 - n_N}{n_N}; \quad (181)$$

здесь $n = \frac{60\Omega}{2\pi}$ — число оборотов в минуту ротора. Для получения аналитической зависимости мощности первичного двигателя от скорости разложим функцию $P_d = f(\Omega)$ в ряд Тейлора:

$$P_d = f(\Omega_1) + (\Omega - \Omega_1)f'(\Omega_1) + (\Omega - \Omega_1)^2 f''(\Omega_1) + \dots,$$

здесь Ω_1 — определенная постоянная скорость при некотором положении регулятора, для которого мы рассматриваем работу машины; Ω — любая другая скорость (переменная); $f(\Omega_1)$ — частное значение функции при скорости, равной Ω_1 ; $f'(\Omega_1)$, $f''(\Omega_1)$ — значение первой, второй и т. д. производной от мощности по скорости при данном частном значении скорости Ω_1 . Если характеристика регулятора прямая линия, то

$$f'(\Omega_1) = -\frac{P_N}{\delta_r \Omega_N}; \quad (182)$$

все производные со второго порядка и выше равны нулю.

Обозначая $f(\Omega_1)$ через P_1 , получаем:

$$P_d = P_1 - \frac{P_N}{\delta_r \Omega_N} (\Omega - \Omega_1) \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{сек.} \quad (183)$$

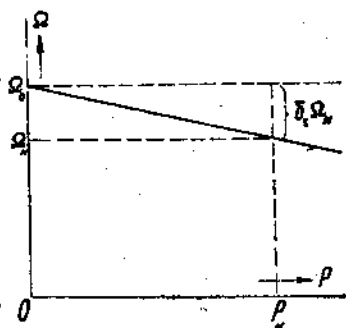


Рис. 176. Зависимость мощности первичного двигателя от скорости вращения.

Второй член правой части представляет собою изменение мощности, обусловленное действием регулятора скорости. Как указано ниже (§ 145), обычно применяемые регуляторы скорости начинают действовать только тогда, когда изменение скорости становится больше некоторого предела, обусловленного нечувствительностью механизма регулятора; при этом изменение мощности, вызванное действием регулятора, наступает не мгновенно, а по истечении некоторого времени, называемого временем замедления действия регулятора. Поэтому величина $\frac{P_N}{\Omega_N} (\Omega - \Omega_1)$ может быть введена в уравнение только в том случае, если изменение скорости больше предела нечувствительности и если время, прошедшее после изменения скорости, больше времени замедления. Так как рассматривать режим работы в целом очень сложно, то предварительно будем рассматривать только такие режимы работы, при которых регулятор скорости не действует; очевидно, изменение скорости при этом меньше предела нечувствительности регулятора; под значениями Ω_1 , Ω_2 , Ω_N и т. д. будем всегда подразумевать среднюю скорость вращения за один оборот, соответствующую данному положению регулятора скорости; знаком Ω (без индекса) будем обозначать мгновенное (переменное) значение угловой скорости вращения ротора. Мгновенная мощность первичного двигателя при этом может изменяться, но средняя мощность за один оборот ротора остается постоянной:

$$P_d = P_1 = \text{const.} \quad (184)$$

Влияние регулятора скорости на параллельную работу синхронных машин рассмотрено в §§ 145—147.

118. Вращающий момент первичного двигателя.

Рассматривая только такие режимы работы, при которых регулятор скорости не действует (§ 117), получаем среднее значение вращающего момента первичного двигателя за один оборот ротора:

$$M_0 = \frac{P_d}{\Omega_1} = \text{const}; \quad (185)$$

здесь Ω_1 — средняя угловая скорость ротора при данном положении регулятора скорости.

Паровые и гидравлические турбины имеют равномерный вращающий момент, не изменяющийся в течение одного оборота; мгновенное значение момента у них, следовательно, постоянно. Поршневые машины (паровые машины, газовые двигатели, двигатели Дизеля), имеют неравномерный вращающий момент, мгновенное значение которого периодически изменяется. Так, например, для газового двигателя тандем вращающий момент в течение одного оборота изменяется по кривой рис. 177. При аналитическом изучении неравномерный вращающий момент поршневых двигателей раскладывают в ряд Фурье. При этом получается постоянный (средний) момент и ряд гармоник, имеющих разной величины амплитуды в зависимости от рода двигателя. Максимальная (по амплитуде)

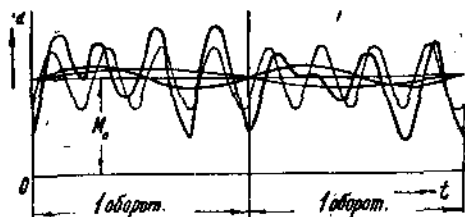


Рис. 177. Изменение вращающего момента в течение двух оборотов четырехтактного газового двигателя тандем двойного действия.

гармоника имеет частоту, соответствующую числу впусков рабочего вещества за один оборот. В машинах двойного действия вследствие неодинаковой работы с каждой стороны цилиндра появляется гармоника, частота которой в два раза меньше предыдущей. В многоцилиндровых машинах работа разных цилиндров обычно неодинакова, причем разница в работе цилиндров доходит до $\pm 8\%$ от теоретической. Это также вызывает соответствующую гармонику.

Таблица VII.

Порядок максимальной гармоник вращающего момента.

Паровые машины.

Одноцилиндровые и двойного расширения тандем	2
Двойного расширения с кривошипами под углом в 30°	4
Тройного расширения с кривошипами под углом в 120°	6

Газовые двигатели.

Одноцилиндровые четырехтактные	1/2
Двухцилиндровые четырехтактные	1
Одноцилиндровые двухтактные	1

Величина амплитуд разных гармоник также зависит от типа двигателя; обычно она тем меньше, чем больше число цилиндров двигателя. Для некоторых газовых двигателей амплитуды отдельных гармоник в процентах от среднего момента M_0 равны:

Порядок гармонии	$\frac{1}{2}$	1	2	4
Четырехтактные тандем простого действия	$5 \div 14$	20	75	—
двойного	$6 \div 10$	15	—	$35 \div 40$

Обозначая амплитуды отдельных гармоник через h с соответствующими индексами, указывающими порядок гармоники, получим следующую формулу для вращающего момента поршневого двигателя:

$$M_d = M_0 + \sum h_i \cos(x \Omega_i t - \gamma_i); \quad (186)$$

здесь M_0 — средний постоянный момент, x — порядок гармоники, Ω_1 — средняя угловая скорость вращения ротора: $\Omega_1 = 2\pi n/60$; γ_x — углы сдвига фаз гармоник друг относительно друга.

Вращающий момент первичного двигателя выражают обычно в кгм.

119. Уравнение движения ротора синхронной машины.

Выше (§ 111) было получено уравнение:

$$M_d = M_u + M_p + M_I + M_o. \quad (131a)$$

Подставляя в него выражения отдельных вращающих моментов (§§ 113—118), получаем

$$M_0 + \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x) = J \frac{d\Omega}{dt} + M_{\psi 1} + D \frac{da}{dt} + Sa + M_Q.$$

Перейдем к одной переменной, а именно к углу $\alpha = \theta - \theta_1$ (§ 113), выраженному в эл. радианах. Если ротор вращается с равномерной скоростью, то угол θ_1 между осью полюсов и осью результирующего потока

машины (§ 66) остается постоянным. Если ротор замедляется или ускоряется, этот угол изменяется и становится равным θ . Приращение угла θ_1 было обозначено через $\alpha = \theta - \theta_1$. Таким образом, α есть угол отклонения ротора от положения, которое он занимал бы в данный момент при равномерной скорости. Обозначая равномерную скорость при данном режиме через Ω_1 , а новую, изменившуюся скорость — через Ω , получаем

$$\alpha = p \int (\Omega - \Omega_1) dt = p \int \Omega dt - p \Omega_1 t. \quad (187)$$

Скорость и ускорение приращения угла α равны:

$$\frac{d\alpha}{dt} = p(\Omega - \Omega_1); \quad \frac{d^2\alpha}{dt^2} = p \frac{d\Omega}{dt}. \quad (188)$$

Следовательно, уравнение движения ротора можно написать в виде:

$$M_0 + \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x) = M_{\psi_1} + \frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S\alpha + M_Q. \quad (189)$$

Если скорость ротора равномерна ($\Omega = \Omega_1 = \text{const}$), то приращение угла α и все его производные равны 0. Соответствующий режим будем называть стационарным. При стационарном режиме

$$M_d = M_Q = M_{\psi_1} + M_Q = \text{const}. \quad (190)$$

Если $\alpha \neq 0$, то режим будет колебательный. При этом, если $M_d = M_0 = M_{\psi_1} + M_Q = \text{const}$, то ротор совершает так называемые свободные колебания, уравнение которых

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S\alpha = 0. \quad (191)$$

Если $M_d = M_0 + \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x) \neq \text{const}$, то ротор имеет так называемые вынужденные колебания, уравнение которых

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S\alpha = \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x); \quad (192)$$

в этом уравнении M_{ψ_1} , M_Q и M_0 исчезают, так как $M_0 = M_{\psi_1} + M_Q$.

В настоящей главе будем рассматривать только стационарные режимы работы синхронных машин. Колебательные режимы рассмотрены в главе IX.

120. Работа синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности.

При изучении параллельной работы синхронных машин рассматривают два возможных случая: 1) работа машины параллельно с сетью бесконечно большой мощности, 2) работа машины параллельно с другими машинами, сравнимыми по мощности с рассматриваемой. Сетью бесконечно большой мощности называем такую сеть, напряжение U_c и частота ν_c которой остаются все время строго постоянными. Напряжение на зажимах генератора, приключенного к этой сети, равно по величине напряжению сети ($U = U_c = \text{const}$), а по направлению сдвинуто на 180° . Случай работы машины на сеть бесконечно большой мощности является чисто теоретическим, однако, практически при работе небольшой машины на мощную сеть можно считать $U = U_c = \text{const}$, $\nu_c = \text{const}$. Поскольку при такой работе влияние различных факторов проявляется в чистом, не искаженном побочными

причинами, виде, изучение параллельной работы лучше всего вести в таком теоретическом случае; это сделано в §§ 121 — 123.

Параллельная работа нескольких машин, сравнимых по мощности, встречается во всех практических случаях параллельной работы синхронных машин. В этом случае напряжение и частота сети не остаются постоянными, что вносит ряд дополнительных обстоятельств (см. § 124).

121. Зависимость электромагнитной мощности синхронной машины от угла θ .

При работе машины на сеть бесконечно большой мощности напряжение сети U_c (а следовательно, и напряжение генератора $U = U_c$) остается постоянным; частота сети γ_c также остается постоянной; следовательно, изменение U_c во времени происходит с постоянной (равномерной) скоростью. В векторной диаграмме напряжение будет представлено вектором, имеющим постоянную величину и вращающимся с постоянной скоростью. Изменение э. д. с. машины во времени зависит от скорости ротора, так как э. д. с. отстает на 90° от основного потока полюсов, а последний совпадает с осью полюсов и, следовательно, изменяется со скоростью, соответствующей скорости ротора. В векторной диаграмме э. д. с. изображается вектором, вращающимся со скоростью, равной скорости ротора, выраженной в электрических градусах в секунду. В § 113 было выведено для электромагнитной мощности выражение:

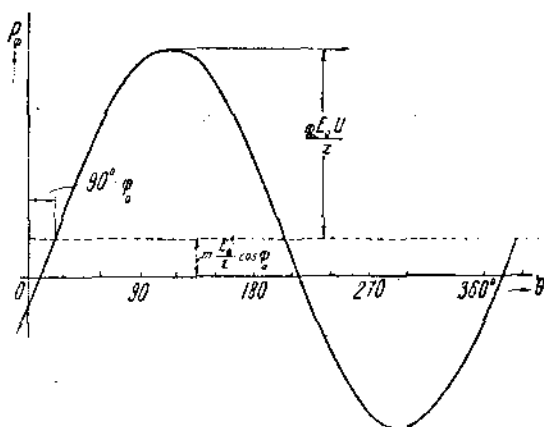


Рис. 178. Зависимость электромагнитной мощности от угла θ .

$$P_\phi = \frac{mE_Q}{z} [E_Q \cos \psi_a - U \cos (\psi_a + \theta)]; \quad (155a)$$

здесь θ — угол между осью полюсов и осью результирующего потока (§ 113); следовательно, он равен углу между э. д. с. E_Q и напряжением на зажимах U . Так как вектор U в векторной диаграмме вращается с равномерной скоростью, а скорость вектора E_Q зависит от скорости ротора, угол θ с изменением последней также изменяется; на основании уравнения (155) это приводит к изменению мощности P_ϕ . Так как z и $\psi_a = \arctg \frac{x}{r}$ — величины постоянные, то при постоянных напряжении U и э. д. с. E_Q (а следовательно, при постоянной силе тока возбуждения) мощность зависит только от угла θ .

Так как угол ψ_a близок к 90° , то зависимость P_ϕ от θ при $E_Q = \text{const}$ и $U = \text{const}$ получается близкой к синусоиде (рис. 178); если положить $\psi_a = 90^\circ$, получаем (рис. 179)

$$P_\phi = \frac{mE_Q U}{x} \sin \theta; \quad (193)$$

здесь x — синхронное реактивное сопротивление (при $\psi_a = 90^\circ$ имеем $r = 0$).

Мощность растет при изменении θ от 0 до 90° и при последнем значении θ имеет максимум. При дальнейшем увеличении θ мощность начинает уменьшаться. Часть кривой мощности на участке $0 < \theta < 90^\circ$ устойчива; при случайном увеличении угла θ мощность, развиваемая машиной, увеличивается; так как мощность первичного двигателя остается постоянной,

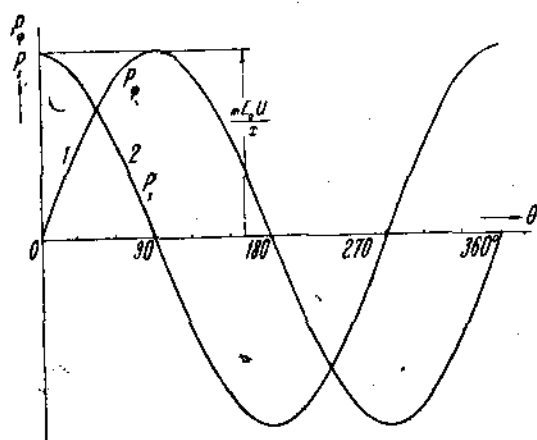


Рис. 179. Зависимость электромагнитной мощности $P_{\text{э}}$ и синхронизирующей силы P_s от угла θ в пренебрежении активным сопротивлением статора.

что приводит к дальнейшему уменьшению мощности и т. д., пока машина не сбросит всю нагрузку. При значениях θ , лежащих в пределах от 180° до 360° , мощность становится отрицательной; эта область кривой относится к работе машины синхронным двигателем (§ 152).

Устойчивость параллельной работы синхронной машины при $0 < \theta < 90^\circ$ поддерживается приращением мощности P_s ($\theta - \theta_1$), обусловленным приращением угла θ . Величина P_s ($\theta - \theta_1$) называется синхронизирующей мощностью (§ 113). Приращение мощности, соответствующее бесконечно малому приращению угла θ , называется синхронизирующей силой (§ 113

$$P_s = \frac{dP_{\text{э}}}{d\theta} = \frac{mE_Q U}{z} \sin(\psi_a + \theta) \cong \frac{mE_Q U}{x} \cos \theta. \quad (194)$$

Кривая синхронизирующей силы в функции от угла θ построена на рис. 179 (кривая 2). Максимальное значение P_s имеет при нагрузках, близких к холостому ходу. Для устойчивой части кривой мощности синхронизирующая сила положительна; для неустойчивой части — отрицательна. Синхронизирующая сила представляет собою силу, препятствующую выпадению машины из синхронизма. Если при постоянной мощности первичного двигателя какая-либо из машин получает тенденцию к изменению своей скорости, т. е. к изменению угла θ , возникающая синхронизирующая мощность P_s ($\theta - \theta_1$) заставляет машину вернуться к прежнему значению угла θ . Синхронизирующая сила удерживает машину в синхронизме пока P_s положительно, т. е. пока $\theta < 90^\circ$ (рис. 179).

122. Влияние изменения возбуждения на параллельную работу синхронной машины.

Пусть напряжение сети равно U_c ; напряжение генератора U равно по величине U_c и сдвинуто от него по фазе на 180° (рис. 180). Ток генератора равен I_1 , угол сдвига фаз между I_1 и U обусловлен характером на-

грузки и равен φ_1 . Пренебрежем для простоты активным сопротивлением генератора; тогда $\psi_a = 90^\circ$ и электромагнитная мощность равна:

$$P_\psi = \frac{mE_Q U}{x} \sin \theta. \quad (193a)$$

Из прямоугольного треугольника OBC (рис. 180) следует, что

$$E_Q \sin \theta = \overline{BC},$$

следовательно:

$$P_\psi = \frac{mU}{x} \overline{BC}.$$

Таким образом, если напряжение сети $U_c = U = \text{const}$, электромагнитная мощность генератора пропорциональна перпендикуляру, опущенному из конца вектора E_Q на направление вектора U .

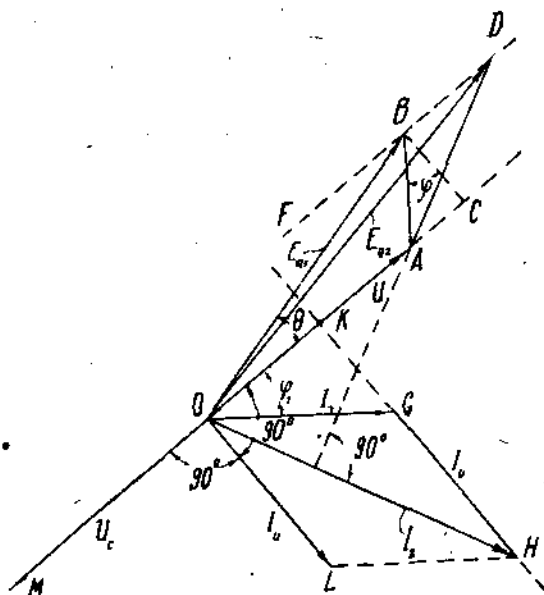


Рис. 180. Диаграмма напряжений при разных значениях тока возбуждения.

Не трудно убедиться, что в пренебрежении активным сопротивлением статора r электромагнитная мощность P_ψ равна отдаваемой электрической мощности генератора $P = mUI_1 \cos \varphi_1$. Угол ABC равен φ_1 , так как стороны треугольника ABC перпендикулярны сторонам треугольника OKG ; следовательно:

$$\overline{BC} = \overline{BA} \cos \varphi_1 = I_1 x \cos \varphi_1,$$

отсюда

$$P = mUI_1 \cos \varphi_1 = mU \frac{\overline{BC}}{x} = P_\psi.$$

Рассмотрим, как изменяется режим работы генератора при изменении тока возбуждения (а следовательно, при изменении E_Q), если при этом напряжение сети U_c и электромагнитная мощность генератора P_ψ остаются постоянными. При некотором увеличении возбуждения э. д. с. E_Q

увеличивается от E_{Q1} до E_{Q2} ; так как P_ϕ остается постоянной, конец вектора $E_{Q2} = \overline{OD}$ должен лежать на линии FD , отстоящей от вектора U на расстояние $\overline{BC} \equiv P_\phi$. Новое значение синхронного падения напряжения $I_2 x$ теперь равно вектору $\overline{DA}$; чтобы найти новое значение тока I_2 , проводим из O линию, перпендикулярную к $I_2 x$ и откладываем на ней отрезок $\overline{OH} = I_2 x / x = I_2$. Из диаграммы видно, что при увеличении возбуждения машины при постоянной мощности добавочный ток, проходящий через машину, $I_u = I_2 - I_1 = \overline{GH}$ является чисто реактивным.

Действительно, стороны $\overline{OG}$ и $\overline{OH}$ треугольника OCH перпендикулярны сторонам $\overline{BA}$ и $\overline{DA}$ треугольника BAD и пропорциональны им; поэтому сторона $\overline{GH} = I_u$ пропорциональна по величине и перпендикулярна стороне $\overline{BD}$, а следовательно, перпендикулярна к вектору U . Возникновение добавочного тока I_u обусловлено возникновением разности э. д. с. $\Delta E = E_{Q1} - E_{Q2}$; так как этот ток замыкается только по статорам работающих параллельно машин, а сопротивление их индуктивное, то добавочный ток и оказывается реактивным. Вследствие того, что мощность $P_\phi = P$ постоянна, активная составляющая тока $I_A = I \cos \varphi = \overline{OK}$ при постоянном напряжении на зажимах U должна быть постоянна. Следовательно, проекция тока I на вектор U , равная активному току I_A , дол-

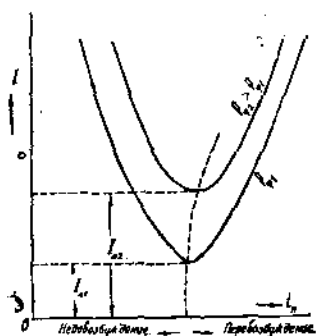


Рис. 181. U-образные кривые синхронного генератора при разных значениях мощности P_ϕ .

жна быть постоянна; поэтому конец вектора тока I движется по прямой KH , перпендикулярной вектору напряжения U . По отношению к напряжению машины U ток I_u отстающий; по отношению к напряжению сети U_c , которое равно и противоположно напряжению машины (§ 110), этот же ток опережающий (рис. 180). Добавочный ток I_u создает размагничивающий — продольный поток реакции якоря в генераторе. Поэтому увеличение основного потока полюсов, вызванное увеличением тока возбуждения, компенсируется размагничивающим действием добавочного тока I_u , и напряжение на зажимах машины остается равным прежнему значению. Аналогичным образом можно убедиться, что при уменьшении возбуждения (а следовательно, и э. д. с. E_Q) через

машину пройдет добавочный реактивный ток, опережающий по отношению к напряжению машины и отстающий по отношению к напряжению сети. Этот ток создает намагничивающий продольный поток реакции якоря, что компенсирует уменьшение основного потока полюсов.

Строя такие диаграммы, можно сделать следующие выводы: 1) если э. д. с. E_Q близка по величине к напряжению сети U_c , то по машине проходит только активный ток; 2) при увеличении возбуждения ток, проходящий по машине, увеличивается и становится отстающим по отношению к напряжению машины и опережающим по отношению к напряжению сети; 3) при уменьшении возбуждения ток тоже увеличивается, но теперь он опережает напряжение машины и отстает от напряжения сети.

Изображая в функции от тока возбуждения ток статора, получим кривую, изображенную на рис. 181, так называемую U-образную кривую, или кривую Mordey'я. При разных значениях электромагнитной

мощности P_ψ (при разных нагрузках) активные составляющие тока различны, соответственно чему получаем разные кривые. Минимум кривой тока соответствует чисто активному току. При увеличении активного тока реактивное падение напряжения увеличивается, для компенсации чего необходимо увеличение тока возбуждения, чтобы получить то же напряжение на зажимах. Поэтому при увеличении нагрузки минимум кривых тока статора передвигается в сторону больших токов возбуждения.

Очевидно, что с точки зрения уменьшения потерь генератора наилучшим возбуждением является возбуждение, соответствующее минимальному току статора. Однако, для компенсации реактивных токов сети всегда приходится работать при увеличенном возбуждении, посылая в сеть ток, опережающий напряжение сети (§ 158). Увеличение возбуждения оказывается выгодным и с точки зрения увеличения устойчивости параллельной работы, так как чем больше E_Q , тем больше синхронизирующая мощность (§ 121).

Если не пренебрегать активным сопротивлением обмотки статора, диаграмма работы получается более сложной.¹⁾

123. Работа синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности при постоянном возбуждении и переменной электромагнитной мощности.

Для увеличения отдаваемой машиной мощности требуется соответствующее увеличение мощности первичного двигателя, что достигается действием регулятора на впускные клапаны первичного двигателя. Обычно регуляторы работают на принципе изменения скорости: для того чтобы регулятор увеличил или уменьшил открытие впускных клапанов, требуется предварительное уменьшение или увеличение скорости вращения. Поэтому, если напряжение сети неизменно, увеличением возбуждения синхронной машины нельзя добиться увеличения отдаваемой машиной мощности, так как при изменении возбуждения скорость вращения машины не изменяется; единственным результатом изменения возбуждения является появление реактивного тока, не влияющего на мощность (§ 122).

Для того чтобы изменить мощность, отдаваемую машиной, необходимо воздействовать непосредственно на регулятор скорости. Если увеличить открытие впускных клапанов, мощность первичного двигателя становится больше, чем электромагнитная мощность P_ψ , и машина ускоряется. Так как напряжение и частота сети отстаются неизменными, то угол θ между

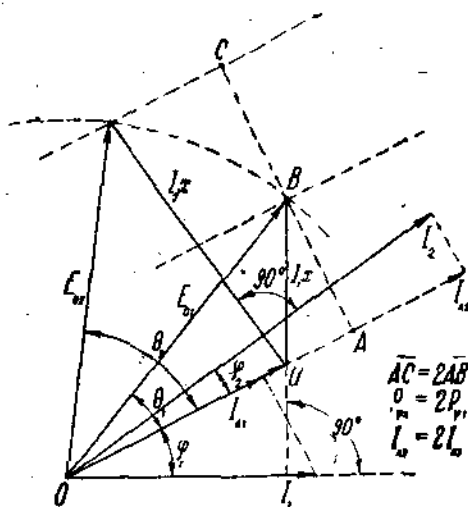


Рис. 182. Диаграмма напряжений при разных значениях мощности.

¹⁾ См. В. А. Толвицкий. Синхронные машины. Петроград, 1923.

э. д. с. генератора E_0 и напряжением U увеличивается. Вследствие этого мощность P_0 растет; когда она станет равна увеличившейся мощности первичного двигателя, то ускорение ротора и увеличение угла θ прекращается и генератор продолжает работать с прежней скоростью, но с увеличенной мощностью (с большим значением угла θ). Соответствующая диаграмма работы изображена на рис. 182. Для уменьшения нагрузки генератора необходимо уменьшить предварительно открытие впускных клапанов. Чтобы перевести нагрузку с одного генератора на другой при постоянных напряжении и частоте сети, необходимо у одного генератора уменьшать скорость, у другого — увеличивать.

Практически, при изменении возбуждения одного из генераторов, напряжение сети не остается постоянным, вследствие чего распределение мощности между генераторами может измениться.

Все сказанное выше относится к перераспределению мощностей между генераторами при постоянной нагрузке сети. При изменении нагрузки сети изменение мощности генераторов происходит автоматически. Так, при увеличении нагрузки сети мощность, приходящаяся на каждый генератор, увеличивается и становится больше мощности первичного двигателя. В результате генераторы начинают уменьшать свою скорость, частота сети уменьшается. Регуляторы скорости первичных двигателей отзываются на это изменение и увеличивают открытие клапанов; мощность первичных двигателей увеличивается и приходит в соответствие с мощностью сети.

Если активным сопротивлением генератора не пренебрегать, то диаграмма работы (рис. 182) получается более сложной.¹⁾

124. Параллельная работа нескольких синхронных машин, сравнимых по мощности.

Параллельная работа синхронной машины на мощную сеть, т. е. на сеть, имеющую неизменное напряжение и частоту, практически встречается редко, — только в случае приключения машины малой мощности к очень крупной системе. Практически генераторы, подключенные к системе, отличаются друг от друга по мощности не очень сильно. Поэтому изменение режима одной машины вызывает изменение напряжения или частоты системы, что, в свою очередь, отражается на режиме всех остальных машин. Построение диаграмм напряжения отдельных машин при неодинаковых возбуждениях или мощностях и нахождение их токов в этом случае довольно сложно и требует очень большого количества времени, если идти аналитическим путем. Более быстрый результат можно получить при пользовании расчетным столом. Так как подобные расчеты и построение диаграмм по существу к теории синхронных машин не относятся, останавливаться здесь на них не будем; необходимость в таких расчетах встречается при проектировании сложных электрических систем.

125. Включение однофазных синхронных машин на параллельную работу.

В § 110 уже рассмотрены условия, необходимые для параллельного включения синхронных машин. Эти условия следующие: 1) равенство напряжения (э. д. с.) машины и напряжения сети по величине; 2) сдвиг фазы между э. д. с. машины и напряжением сети в 180° ; 3) равенство частот машины и сети.

¹⁾ См. В. А. Толвинский. Синхронные машины. Петроград, 1923.

Для проверки равенства напряжений по величине достаточно вольтметра, включаемого на зажимы машины и на шины сети. Фазы напряжений машины и сети изменяются непрерывно и, при наложении частот, неодинаково. Поэтому для проверки перед включением соблюдения второго и третьего из указанных выше условий необходимы специальные синхронизационные приборы. Простейшим прибором являются так называемые фазовые лампы.

На рис. 183 приведены две возможных схемы включения фазовых ламп и вольтметра. При первом способе включения (рис. 183, а) фазовые

лампы приключены каждая к тем зажимам рубильника, которые должны быть соединены вместе. Установив номинальную скорость вращения генератора, устанавливают равенство напряжения сети и машины путем регулирования тока возбуждения; равенство проверяют, переключая вольтметр на машину и на шины сети. Если напряжения машины и сети сдвинуты на 180° , то в цепи, образуемой сетью,

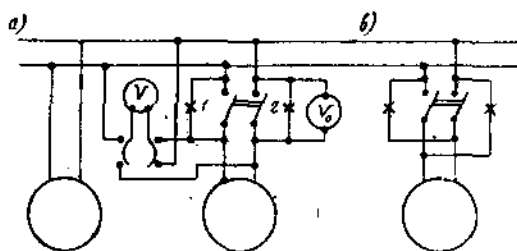


Рис. 183. Включение фазовых ламп на потухание (а) и на горение (б).

лампой 1, обмоткой статора машины, лампой 2, сумма э. д. с. равна нулю; следовательно, через лампы ток не проходит и они гореть не будут. При строгом равенстве частот сети и генератора сдвиг фаз в 180° будет оставаться неизменным. Практически такое равенство частот установить трудно, поэтому сдвиг фаз между напряжениями будет изменяться. В цепи, образуемой сетью, машиной и лампами, будет действовать суммарное напряжение, представляющее собою наложение двух синусоидально изменяющихся напряжений разной частоты (рис. 184). При сдвиге амплитуд обеих синусоид на 180° суммарное напряжение равно нулю (точка а); по мере уменьшения

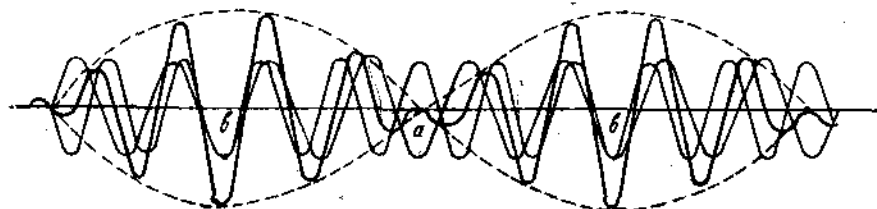


Рис. 184. Изменение напряжения на фазовых лампах в случае несовпадения частот включаемых параллельно генераторов.

сдвига фаз суммарное напряжение увеличивается и при сдвиге фаз, равном нулю (точка б), становится равным двойному напряжению сети. Получаются так называемые биения колебаний. Соответственно изменению суммарного напряжения через лампы будет проходить ток, и лампы будут загораться и потухать с частотой биений. Чем ближе частоты машины друг к другу, тем меньше частота биений. Включение машины в сеть, очевидно, следует производить в тот момент времени, когда лампы тухнут. Так как лампы потухают при напряжении, равном, примерно $\frac{1}{3}$ номинального для лампы, то промежуток времени, в течение которого они остаются темными, при близких частотах продолжителен. Включение надо производить в середине этого промежутка времени. Для лучшего суждения о времени включения можно параллельно лампам приключить

вольтметр V_0 , называемый в этом случае нулевым. Очевидно, при сдвиге фаз на 180° он покажет нуль. Однако, особой точности в сдвиге напряжений на 180° в момент включения не требуется, так как вследствие синхронизирующей силы машина после включения автоматически устанавливается в правильное положение по фазе.

При втором способе включения (рис. 183, б) лампы приключаются к зажимам рубильника крест накрест. В этом случае также получается картина биений, однако, включать машину надо в тот момент времени, когда лампы горят наиболее ярко.

Первый способ включения фазовых ламп называется включением на потухание, второй — на горение. При обеих схемах включения лампы и нулевой вольтметр можно брать на номинальное напряжение сети, так как двойное напряжение, получающееся в момент совпадения фаз напряжений, делится, примерно, поровну между обеими лампами.

126. Включение трехфазных синхронных машин на параллельную работу.

Условия включения трехфазных машин остаются те же, что и однофазных (§ 125), причем в трехфазных машинах они должны быть удовлетворены одновременно в каждой фазе в отдельности. Для этого порядок следования фаз машины и сети во времени должен быть одинаков.

На рис. 185, а указана схема включения фазовых ламп на потухание, аналогичная схеме включения для однофазных машин (рис. 183, а). Если частоты машины и сети различны, то скорость вращения векторов, фазных напряжений машины и сети неодинакова; поэтому звезды векторов

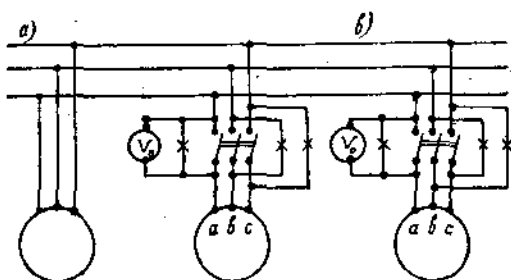


Рис. 185. Включение фазовых ламп для трехфазных машин: на потухание (а) и на вращение огня (б).

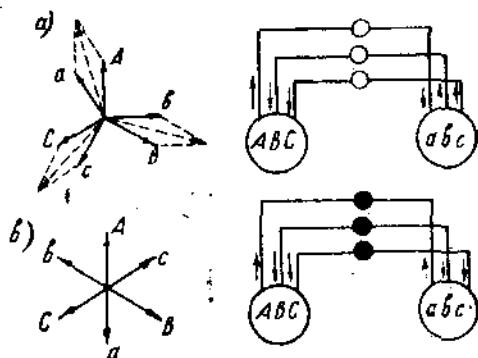


Рис. 186. Звезды напряжений включаемых параллельно машин.

будут перемещаться друг относительно друга (рис. 186). Если звезду векторов напряжений сети A, B, C мыслить неподвижной, то звезда векторов напряжений машины a, b, c будет вращаться относительно первой со скоростью, равной разности частот машины и сети, в ту или другую сторону, в зависимости от того, какая частота больше. Соответственно изменению разности между фазными напряжениями все лампы (рис. 185, а), одновременно будут загораться и потухать. При сдвиге фаз между фазными напряжениями в 180° все лампы потухнут и в этот момент времени следует включать машину (рис. 186, б).

На рис. 185, б изображен второй способ включения фазовых ламп, так называемый способ включения на вращение огня. При этом способе

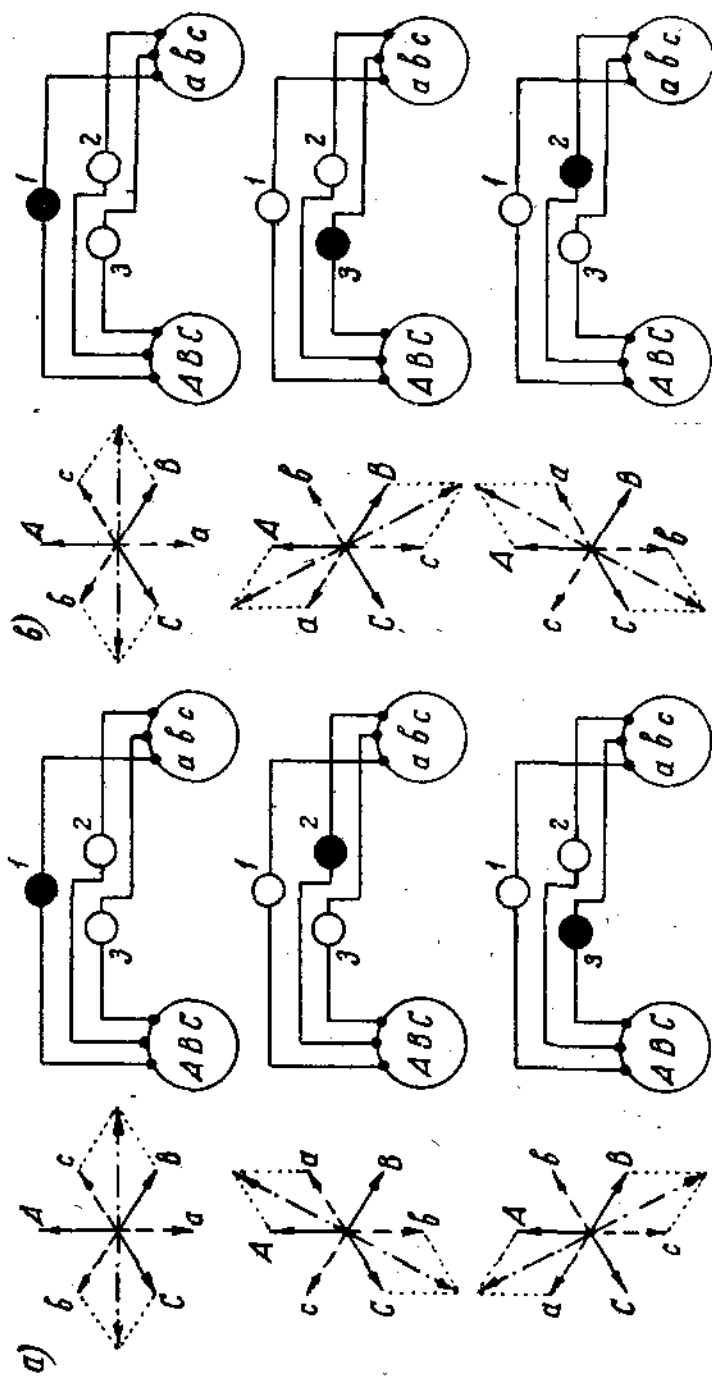


Рис. 187. Векторная диаграмма напряжений для случая включения ламп на вращение огня: а) подключаемая машина abc вращается быстрее машины сети ABC ; б) подключаемая машина вращается медленнее машины сети.

включения к лампам прикладывается напряжение, равное геометрической сумме напряжений U_A и U_a , U_B и U_b , U_C и U_c (рис. 187). Наблюдая за изменением их величины при вращении одной звезды относительно другой (при неравенстве частот машины и сети), не трудно убедиться, что в этом случае лампы будут загораться и потухать не одновременно. Если расположить лампы по кругу в том порядке, как указано на рис. 188, то поочередное загорание и потухание ламп дает картину вращения огня. При частоте генератора большей частоты сети вращение огня будет по часовой стрелке, при обратном соотношении — против. Поэтому, сделав у ламп надписи „быстро“ и „медленно“, можно судить о том, вращается ли машина быстро по отношению к частоте сети или медленно. Включение машины в сеть следует производить в тот момент, когда лампа 1 (рис. 187) тухнет, а лампы 2 и 3 горят одинаково ярко.

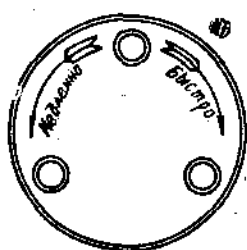


Рис. 188. Расположение фазовых ламп при включении их на вращение огня.

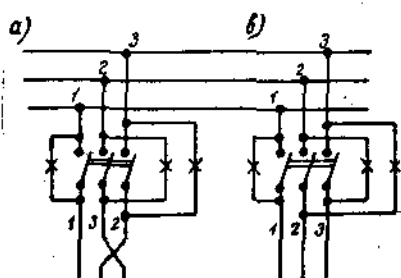


Рис. 189. Включение машин с неодинаковым порядком следования фаз.

При включении на параллельную работу однофазных машин направление вращения генератора не имеет значения. При включении трехфазных машин это оказывает влияние, так как от направления вращения зависит порядок следования фаз. Для правильной работы порядок следования фаз сети и машины должен быть одинаков; последнее также можно проверить фазовыми лампами. Пусть лампы включены на потухание; порядок следования фаз сети 1, 2, 3, а машины 1, 3, 2 (рис. 189,а). Сравнивая этот рисунок с рис. 189,б, видим, что схемы включения ламп одинаковы, следовательно, на рис. 189,а получим вращение огня. Если же лампы включены на вращение огня, то при несоответствии порядка следования фаз получим потухание. Таким образом, если при включении ламп на потухание получим вращение огня или при включении на вращение огня получим потухание, порядок следования фаз машины и сети не одинаков. Для исправления его необходимо поменять местами два любых конца, подходящих к рубильнику от машины (или от сети).

Рассматривая векторы (рис. 187), видим, что максимальное напряжение, которое может быть на лампах (и на нулевом вольтметре, если он применен), при обеих схемах включения равно двойному фазному напряжению.

127. Несинхронное включение на параллельную работу.

При нормальном включении синхронных машин на параллельную работу разность частот не должна превосходить 0,2%, а отклонение сдвига фаз напряжений от 180° не должно быть больше, чем 10°, так как иначе через генераторы пойдет большой уравнивающий ток (§ 194). Это требует

большого количества времени на регулирование; при колеблющейся частоте сети, время, требующееся для синхронизации, может достигнуть 10—15 минут. С целью ускорения процесса синхронизации в последнее время применяют схемы с грубой синхронизацией, когда для включения не требуется сдвига фаз между напряжениями в 180°. Включение в этом случае производят через реакторы, уменьшающие величину толчка тока; момент включения может быть при любом расхождении напряжений. Весь процесс включения занимает 30—40 сек., что является большим преимуществом такой схемы, так как позволяет свести до минимума перемены в подаче тока при аварийном отключении машины. Подробнее о несинхронном включении см. § 144.

128*. Реактивный вращающий момент.

В § 112 была выведена формула для электромагнитного момента синхронной машины

$$M_{\psi} = 3 \frac{p}{\pi} I f_{m1} w 10^{-1} [B_g I_{\max} \cos \psi + B_q I_{\max} \sin \psi] \text{ дин} \times \text{см} \quad (150a)$$

В этой формуле при индуктивной нагрузке

$$B_g = B_n - B_{ag}; \quad B_q = B_{aq},$$

при емкостной нагрузке

$$B_g = B_n + B_{ag}; \quad B_q = B_{aq};$$

здесь B_n —индукция, обусловленная основным потоком полюсов, B_{ag} и B_{aq} —индукции, обусловленные продольным и поперечным потоками реакции якоря.

$$I_{\max} \cos \psi = \sqrt{2} I_q; \quad I_{\max} \sin \psi = \sqrt{2} I_d,$$

здесь I_q и I_d —поперечный и продольный ток (§ 112). Подставляя эти выражения в формулу (150a) и обозначая для краткости постоянный член выражения через C :

$$C = 3 \sqrt{2} \frac{p}{\pi} I f_{m1} w 10^{-1},$$

получаем (при индуктивной нагрузке)

$$M_{\psi} = C [B_n I_q + B_{aq} I_d - B_{ag} I_q].$$

Таким образом, электромагнитный момент создается как взаимодействием потока полюсов с током статора ($B_n I_q$), так и взаимодействием тока статора с потоком реакции статора ($B_{aq} I_d$ и $B_{ag} I_q$). Последняя часть электромагнитного момента называется реактивным моментом, так как обусловлена потоком реакции. Если реактивный момент не равен нулю, то синхронная машина может создавать вращающий момент и в отсутствии потока полюсов ($B_n = 0$), т. е. без возбуждения. Как увидим ниже, реактивный момент не равен нулю только в машинах с явно выраженными полюсами.

Величина реактивного момента при индуктивной нагрузке равна:

$$M_R = C (B_{aq} I_d - B_{ag} I_q).$$

при емкостной нагрузке

$$M_R = C (B_{ag} I_q - B_{aq} I_d).$$

Заменим индукции через создающие их токи

$$B_{aq} = C_{aq} I_q; \quad B_{ag} = C_{ag} I_d,$$

тогда при индуктивной нагрузке

$$M_R = C [C_{aq} I_q I_d - C_{ag} I_q I_d] = C I_d I_q (C_{aq} - C_{ag});$$

при емкостной нагрузке

$$M_R = C I_d I_q (C_{ag} - C_{aq}).$$

Коэффициенты C_{aq} и C_{ag} пропорциональны поперечному и продольному реактивным сопротивлениям (ср. § 92). Если они равны друг другу, то $M_R = 0$; если $C_{aq} \neq C_{ag}$, то $M_R \neq 0$. Очевидно, что в машинах с цилиндрическим ротором всегда имеем $C_{aq} = C_{ag}$, а следовательно, реактивный момент такой машины равен нулю. В машинах с явно выраженными полюсами $C_{aq} \neq C_{ag}$; поэтому машины с явно выраженными полюсами способны создавать реактивный момент. При работе генератора без возбуждения ток в нем опережающий по отношению к напряжению генератора (§ 122); так как обычно $C_{ag} > C_{aq}$, то момент M_R получается положительный, т. е. тормозящий. Аналогично, при работе машины двигателем без возбуждения реактивный момент является двигательным моментом.

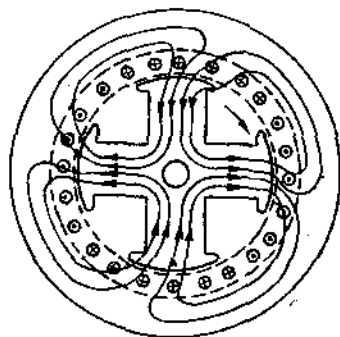


Рис. 190. Реактивный двигатель.

Физически появление реактивного момента обусловлено следующим. При симметричном распределении магнитных линий потока реакции полный момент, создаваемый взаимодействием их с вызвавшим их током статора, равен нулю. Вследствие наличия, благодаря ротору с явно выраженными полюсами, несимметричного магнитного сопротивления поток реакции распределяется несимметрично. Взаимодействие продольного потока с поперечным током получается больше, чем обратного направления взаимодействие поперечного потока с продольным током, поэтому результирующий вращающий

момент не равен нулю. Это явление можно рассматривать как результат стремления магнитных линий сократить свою длину. Магнитные линии всегда проходят по пути, обладающему наименьшим магнитным сопротивлением, поэтому они проходят, главным образом, по оси полюсов ротора (рис. 190). Если ось полюсов отстает от оси потока статора, то магнитные линии, стремясь сократить свою длину, увлекают за собою ротор.

Синхронный двигатель, работающий без возбуждения, т. е. вращающийся только за счет реактивного момента, называется реактивным двигателем. Подробнее о реактивном моменте см. статью Е. А. Тер-Маркарянца.¹⁾

¹⁾ Е. А. Тер-Маркарянц. Теоретическое и экспериментальное исследование синхронного реактивного двигателя. Изв. Лгр. Политехн. института, 1928, т. 31, стр. 121.

ГЛАВА IX.

ЯВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СИНХРОННЫХ МАШИН.

129. Общие замечания.

Совокупность параллельно работающих генераторных станций, передающих и распределительных сетей и приемников электрической энергии называют электрической системой. По пути движения энергии электрическая система состоит из ряда звеньев: 1) питающие систему синхронные генераторы, 2) повысительные подстанции с трансформаторами и аппаратурой, 3) линии передачи, 4) понизительные подстанции с трансформаторами и аппаратурой, 5) распределительные сети, 6) приемники электрической энергии (электродвигатели, электрические печи, осветительная нагрузка). Некоторые из этих звеньев в несложных системах отсутствуют. Пространственно система состоит из отдельных участков, более или менее тесно связанных друг с другом (рис. 191). Величина связи характеризуется не геометрическим удалением участков друг от друга, а величиной реактивного сопротивления, заключенного между ними. Чем больше реактивное сопротивление между двумя точками системы, тем меньше завянут они в электрическом отношении друг от друга.

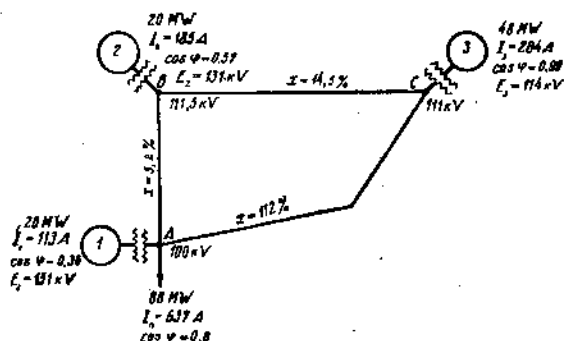


Рис. 191. Схема электрической системы.

Чем сложнее система, т. е. чем больше в ней отдельных участков и звеньев, тем сложнее протекают все процессы, происходящие в системе. С точки зрения работы электрических машин одним из самых важных процессов в системе является колебание мощности между несколькими синхронными машинами, приключенными к одной электрической системе. Этому вопросу посвящена настоящая глава.

При данной конфигурации системы и при заданных э. д. с. генераторов, питающих систему, и нагрузках и сопротивлениях отдельных участков, токораспределение в системе имеет вполне определенное значение. На рис. 191 указаны мощности приемников и генераторов в кВт, их $\cos \phi$, реактивные сопротивления линий в процентах (активными сопротивлениями для простоты пренебрежено), значения токов в амперах в линиях и напряжений в узловых точках в киловольтах. Так как токи и напряжения в отдельных

участках системы отличаются друг от друга по фазе, их следует во времени ориентировать относительно одного основного вектора. Для этого принимают какую-либо точку системы за основную (обычно за нее принимают точку сети, в которой поддерживается постоянное напряжение — шины у потребителей, шины вторичных подстанций и т. п.). Вектор напряжения в выбранной точке в начальный момент времени принимают за основной вектор, постоянный по величине (равный 100%) и вращающийся во времени с синхронной скоростью. На рис. 191 за основную точку принят узел А. Действительный вектор напряжения в основной точке в течение процесса может изменить свою величину и фазу; в таком случае он тоже будет ориентирован относительно основного вектора. Векторы напряжений в других точках системы отличаются от основного вектора как по величине, так и по фазе на величины падений напряжения в линиях, соединяющих рассматриваемые точки с основной, что указано на диаграмме рис. 192, а для рассматриваемой нами системы (рис. 191). На этой же диаграмме приведены векторы э. д. с. генераторов, отличающиеся на величины синхронных падений напряжения от напряжений на зажимах генераторов, и векторы токов в отдельных участках системы, соответственно их сдвигам фаз. При нормальной работе векторы всех э. д. с., напряжений и токов вращаются синхронно; при этом, очевидно, угловые сдвиги фаз всех векторов относительно основного вектора и относительно друг друга остаются постоянными; система находится в равновесии.

Вследствие связи всех участков системы друг с другом изменение режима работы любого из них сопровождается изменением режима работы всех других; количественно эти изменения тем значительнее, чем сильнее связаны участки друг с другом. При изменении режима работы одного из участков системы (например, выключение одной из линий — линии ВС на рис. 191) токораспределение и распределение мощностей в системе изменяются, что вызывает изменение падений напряжения в отдельных линиях системы. Поэтому величины и угловые сдвиги всех векторов относительно основного вектора и относительно друг друга изменяются. Если в дальнейшем эти новые угловые сдвиги между векторами остаются постоянными и векторы продолжают вращаться синхронно, система находится в новом положении равновесия. Для системы, изображенной на рис. 191, новое положение равновесия после выключения линии ВС приведено на рис. 192, б. В действительности, система, питаемая несколькими параллельно работающими синхронными генераторами, приходит в новое положение равновесия только после ряда колебаний, а иногда и совсем не приходит (выпадает из синхронизма). Это происходит потому, что, кроме изменяющихся во времени напряжений и токов, изображаемых нами в виде вращающихся в пространстве векторов, в системе имеются и физические вращающиеся тела, вращение которых связано с воображаемым вращением векторов. Этими физическими телами являются роторы синхронных машин.

Ротор синхронной машины движется под влиянием приложенных к нему вращающих моментов (§ 111). Вращающий момент первичного двигателя не зависит от положения ротора относительно результирующего магнитного потока машины; величина его определяется положением регулятора скорости. Электромагнитный момент синхронной машины, работающей параллельно с другими, зависит от угла между осью результирующего потока¹⁾ и осью полюсов (§ 113); этот угол в то же время представляет собою угол θ в векторной диаграмме между э. д. с. и напряжением на

¹⁾ Здесь под результирующим потоком подразумеваем геометрическую сумму основного потока полюсов, потока реакции и потока рассеяния статора (§ 66).

зажимах генератора. Таким образом, вектор э. д. с. на диаграмме можно в то же время считать и осью полюсов ротора, а вектор напряжения на зажимах — осью результирующего потока. При изменении скорости вращения ротора изменяется и скорость вращения вектора э. д. с. Система только тогда находится в равновесии (т. е. имеет синхронную скорость вращения векторов), когда роторы всех синхронных машин вращаются синхронно. Вследствие зависимости электромагнитного момента от угла θ , при заданной мощности первичного двигателя равномерная скорость ротора синхронной машины (а следовательно, и вектора э. д. с.) возможна только при вполне определенном значении угла θ . Поэтому равновесие системы возможно только при вполне определенных значениях углов θ отдельных генераторов, т. е. при вполне определенном распределении их мощностей. При изменении режима работы системы (например, при выключении линии BC , рис. 191) токораспределение в ней, а следовательно, и величина и фаза векторов напряжения в узлах и на зажимах генераторов изменяются. Положение векторов э. д. с. зависит от положения роторов; так как последние в первый момент изменения

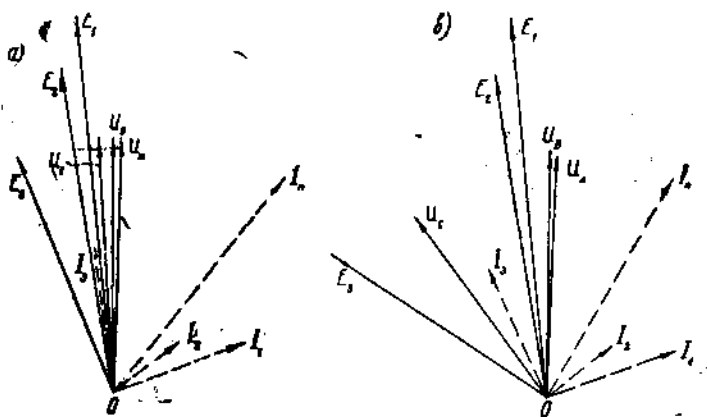


Рис. 192. Векторная диаграмма напряжений, э. д. с. и токов для системы на рис. 191: до изменения режима (а) и после отключения линии BC (б).

режима продолжают вращаться синхронно, то векторы э. д. с. в первый момент сохраняют свое положение. Вследствие этого углы θ между векторами напряжений и э. д. с. у генераторов изменятся. Это вызовет изменение электромагнитной мощности генераторов: у одних она уменьшится, у других увеличится по сравнению с первоначальной; мощности же первичных двигателей в первый момент сохраняют свои прежние значения. Равновесие между электромагнитными моментами и моментами вращения первичных двигателей нарушается, и роторы синхронных машин начинают двигаться несинхронно: у одних машин — с ускорением, у других — с замедлением. Относительное положение векторов э. д. с. изменится, что вызовет дальнейшее изменение токораспределения. Система приходит в колебание.

Если по прошествии некоторого времени колебания прекращаются и роторы синхронных машин снова начинают вращаться синхронно (при новых значениях углов θ), то система приходит в равновесие — остается в синхронизме. Если же роторы машин начинают вращаться несинхронно (с разной скоростью), работа системы нарушается; в ней возникают бияния токов, напряжений и мощностей в отдельных участках, так как все эти величины будут иметь разную частоту у разных машин; система, как

говорят, выпадает из синхронизма. Для восстановления нормальной работы необходимо отключать генераторы и синхронизировать их. Выпадение системы из синхронизма весьма нежелательно как с точки зрения перерыва в работе, так и с точки зрения возможных повреждений при потере синхронизма, поэтому его необходимо избегать.

Колебания мощности в системе теоретически должны возникать при всяком, даже незначительном, изменении режима в любом участке; однако, в правильно спроектированных системах эти колебания, большую частью, настолько малы, что не могут быть замечены по измерительным приборам на станциях и подстанциях. Заметные колебания возникают только при значительных нарушениях режима работы: при коротких замыканиях, внезапных отключениях или включениях больших участков системы и т. д. Системы, в которых не происходит выпадения из синхронизма даже при крупных нарушениях режима работы (например, при коротких замыканиях), называют устойчивыми; системы, выпадающие из синхронизма, называют неустойчивыми.

Рассмотренные выше колебания носят название свободных колебаний системы, так как они поддерживаются внутренними силами системы. Кроме них, в системах могут быть и вынужденные колебания, которые поддерживаются внешними силами, приложенными к синхронным машинам.

Вынужденные колебания появляются обычно в случае привода синхронных машин поршневыми двигателями. Вращающий момент и скорость вращения последних периодически изменяются, в результате чего начинает колебаться и мощность синхронной машины. Вынужденные колебания могут появиться и при работе только одной синхронной машины, но опасный характер они могут принять только при параллельной работе нескольких синхронных машин.

130. Свободные колебания синхронных машин.

В сети, к которой приключено несколько синхронных машин, колебания совершаются по сложному закону. Рассмотрим сначала простейший случай гармонических колебаний синхронной машины, являющийся почти чисто теоретическим.

Рассматриваемый генератор приключен к сети бесконечно большой мощности; это значит, что напряжение и частота сети остаются строго постоянными и не зависят от колебаний генератора. Электромагнитная мощность генератора P_{ϕ} в зависимости от угла θ (§ 121) изображена на рис. 193. При нормальной работе электромагнитная мощность $P_{\phi 1}$ равна заданной мощности первичного двигателя P_d , соответственно чему получаем определенный угол θ_1 . Предположим, что угол θ_1 по какой-либо причине изменился и стал равным θ_2 , причем $\theta_2 < \theta_1$ (о возможных причинах изменения угла θ сказано ниже). Мощность первичного двигателя остается постоянной ($P_d = \text{const}$). В соответствии с уменьшением угла θ электромагнитная мощность машины уменьшается до значения $P_{\phi 2} < P_d$. Вследствие избытка мощности первичного двигателя над электромагнитной мощностью генератора ротор машины начинает ускоряться; при этом вектор э. д. с. генератора также ускоряется, а вектор напряжения на зажимах, равный вектору напряжения сети, вращается с прежней скоростью, так как мы рассматриваем явления в сети бесконечно большой мощности. Следовательно, значение θ увеличивается, приближаясь от θ_2 к нормальному равновесному значению θ_1 . Так как ротор обладает инерцией, то он не может прийти в положение равновесия θ_1 мгновенно; путь от θ_2 до θ_1 он совер-

шает в течение времени Δt_1 . В течение этого времени на ротор действует изменяющийся избыточный момент вращения $+\Delta M = \frac{P_d - P_\phi}{\Omega}$; здесь P_d

все время постоянно, а P_ϕ изменяется в зависимости от изменения θ (см. рис. 193); через Ω обозначена угловая скорость ротора. Под влиянием избыточного момента ротор увеличивает свою живую силу, ¹⁾ он движется с ускорением до угла θ_1 . При движении ротора от положения θ_2 до θ_1 приращение живой силы, очевидно, равно:

$$\Delta A_1 = \int_0^{\Delta t_1} (P_d - P_\phi) dt.$$

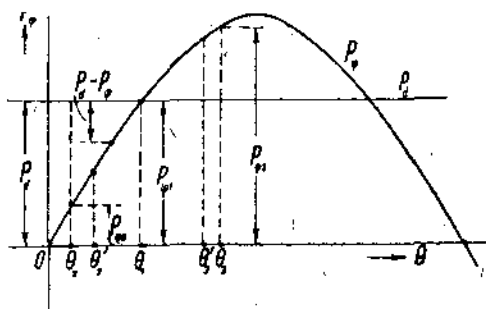


Рис. 193. Зависимость мощности P_ϕ от угла θ .

Так как ротор, достигнув угла θ_1 , приобрел добавочную живую силу ΔA_1 , то он продолжает по инерции двигаться дальше в течение времени Δt_2 . Электромагнитная мощность P_ϕ при этом движении становится больше постоянной мощности первичного двигателя P_d (рис. 193); избыток мощности становится отрицательным ($P_d - P_\phi < 0$), вследствие чего скорость ротора начинает уменьшаться. Запасенная на участке $\theta_2 - \theta_1$ добавочная живая сила ротора ΔA_1 расходуется на преодоление отрицательного избыточного момента $-\Delta M = \frac{P_d - P_\phi}{\Omega}$. Приращение живой силы становится отрицательным:

$$\Delta A_2 = \int_{\Delta t_1}^{\Delta t_1 + \Delta t_2} (P_d - P_\phi) dt < 0.$$

Когда вся запасенная ротором при прохождении пути $\theta_2 - \theta_1$ живая сила ΔA_1 израсходуется на преодоление отрицательного избыточного момента вращения $-\Delta M$, т. е. когда наступит равенство $\Delta A_1 = \Delta A_2$, ротор перестанет ускоряться; это произойдет при некотором угле θ_3 . Так как при угле θ_3 отдаваемая генератором мощность больше получаемой от первичного двигателя, то ротор начинает замедляться, приближаясь от θ_3 к θ_1 . Теперь

¹⁾ Как известно из механики, приращение живой силы (кинетической энергии) равно работе A , произведенной действующими на тело силами:

$$A = d\left(\frac{1}{2} J \Omega^2\right) = J \Omega d\Omega.$$

В данном случае работа равна $A = (P_d - P_\phi) dt = +\Delta M \Omega dt$. Через J здесь обозначен момент инерции вращающихся масс (§ 116).

ротор движется с отрицательным ускорением под действием отрицательного избыточного момента $-\Delta M$. При движении от θ_3 до θ_1 ротор приобретает добавочную отрицательную живую силу $\Delta A'_2 = \Delta A_2$, вследствие чего, дойдя до положения равновесия θ_1 , он по инерции продолжает двигаться дальше в сторону меньших углов θ до тех пор, пока отрицательная живая сила $\Delta A'_2$ не израсходуется на преодоление положительного избыточного момента; это будет, когда ротор дойдет до точки θ_2 . Затем он снова начинает ускоряться и т. д.; ротор будет совершать колебания вокруг точки θ_1 .

При отсутствии вредных сопротивлений (трения) эти колебания продолжались бы бесконечно долгое время. Однако, в действительности избыточная мощность расходуется не только на сообщение ротору ускорения, но и на преодоление сопротивлений: 1) вращающих моментов, создаваемых токами Фуко в массивных частях машины, 2) трения в подшипниках 3) трения о воздух. Благодаря этому приращение живой силы на участке $\theta_2 - \theta_1$ равно:

$$\Delta A_1 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_d - P_f) dt - \Delta R,$$

где ΔR — работа сил сопротивления; при первом колебании ротор дойдет до точки θ'_3 (рис. 193), причем новое приращение живой силы равно $\Delta A_2 = \Delta A_1 - \Delta R$; при втором колебании ротор дойдет до точки θ'_2 и т. д. Амплитуда колебаний все время уменьшается; колебания постоянно затухают, пока не прекратятся совсем.

Избыток вращающего момента, отнесенный к приращению угла, выше (§ 113) был назван синхронизирующим моментом. Поэтому обычно говорят, что при выведении ротора из равновесия он стремится вернуться в положение равновесия под влиянием синхронизирующего момента.

Вследствие инерции он не останавливается в положении равновесия, а совершает вокруг последнего колебания.

Если генератор работает при большом значении угла θ_1 , то может оказаться, что при колебаниях отрицательное приращение живой силы ΔA_2 не может стать равным ΔA_1 , а всегда будет меньше его. Рис. 194 иллюстрирует такой случай. Когда ротор доходит до угла θ_2 , величина ΔA_2 оказывается все еще меньшей ΔA_1 . Поэтому ротор продол

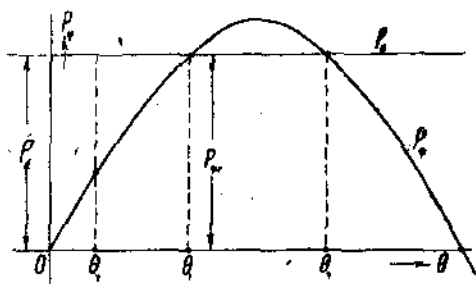


Рис. 194. Пояснение к явлению выпадения машины из синхронизма.

жает двигаться дальше. Однако, при этом электромагнитная мощность уменьшается и становится меньше постоянной мощности первичного двигателя. Поэтому на ротор начнет действовать непрерывно увеличивающийся избыточный ускоряющий момент, и скорость ротора будет увеличиваться; в результате машина выпадет из синхронизма.

Рассматриваемые колебания совершаются исключительно под влиянием внутренних сил системы, поэтому они называются свободными (или собственными) колебаниями системы.

Практически напряжение остается постоянным не на зажимах машины, а в одной из узловых точек системы; в этом случае явление колебаний несколько не изменяется; под углом θ необходимо подразумевать только угол между э. д. с. машины и постоянным напряжением. Это равносильно добавлению к сопротивлению машины сопротивления линий от машины

до узловой точки. Все уравнения и кривая зависимости мощности от угла θ при этом не изменяют своего характера.

В действительных условиях явление свободных колебаний более сложно, чем описано выше, так как появляется целый ряд добавочных обстоятельств; главнейшими являются: 1) в действительной системе напряжение и частота не остаются постоянными, 2) по истечении некоторого времени начинают действовать регуляторы скорости первичных двигателей, 3) обычная электрическая система имеет несколько генераторов; при возникновении колебаний начинают колебаться все генераторы, взаимно влияя друг на друга.

Причинами, вызывающими изменение угла θ , являются внезапные изменения режима работы системы (отключения или включения отдельных участков системы, аварийные отключения отдельных генераторов, короткие замыкания в системе и т. д.). При этом сила тока у каждого генератора изменяется, вследствие чего напряжение на его зажимах изменяется по величине и по фазе; это вызывает изменение угла θ (ср. § 129).

131. Явление свободных колебаний в реальной системе.

Процесс свободных колебаний в реальной системе протекает следующим образом. Для определенности примем, что в некоторый момент времени t_1 в системе произошел внезапный сброс нагрузки (например, отключена часть сети вследствие аварии). В результате сброса нагрузки мощность первичных двигателей оказывается больше электромагнитной мощности генераторов и все машины начинают ускоряться. Регуляторы скорости должны уменьшить мощность первичных двигателей. Однако, регуляторы приходят в действие только тогда, когда изменение скорости уже имеет место, во-вторых, вследствие трения они начинают действовать с некоторым запаздыванием во времени (§ 145). Поэтому в течение времени от t_1 до t_2 регуляторы не оказывают на мощность первичных двигателей никакого влияния и роторы ускоряются под влиянием избыточных вращающих моментов. Если бы изменение нагрузки распределилось поровну на все генераторы и роторы их имели бы одинаковые моменты инерции, то, ускораясь, роторы продолжали бы двигаться синхронно; никаких колебаний не возникло бы. В действительности изменение нагрузки распределяется обратно пропорционально эквивалентным сопротивлениям от данного генератора до точки аварии. Поэтому избыточные вращающие моменты в разных генераторах будут неодинаковы, а следовательно, за одинаковый промежуток времени роторы генераторов повернутся на неодинаковый угол, так как изменение угла пропорционально изменению вращающего момента. Относительное положение роторов изменится; они будут стремиться занять новые положения равновесия, соответствующие новым мощностям, приходящимся на генераторы; однако, вследствие наличия моментов инерции роторы станут колебаться вокруг новых положений равновесия. При этих колебаниях изменение мощности одного генератора изменяет мощность других, так как синхронизирующие токи замыкаются по статорам всех машин. Поэтому колебания всех машин завянут друг от друга. Колебания возникают и в том случае, когда изменение нагрузки для всех генераторов одинаково (отключение линии для генераторов одной станции), но моменты инерции роторов или нагрузки генераторов до изменения режима не одинаковы.

По достижении времени t_2 начинают действовать регуляторы первичных двигателей, ограничивающие приток рабочего вещества. Вследствие обычной перерегулировки регуляторов, изменение притока рабочего ве-

щества происходит то в одну, то в другую сторону, заставляя роторы то замедляться, то ускоряться (§ 146). Эти изменения скорости накладываются на первоначальные свободные колебания.

При внезапном увеличении нагрузки роторы начинают замедляться, пока не начнут действовать регуляторы первичных двигателей; все явления происходят так же, как и в предыдущем случае. При авариях может происходить тот и другой случай, так как короткое замыкание на землю (наиболее частый вид аварий) в зависимости от сопротивления дуги заземления, меняющегося в широких пределах, может быть равносильно как сбросу нагрузки, так и увеличению ее.

Аналитическое решение вопроса свободных колебаний просто только в теоретическом случае сети бесконечно большой мощности (§ 133). В реальных системах решение возможно только после ряда упрощающих допущений, путем графического интегрирования.

132. Последствия свободных колебаний.

Вредные явления, сопровождающие свободные колебания, заключаются в: 1) больших уравнивающих токах, замыкающихся между машинами, роторы которых разошлись по фазе; эти токи вредны не только самим машинам, но и участкам системы, расположенным между генераторами; 2) значительных колебаниях напряжения, в особенности в точках,

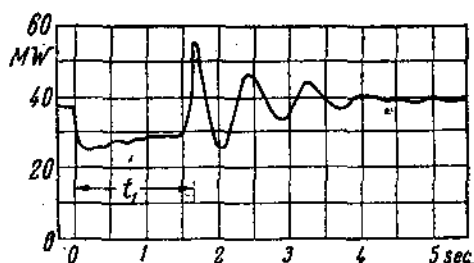


Рис. 195. Колебания мощности синхронной машины при однополюсном коротком замыкании на землю; машина остается в синхронизме; t_1 — продолжительность короткого замыкания.

расположенных вблизи генераторов; колебания напряжения могут сделать невозможной работу приемников электрической энергии. Результатом колебаний токов и напряжений является переброс мощности с одних машин на другие, вследствие чего распределение активных токов в системе все время изменяется. На рис. 195 представлена осциллограмма, снятая в крупной электрической системе во время колебаний синхронных машин, явившихся последствием однополюсного короткого замыкания на землю.

Если колебания углов θ достигают больших амплитуд, то система может выпасть из синхронизма. На рис. 196 представлена осциллограмма для этого случая. При выпадении из синхронизма роторы машин вращаются несинхронно; частота тока и напряжения у разных машин становится неодинаковой и по системе начинают циркулировать токи разной частоты. Накладываясь друг на друга, они дают характерную картину биений. Такую же картину биений дают и напряжения в разных точках системы. При выпадении из синхронизма синхронные машины периодически переходят из режима работы генератором в режим работы двигателем, вследствие чего мощность их имеет значительные колебания (рис. 196).

Выпадение машины из синхронизма при свободных колебаниях, возникающих вследствие внезапного изменения режима работы, может произойти в двух случаях: 1) положение ротора машины при новом значении нагрузки статически неустойчиво, т. е. значение угла θ при новом значении нагрузки больше 90° эд. градусов и, следовательно, синхронизиру-

ющая сила отрицательна; 2) система в новом положении статически устойчива, т. е., приходя в новое положение равновесия при постепенном изменении режима, машина не выпадает из синхронизма (в новом положении для всех генераторов $\theta < 90^\circ$); однако, при внезапном изменении режима в силу инерции ротор проходит новое положение равновесия и при этом угол θ может настолько увеличиться, что синхронизм нарушается. В этом случае система динамически неустойчива.

Практика показывает, что в сравнительно несложных системах в случае нарушения синхронизма последнее происходит после первого же колебания.¹⁾ Случаи, когда выпадение из синхронизма происходит после второго или третьего колебания, сравнительно редки. При выпа-

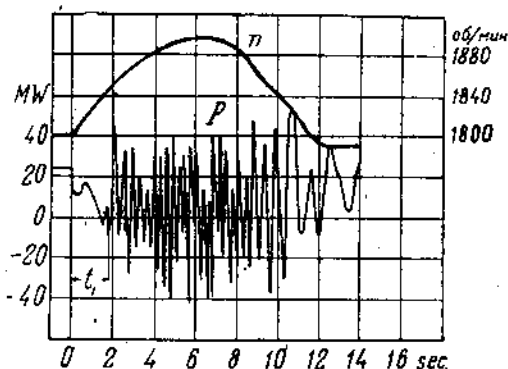


Рис. 196. Колебания мощности P синхронной машины при двухполюсном коротком замыкании на землю; машина выпадает из синхронизма; t_1 — продолжительность короткого замыкания; n — средняя скорость вращения.

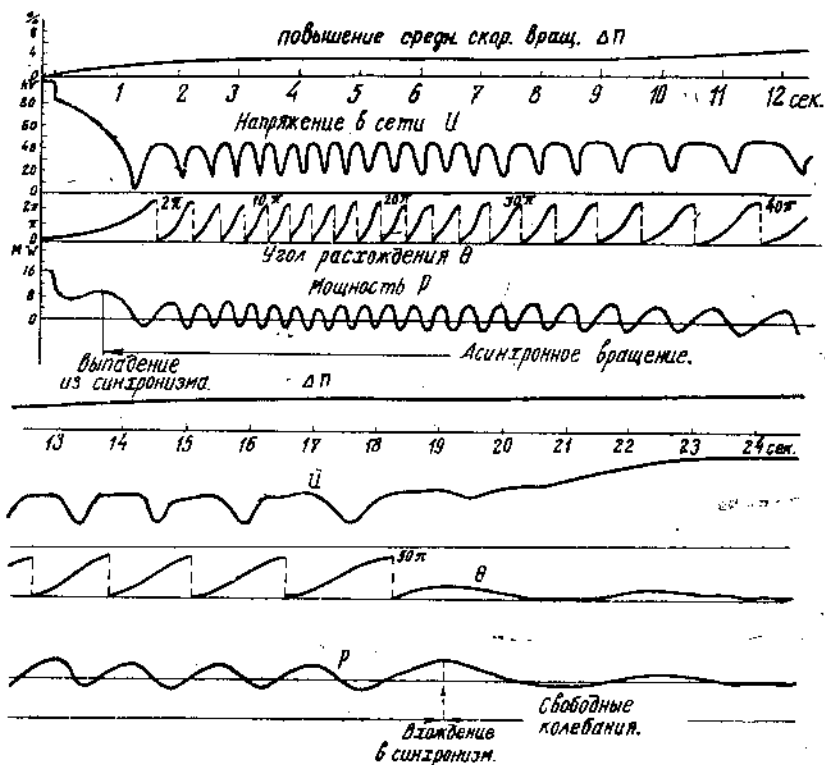


Рис. 197. Колебания синхронной машины при внезапном сбросе нагрузки; машина выпадает из синхронизма и через 19 сек. снова втягивается в синхронизм.

¹⁾ C. F. Wagner. Damper Windings for Water-Wheel Generators. Tr. A. I. E. E. 1931, стр. 140.

дении машины из синхронизма она перестает отдавать мощность в систему, вследствие чего скорость ее сильно увеличивается. Если скорость доходит до максимальной допустимой, то ограничитель скорости (которым снабжаются обычно все первичные двигатели) закрывает приток рабочего вещества и машина останавливается. Однако, если скорость не доходит до максимальной допустимой, то по истечении времени запаздывания (§ 145) начинает действовать регулятор скорости и уменьшает скорость вращения. Когда скорость становится снова равной нормальной, машина может снова втянуться в синхронизм. Существует мнение, что такое явление происходит чаще, чем думают, так как по обычным измерительным приборам его заметить нельзя.¹⁾ На рис. 197 представлена осциллограмма подобного выпадения из синхронизма и последующего втягивания снова в синхронизм.

133*. Решение дифференциального уравнения движения ротора синхронной машины в случае свободных колебаний.

Выше (§ 119) было получено уравнение движения ротора синхронной машины, работающей параллельно с другими:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S\alpha = \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x); \quad (192a)$$

здесь α выражено в электрических радианах, J —в $\text{кгм} \times \text{сек.}^2$, D —в $\text{кгм} \times \text{сек.}$, S —в кгм , $\sum h_x$ —в кгм . Необходимо иметь в виду, что это уравнение справедливо лишь при $U = \text{const}$ и при так называемых малых колебаниях ($\alpha < 25^\circ$), при больших значениях α в уравнение необходимо ввести еще ряд добавочных членов высших порядков, входящих в разложение P_ϕ (§ 113); при этом э. д. с. и напряжение на зажимах генератора уже нельзя будет считать постоянными. Эти усложнения делают аналитическое решение уравнения невозможным и заставляют прибегать к приближенным решениям путем графического интегрирования. В случае $\alpha > 25^\circ$ в уравнение (192a) необходимо подставлять выражение электромагнитной мощности P_ϕ в виде (§§ 113 и 121):

$$P_\phi = \frac{mE_Q U}{x} \sin \theta, \quad (193a)$$

где θ —величина переменная. Обозначая через $P_{\max} = \frac{mE_Q U}{x}$ и отсчитывая переменный угол отклонения ротора от положения равновесия, соответствующего холостому ходу, т. е. полагая $\alpha = \theta$, получаем

$$P_\phi = P_{\max} \sin \alpha,$$

соответственно чему

$$M_\phi = S_{\max} \sin \alpha,$$

где $S_{\max} = \frac{mE_Q U}{9,81x}$. Тогда уравнение движения ротора имеет вид:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S_{\max} \sin \alpha = \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x). \quad (192b)$$

Такое уравнение решить можно только приближенно. В настоящем параграфе дано решение только для случая малых колебаний ($\alpha < 25^\circ$).

¹⁾ R. C. Buell, R. J. Caughey, E. M. Hunter, V. M. Marquis. Governor Performance During System Disturbances. Tr. A. I. E. E. 1931, стр. 354.

Свободные колебания системы происходят в отсутствии вынуждающей силы: $\Sigma h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x) = 0$; уравнение их, следовательно, имеет вид:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S\alpha = 0. \quad (191a)$$

Решение уравнения в общем виде имеет вид:

$$\alpha = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t}; \quad (195)$$

здесь e — основание натуральных логарифмов, k_1 и k_2 — корни характеристического уравнения:

$$k_{1,2} = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 - 4SJ/p}}{2J/p}. \quad (196)$$

Обычно в синхронных машинах имеем $D < 4SJ/p$, поэтому решение уравнения принимает вид:

$$\alpha = e^{-\frac{Dp}{2J}t} \left[C_1 \sin \frac{\sqrt{4SJ/p - D^2}}{2J/p} t + C_2 \cos \frac{\sqrt{4SJ/p - D^2}}{2J/p} t \right]. \quad (197)$$

Коэффициенты C_1 и C_2 находят из начальных условий; полагая при $t=0$ скорость колебаний $\frac{d\alpha}{dt} = 0$, угол отклонения от положения равновесия $\alpha = A$, получаем

$$C_1 = \frac{AD}{\sqrt{4SJ/p - D^2}}; \quad C_2 = A. \quad (198)$$

Произведя в уравнении (197) тригонометрические преобразования, получаем

$$\alpha = e^{-\frac{Dp}{2J}t} A \sqrt{\frac{4SJ/p}{4SJ/p - D^2}} \sin \left(\frac{\sqrt{4SJ/p - D^2}}{2J/p} t + \eta \right); \quad (199)$$

здесь $\eta = \arctg \frac{\sqrt{4SJ/p - D^2}}{D}$.

При $D \neq 0$ получаем затухающие колебания с периодом:

$$T = 2\pi \frac{2J}{p \sqrt{4SJ/p - D^2}}. \quad (200)$$

Затухание колебаний характеризуется декрементом колебаний, т. е. отношением двух следующих друг за другом амплитуд:

$$\Delta = \frac{e^{-\frac{Dp}{2J}t}}{e^{-\frac{Dp}{2J}(t_1 + T_2)}}. \quad (201)$$

Вследствие сложной экспоненциальной формы декремента пользуются обычно логарифмическим декрементом колебаний:

$$\delta_k = \ln \Delta = -\frac{Dp}{2J} t_1 + \frac{Dp}{2J} \left(t_1 + \frac{T}{2} \right) = \frac{DTp}{4J}. \quad (202)$$

При $D=0$ получаем свободные незатухающие колебания:

$$\alpha = A \cos \sqrt{\frac{Sp}{J}} t; \quad (203)$$

период незатухающих колебаний равен:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{pS}}. \quad (204)$$

134*. Период свободных незатухающих колебаний.

а) Работа машины на сеть бесконечно большой мощности, т. е. на сеть, в которой напряжение и частота не изменяются под влиянием колебаний.

Подставляя значение $J = \frac{GD_r^2}{4g}$ в уравнение (204) для периода незатухающих колебаний (т. е. при $D = 0$), получаем

$$T_0 = 1,02 \sqrt{\frac{GD_r^2}{pS}} \text{ сек.}; \quad (204a)$$

здесь GD_r^2 — маховой момент ротора в кгм^2 , g — ускорение силы тяжести в м/сек.^2 , p — число пар полюсов, S — синхронизирующая сила в кгм ; S вычисляется по формуле (165). При полной нагрузке T_0 на 10–15% меньше, чем при холостом ходе, вследствие изменения угла θ (а следовательно, и S , см. § 113) при переходе от холостого хода к полной нагрузке.¹⁾

Преобразуем выражение для синхронизирующей силы S :

$$S = \frac{mE_Q U \cos \theta_1}{9,81 \times \Omega} = \frac{60}{9,81} \frac{m}{2\pi n} U I_k \cos \theta_1 = \frac{60}{9,81} \frac{f_k P}{2\pi n} \cos \theta_1 \times 10^3. \quad (205)$$

Здесь принято, что $\psi_a = 90^\circ$ (§ 121), $I_k = E_Q/x$ — установившийся ток короткого замыкания в амперах, $f_k = I_k/I_N$ — отношение установившегося тока короткого замыкания к номинальному току (кратность тока короткого замыкания, § 217), $P = mUI_N 10^{-3}$ — номинальная мощность в kVA ; $\Omega = 2\pi n/60$ — угловая скорость ротора; полагая $\cos \theta_1 = 1$ и подставляя полученное выражение для S в уравнение (204a), получаем формулу Розенберга:²⁾

$$T_0 = 0,032 \sqrt{\frac{GD_r^2 n^2}{p f_k P}} \text{ сек.}; \quad (204b)$$

здесь GD_r^2 выражено в кгм^2 , n — в об./мин., P в kVA . Так как при коротком замыкании реакция якоря имеет другую величину, чем при нагрузке, то величина S , вычисленная по току короткого замыкания (уравнение 205), не соответствует действительной, причем ошибка может доходить до 45%.³⁾

Вычисление периода затухающих колебаний см. § 135.

б). Работа k параллельно включенных генераторов, сравнимых по мощности.

Для вычисления периода свободных колебаний в этом случае приходится решать k линейных дифференциальных уравнений 2-го порядка, что в общем виде невозможно. Sarfert показал,⁴⁾ что в этом случае система может иметь $k-1$ различных периодов свободных колебаний, причем если расположить в возрастающем порядке периоды свободных колебаний $T_1, T_2, T_3, \dots, T_k$ генераторов при работе каждого параллельно с сетью бесконечно большой мощности, то $k-1$ периодов свободных колебаний системы расположатся в таком же ряду, заключаясь соответственно между T_1 и T_2 , T_2 и T_3 и т. д. Поэтому при вычислении периодов свободных колебаний системы можно воспользоваться этими пределами.

¹⁾ E. Roth. Alternateurs et moteurs synchrones. Paris, 1924.

²⁾ E. Rosenberg. Ueber den Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen. E. T. Z., 1902, стр. 425.

³⁾ Г. А. Люст. Применимость двигателей внутреннего сгорания на электрических станциях. Изв. Петрогр. политехн. инст., 1916, т. 25, стр. 1.

⁴⁾ Sarfert. Ueber den Schwingen der Wechselstrommaschinen im Parallelbetriebe F. Arb. VDI 1908, H. 61.

Для двух параллельно работающих генераторов период свободных колебаний равен:

$$T_0 = \sqrt{\frac{p_1^2 T_1^2 (GD_r^2)_2 + p_2^2 T_2^2 (GD_r^2)_1}{p_1^2 (GD_r^2)_2 + p_2^2 (GD_r^2)_1}}; \quad (206)$$

здесь $p_1, (GD_r^2)_1, T_1$ и $p_2, (GD_r^2)_2, T_2$ — число пар полюсов, маховой момент и период свободных колебаний при работе на сеть бесконечно большой мощности, соответственно для первого и второго генераторов.

135*. Период свободных затухающих колебаний.

В § 133 для периода затухающих колебаний была получена формула:

$$T = 2\pi \frac{2J}{p \sqrt{4JS/p - D^2}}. \quad (200a)$$

Применение успокоительной обмотки для увеличения затухания (§ 143) оказывает на период колебаний два противоположных влияния. Успокоительный момент $D \frac{d\alpha}{dt}$, как видно из формулы (200a), увеличивает период колебаний. С другой стороны, успокоительная обмотка создает добавочный синхронизирующий момент $S_d \alpha$ (§ 115), вследствие чего полное значение синхронизирующего момента равно $S_1 \alpha = (S + S_d) \alpha$, где S_d — синхронизирующий момент обмотки статора. Это обстоятельство уменьшает T . Так как S_d зависит от T , то уравнение (200a) следует решать попытками, подбирая значения S_d и T , делающие уравнение тождеством.

При очень большом D , когда $D^2 > 4J(S + S_d)/p$ движение становится апериодическим.

В обычных успокоительных обмотках S_d и D очень малы по сравнению с J и S , и поэтому не оказывают почти никакого влияния на T ; в этом случае T можно подсчитывать по той же формуле, что и для незатухающих колебаний¹⁾ (уравнение 204).

136. Вынужденные колебания.

Паровые и гидравлические турбины имеют постоянный вращающий момент, не изменяющийся в течение одного оборота. Поршневые машины (паровые машины, газовые двигатели, двигатели Дизеля) имеют вращающий момент, изменяющийся по величине в течение одного оборота вала. Максимальное значение момент имеет в период впуска пара или в период горения рабочей смеси; в период расширения давление на поршень падает, остается малым в течение выпуска и даже отрицательным в период сжатия. Соответственно изменению давления на поршень изменяются вращающий момент и мощность двигателя. На рис. 198 кривая 1 изображает вращающий момент газового двигателя. Прямая AB представляет собою средний вращающий момент M_0 .

а) Работа синхронного генератора в одиночку. При работе синхронного генератора, приводимого во вращение поршневым двигателем, в одиночку, т. е. на сеть, не имеющую других приключенных синхронных машин, электромагнитную мощность можно считать постоянной. При нормальной работе средняя скорость вращения генератора должна оставаться постоянной; при этом, очевидно, электромагнитная мощность равна средней мощ-

¹ M. Liwischitz. Einfluss der Dämpferwicklung auf die Eigenschwingungszahl der Synchronmaschine. A. f. E. 1928, т. 20, стр. 559.

ности первичного двигателя. Избыток мощности первичного двигателя над средней переходит в кинетическую энергию ротора машины, недостаток покрывается за счет кинетической энергии. Вследствие этого мгновенное значение угловой скорости вращения генератора изменяется. Угловая скорость Ω равна интегралу от вращающего момента M_d :

$$\Omega = \frac{1}{J} \int M_d dt; \quad (207)$$

здесь J — момент инерции вращающихся частей. Путем графического интегрирования кривой вращающего момента первичного двигателя 1 (рис. 198) получена кривая 2, представляющая собою кривую изменения угловой

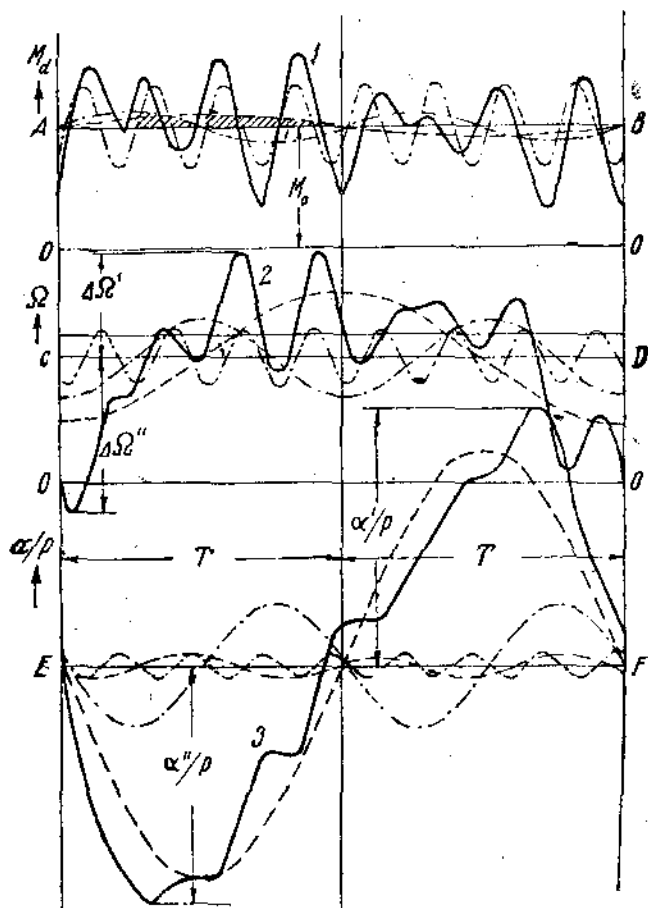


Рис. 198. Кривая вращающего момента M_d (1), угловой скорости Ω (2) и углового отклонения ротора от положения равновесия α/p (3).

скорости ротора. Прямая CD представляет собою среднюю угловую скорость Ω_1 . Обозначая максимальные отклонения скорости от среднего значения Ω_1 в положительную и отрицательную сторону через

$$\Delta\Omega' = \Omega_{\max} - \Omega_1 \text{ и } \Delta\Omega'' = \Omega_1 - \Omega_{\min},$$

получаем так называемую степень неравномерности скорости:

$$\delta = \frac{\Delta\Omega' + \Delta\Omega''}{\Omega_1} = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega_1}. \quad (208)$$

При равномерной скорости положение ротора в пространстве пропорционально времени; за одинаковые промежутки времени ротор перемещается на одинаковый угол. При неравномерной скорости положение ротора в пространстве непропорционально времени и отличается в каждый момент времени на переменный угол α/p простр. градусов от положения, которое ротор занимал бы в данный момент времени при равномерной средней скорости Ω_1 . Интегрируя кривую 2 и вычитая из результата прямую, изображающую положение ротора при равномерной скорости Ω_1 , получаем кривую 3, представляющую собою величину отклонения α/p в функции времени. Линия EF представляет собою нулевое отклонение ротора при равномерной скорости. На рисунке различными пунктиром показаны гармоникки, на которые могут быть разложены не-синусоидальные кривые вращающего момента, скорости и отклонения.

При работе генератора с неравномерной скоростью величина э. д. с. изменяется так же, как и скорость, так как э. д. с. прямо пропорциональна скорости. Напряжение на зажимах генератора при работе его в одиночку по фазе и величине колеблется синхронно с э. д. с., так как при работе генератора в одиночку отсутствуют какие-либо силы, поддерживающие равномерное вращение и постоянную величину вектора напряжения. Поэтому угол сдвига между э. д. с. и напряжением на зажимах θ остается постоянным. Чем больше степень неравномерности, тем больше колебания напряжения по величине и по фазе. Большие колебания напряжения могут сделать работу сети невозможной, так как они вызывают мерцание силы света ламп и колебания скорости вращения электродвигателей. Обычно предел допустимому максимальному значению степени неравномерности $\delta_{\max}$ ставится чувствительностью глаза к колебаниям силы света ламп накаливания (§ 138), так как электродвигатели менее чувствительны к колебаниям напряжения. Допустимые с этой точки зрения значения $\delta_{\max}$ приведены в § 138. Для уменьшения $\delta_{\max}$ необходимо увеличивать момент инерции вращающихся частей.

в) Работа синхронного генератора параллельно с другими. При работе синхронного генератора параллельно с другими явление вынужденных колебаний усложняется, так как система параллельно включенных синхронных машин обладает способностью порождать свободные колебания (§ 130).

В случае, если генератор, приводимый во вращение поршневым двигателем, работает на сеть бесконечно большой мощности, то вектор напряжения сети по величине остается постоянным и вращается в пространстве с постоянной синхронной скоростью. Так как вектор э. д. с. генератора вращается с переменной скоростью, то угол θ периодически изменяется, вследствие чего изменяется и электромагнитная мощность (§ 121). В этом случае избыточная мощность поршневого двигателя переходит не только в кинетическую энергию вращающихся частей, но и отдается в сеть в виде электрической энергии. Изменение электромагнитной мощности с изменением угла θ можно рассматривать как появление синхронизирующего момента, препятствующего изменению угла θ . Очевидно, что кривая отклонения α ротора (выраженного в эл. градусах) от положения, соответствующего синхронной скорости, представляет как раз изменение угла θ . Как видно из рис. 198, изменение α отстаёт от изменения вращающего момента для каждой гармоникки на 180° . Синхронизирующий момент действует в противоположном направлении по сравнению с изменением α ; следовательно, неравномерный вращающий момент первичного двигателя и синхронизирующий момент действуют в одну сторону. В результате амплитуда колебаний увеличивается. Если период собственных колебаний

генератора окажется равным периоду вынужденных колебаний (явление резонанса), то амплитуда колебаний становится настолько большой, что генератор выпадает из синхронизма. Таким образом, синхронизирующая сила, стремящаяся уменьшить колебания, приводит к обратному, весьма нежелательному, результату — увеличению колебаний. Для борьбы с увеличением колебаний необходимо подбирать соответствующие значения моментов инерции (для избежания резонанса) или устраивать специальные успокоительные (демпферные) обмотки (§§ 114, 143).

137*. Решение уравнения движения генератора в случае вынужденных колебаний при работе его в одиночку.

При работе генератора в одиночку угол θ при колебаниях остается постоянным, так как нет причин, поддерживающих постоянную величину и скорость вращения вектора напряжения на зажимах генератора. Электромагнитная мощность (§ 113)

$$P_{\psi} = mE_Q I \cos \psi = \frac{mE_Q}{z} [E_Q \cos \psi_a - U \cos (\psi_a + \theta)] \quad (155a)$$

все же изменяется, так как входящая в эту формулу э. д. с. E_Q пропорциональна скорости вращения генератора и, следовательно, изменяется вместе с изменением последней. Обозначим активную проводимость сети, включая и проводимость генератора, через g . Будем считать g постоянным. Тогда электромагнитная мощность генератора равна:

$$P_{\psi} = mE_Q I \cos \psi = mE_Q^2 g; \quad (209)$$

здесь $I \cos \psi = gE_Q$. Так как E_Q пропорционально угловой скорости Ω , можем последнее уравнение представить в виде:

$$P_{\psi} = N\Omega^2; \quad (210)$$

здесь N — постоянный коэффициент. Угловая скорость при колебаниях равна:

$$\Omega = \Omega_1 + \Delta\Omega; \quad (211)$$

здесь Ω_1 — постоянная средняя скорость, соответствующая среднему значению вращающего момента, $\Delta\Omega$ — накладываются на нее изменение скорости, обусловленное гармониками вращающего момента (§ 136). Электромагнитный момент генератора равен:

$$M_{\psi} = \frac{P_{\psi}}{\Omega} = N\Omega = N\Omega_1 + N\Delta\Omega. \quad (212)$$

Обозначим $N\Omega_1 = M_{\psi_0}$ — средний постоянный электромагнитный момент; определяя по уравнению (211):

$$\Delta\Omega = \Omega - \Omega_1, \quad (213)$$

получим

$$M_{\psi} = M_{\psi_0} + N(\Omega - \Omega_1). \quad (214)$$

Таким образом, кроме электромагнитного момента, соответствующего средней постоянной составляющей скорости, появляется добавочный момент $N(\Omega - \Omega_1)$, пропорциональный изменению скорости. Следовательно, уравнение движения ротора (§ 119) получает следующий вид:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + M_{\psi_0} + N(\Omega - \Omega_1) = M_0 + \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x).$$

Так как для постоянства средней угловой скорости должно соблюдаться равенство $M_{\omega} = M_0$, получаем

$$J \frac{d\Omega}{dt} + N(\Omega - \Omega_1) = \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x).$$

Выражая Ω через α (§ 119), получаем

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{N}{p} \frac{d\alpha}{dt} = \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x). \quad (215)$$

В правой части этого уравнения имеем сумму высших гармоник вращающего момента первичного двигателя (§ 118). Решение этого уравнения имеет следующий вид. Скорость колебаний равна:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sum \frac{h_x}{\sqrt{(N/p)^2 + (Jx\Omega_1/p)^2}} \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x - \eta_x); \quad (216)$$

отклонение от положения, соответствующего синхронной скорости, равно:

$$\alpha = \sum \frac{h_x}{x\Omega_1 \sqrt{(N/p)^2 + (Jx\Omega_1/p)^2}} \sin(x\Omega_1 t - \gamma_x - \eta_x); \quad (217)$$

здесь $\eta_x = \operatorname{arctg} Jx\Omega_1/N$. При работе генератора в одиночку сопротивлением движению ротора N в формулах (216, 217) по сравнению с другими членами можно пренебречь,¹⁾ поэтому скорость колебаний и отклонение получают значения:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sum \frac{h_x p}{Jx\Omega_1} \sin(x\Omega_1 t - \gamma_x); \quad (216a)$$

$$\alpha = \sum \frac{h_x p}{Jx^2\Omega_1^2} \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x). \quad (217a)$$

Скорость колебаний и отклонение представляют собою, как видно из формул (216, 217), сумму отдельных гармоник; амплитуды каждой гармоники, скорости колебаний и отклонения соответственно равны:

$$\frac{d\alpha_x}{dt} = \frac{h_x p^2}{Jx\Omega_1}; \quad (218)$$

$$\alpha_x = \frac{h_x p}{Jx^2\Omega_1^2}; \quad (219)$$

здесь h_x — амплитуда соответствующей гармоники вращающего момента первичного двигателя в кгм, J — момент инерции вращающихся масс в кгм × сек.², x — порядок гармоники, Ω_1 — средняя угловая скорость вращения ротора в простр. радианах/сек.; p — число пар полюсов.

Как следует из формулы (219), амплитуда отклонения обратно пропорциональна квадрату угловой частоты соответствующей гармоники $x\Omega_1$. Поэтому, несмотря на то, что в кривой вращающего момента (рис. 198) максимальное значение имеет 4-я гармоника (с частотой $4\Omega_1$), в кривой отклонения — $1/2$ -я гармоника (с частотой $0,5\Omega_1$). На рис. 198 амплитуда $1/2$ -й гармоники вращающего момента равна 10,6% от среднего момента, амплитуды 1 и 4-й гармоник соответственно равны 12,2 и 34,7%; таким образом, гармоники находятся в отношении 1:1,15:3,3. Соответствующие им амплитуды углового отклонения находятся в отношении 1:0,29:0,05.

¹⁾ E. Arnold und J. la Cour, Die synchronen Wechselstrommaschinen. Berlin, 1913.

Максимальное отклонение $\alpha_{\max}$ представляет собою геометрическую сумму амплитуд отдельных гармоник; приближенно (с преувеличением) оно может быть принято равным алгебраической сумме амплитуд.

В том случае, если, кроме ротора, на валу имеется отдельный маховик, между ротором и маховиком возникают взаимные колебания, которые могут повести к увеличению амплитуды отклонений ротора (§ 142).

138*. Максимальное допустимое отклонение ротора при работе генератора в одиночку.

При работе генератора в одиночку наибольшее допустимое отклонение $\alpha_{\max}$ ограничивается исключительно чувствительностью глаза к колебаниям силы света ламп накаливания, так как электродвигатели менее чувствительны к подобным колебаниям напряжения. Опыт показывает, что чувствительность глаза зависит не только от амплитуды колебаний напряжения, но и от их частоты. Наиболее чувствителен глаз к колебаниям частоты $6 \div 8$ пер./сек. На рис. 199 представлена кривая зависимости величины колебаний напряжения $\Delta e_{\max}$ при которых колебания силы света ламп становятся заметными для глаза от частоты колебаний ν .

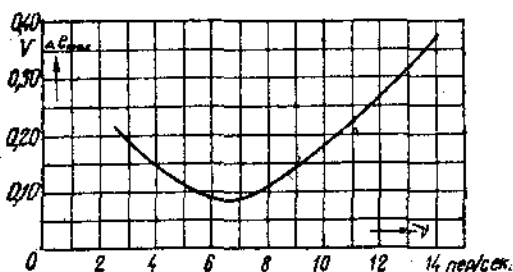


Рис. 199. Зависимость величины колебаний напряжения $\Delta e_{\max}$ при которых колебания силы света ламп становятся заметными для глаза от частоты колебаний ν .

колебаний напряжения в вольтах, накладывающихся на строго постоянное напряжение в 110 В, причем колебания происходят по синусоидальному закону.¹⁾

Если принять, что кривая вращающего момента синусоидальна, т. е. состоит только из одной гармоники h_x , то амплитуда изменения угловой скорости (§ 137) равна

$$\frac{d\alpha_x}{dt} = \frac{h_x p}{J_x \Omega_1} \quad (218a)$$

и степень неравномерности (§ 136) тогда равна

$$\delta = \frac{2 \frac{d\alpha_x}{dt}}{\Omega_1} = \frac{2 h_x p}{J_x \Omega_1^2} \quad (220)$$

Амплитуду отклонения можно представить в виде

$$\alpha_{\max} = \frac{h_x p}{J_x \Omega_1^2} = \frac{\delta}{2}; \quad (221)$$

На рис. 199 представлена кривая зависимости величины колебаний напряжения, при которых колебания силы света ламп накаливания становятся заметными для глаза, от частоты колебаний. На оси ординат отложены амплитуды

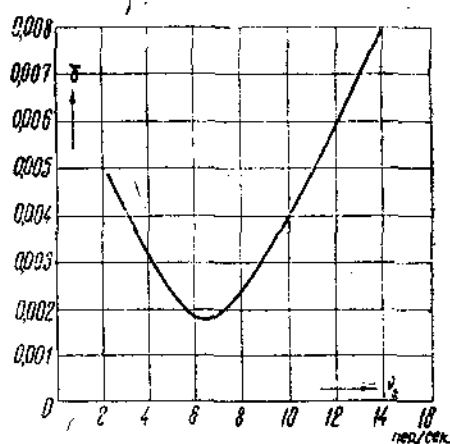


Рис. 200. Зависимость требуемой степени неравномерности δ от частоты колебаний ν .

¹⁾ Г. А. Люст. К вопросу о применении двигателей Дизеля на электрических станциях. Изв. СПб Политехн. инст., 1912, т. 18, стр. 197.

здесь x — порядок той гармоники, которую мы считаем единственно присутствующей в кривой вращающего момента; за нее, очевидно, надлежит брать ту, которая дает максимальное значение отклонения $\alpha_{\max}$. Подставляя вместо $\alpha_{\max}$ его значения, полученные из опыта, при которых колебания становятся чувствительными для глаза, можно для разных значений x найти по уравнению (221) требуемую величину δ ; последние приведены на рис. 200. Здесь γ_x — частота колебаний, равная $\frac{x\pi}{60}$.

При работе генератора в одиночку амплитуда колебаний может быть ограничена только увеличением момента инерции вращающихся частей (ротора) J , как это следует из формулы (221). Подсчет величины J — см. § 218.

139*. Вынужденные колебания генератора, работающего параллельно с другими.

При параллельном соединении нескольких синхронных машин при колебаниях между ними возникает синхронизирующая сила, направление которой сдвинуто на 180° от углового отклонения. Поэтому синхронизирующая сила действует одинаково с высшими гармониками вращающего момента первичного двигателя и величина колебаний увеличивается (§ 136).

а) Работа синхронного генератора на сеть бесконечно большой мощности.

Уравнение движения ротора машины в этом случае имеет вид:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S\alpha = \sum h_x \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x). \quad (192a)$$

Решение уравнения:

$$\alpha = B_1 e^{k_1 t} + B_2 e^{k_2 t} + B_3; \quad (222)$$

здесь k_1 и k_2 — корни характеристического уравнения; они имеют те же значения, что и в § 133; B_1 и B_2 — постоянные, определяемые из начальных условий; B_3 — частное решение уравнения с последним членом.

Подставляя значения корней и постоянных, получаем

$$\alpha = e^{-\frac{Dp}{2J}t} A_1 \sin\left(\frac{\sqrt{4SJ/p - D^2}}{2J/p} t + \eta\right) + \sum \frac{h_x}{\sqrt{(Dx\Omega_1)^2 + (Jx^2\Omega_1^2/p - S)^2}} \sin(x\Omega_1 t - \gamma_x - \eta_x); \quad (223)$$

здесь $\eta_x = \arctg \frac{Jx^2\Omega_1^2/p - S}{Dx\Omega_1}$; A_1 — начальное отклонение, η — начальная фаза. Первый член выражения (223) представляет собою затухающие колебания переходного режима; для установившегося режима его можно положить равным нулю; тогда

$$\alpha = \sum \frac{h_x}{\sqrt{(Dx\Omega_1)^2 + (Jx^2\Omega_1^2/p - S)^2}} \sin(x\Omega_1 t - \gamma_x - \eta_x); \quad (224)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sum \frac{h_x x \Omega_1}{\sqrt{(Dx\Omega_1)^2 + (Jx^2\Omega_1^2/p - S)^2}} \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x - \eta_x). \quad (225)$$

В отсутствии затухания колебаний, т. е. при $D=0$, получаем

$$\alpha = \sum \frac{h_x}{Jx^2\Omega_1^2/p - S} \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x). \quad (224a)$$

Амплитуда колебаний в отсутствии затухания (т. е. в отсутствии успокоительной обмотки) для гармоники порядка x равна:

$$\alpha'_x = \frac{h_x}{Jx^2\Omega_1^2/p - S}. \quad (226)$$

Сравнивая ее с амплитудой колебаний генератора, работающего в одиночку ($\alpha_x = \frac{h_x p}{Jx^2\Omega_1^2}$), получаем, что при параллельной работе амплитуда колебаний больше в отношении

$$c_x = \frac{\alpha'_x}{\alpha_x} = \frac{1}{1 - \frac{Sp}{Jx^2\Omega_1^2}}.$$

Подставляя $\frac{Sp}{J} = \frac{4\pi^2}{T_0^2}$, где T_0 — период свободных колебаний (§ 133), и заменяя $x\Omega_1 = x \frac{2\pi n}{60} = 2\pi\nu_x = \frac{2\pi}{T_x}$, где $\nu_x = \frac{n}{60}$ — частота вынужденных колебаний, а $T_x = 1/\nu_x$ — их период, получаем

$$c_x = \frac{1}{1 - \left(\frac{T_x}{T_0}\right)^2}. \quad (227)$$

Эта величина носит название модуля резонанса.

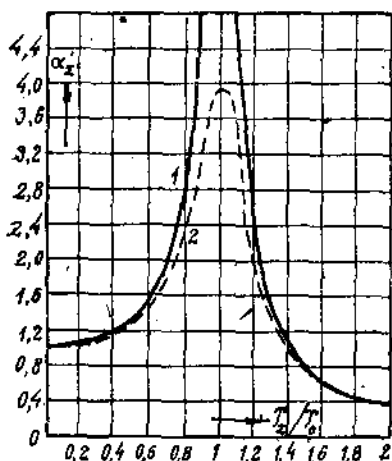


Рис. 201. Зависимость амплитуды колебаний от отношения T_x/T_0 в отсутствии успокоения (1) и при наличии успокоительной обмотки (2); на оси ординат отложено абсолютное значение α'_x .

Таким образом, результирующее максимальное отклонение ротора, равное сумме отклонений, вызываемых отдельными гармониками, равно:

$$\alpha_{\max} = \sum \frac{c_x h_x p}{Jx^2\Omega_1^2}. \quad (228)$$

При равенстве периодов собственных колебаний и вынужденных ($T_0 = T_x$) для какой-либо гармоники (резонанс) имеем $c_x = \infty$; соответствующая этой гармонике амплитуда колебаний стремится к бесконечности, вследствие чего параллельная работа становится невозможной. На рис. 201 представлена кривая амплитуды колебаний в функции от T_x/T_0 . Для избежания резонанса необходимо, чтобы частоты свободных и вынужденных колебаний отстояли как можно дальше друг от друга. Обозначим периоды вынужденных колебаний от отдельных гармоник через $T_1, T_2, T_3, \dots$. Обычно выбирают параметры генератора и первичного двигателя так,

чтобы $T_0 > T_1$, где T_1 — период вынужденной гармоники, имеющей самую низкую частоту $\nu_{\min}$; для этого надо увеличивать момент инерции вращающихся масс, что достигается применением маховика (§ 142). Если частота $\nu_{\min}$ очень низка, то маховик получается слишком велик, поэтому иногда берут $T_1 > T_0 > T_2$; при этом, однако, может случиться, что при изменении нагрузки синхронизирующая сила изменится и T_0 (см. § 134) станет близко к T_1 или к T_2 . В тех случаях, когда нельзя избежать резонанса при помощи маховика, необходимо применять успокоительную

обмотку (§ 143), позволяющую работать и при резонансе. Амплитуды колебаний при ней уменьшаются (ур. 224); на рис. 201 они изображены пунктирной кривой. При применении отдельного маховика могут возникнуть колебания между ротором и маховиком, скручивающие вал (§ 142).

б) Случай k параллельно работающих генераторов, сравнимых по мощности.

Как указывалось выше (§ 134), при этом возможно $k-1$ свободных колебаний, причем может произойти резонанс с любым из них. Для избежания этого необходимо взять $T_{0\min} > T_{\text{кmax}}$, где $T_{0\min}$ — минимальный период свободных колебаний системы, а $T_{\text{кmax}}$ — максимальный период вынужденных колебаний.

140*. Допустимый угол отклонения при вынужденных колебаниях в случае параллельной работы синхронных машин.

Допускаемый угол отклонения при вынужденных колебаниях в случае параллельной работы определяется, с одной стороны, предупреждением перехода синхронной машины из генераторного режима в двигательный, что нежелательно для первичного двигателя, с другой стороны, допустимым длительным колебанием мощности генератора с точки зрения допустимого нагрева.

Если при нагрузках, меньших $1/4$, генератор не работает, то максимальное отклонение должно быть не больше угла θ_1 нормальной работы при нагрузке $1/4$ номинальной: $\alpha_{\text{max}} \leq \theta_1$. Для трехфазных генераторов при 50 пер./сек. этот угол $\theta_1 = 3 \div 4$ эл. градуса, при 25 пер./сек. $\theta_1 = 5$ эл. градусов, для однофазных генераторов при 50 пер./сек. $\theta_1 = 3$ эл. градуса.¹⁾

Переходя ко второму критерию, можно для обычных генераторов считать безопасной длительную перегрузку током, на 5% большим номинального. Колебательный ток I_2 накладывается на ток I_1 , соответствующий средней (номинальной) нагрузке; результирующий ток равен:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \beta I_1; \quad (229)$$

откуда

$$\beta^2 I_1^2 = I_1^2 + I_2^2 \quad \text{и} \quad I_2 = I_1 \sqrt{\beta^2 - 1}. \quad (230)$$

Полагая $\beta = 1,05$, получаем

$$I_2 = I_1 \sqrt{1,05^2 - 1} = 0,32 I_1,$$

т. е. действующее значение тока I может колебаться в пределах от $I = I_1 - I_2 = 0,68 I_1$ до $I = I_1 + I_2 = 1,32 I_1$, причем нагревание будет такое же, как при постоянной перегрузке током в 5%. Построив диаграммы напряжений для нагрузок $0,68 I_1$ и $1,32 I_1$, получим углы θ_1 и θ_2 , в пределах которых может колебаться ротор машины вокруг среднего положения θ_N , соответствующего номинальной нагрузке. Обычно допустимые отклонения в этом случае $\theta_N - \theta_1$ и $\theta_2 - \theta_N$ получаются большими, чем в первом случае. Следовательно, проверку необходимо делать по первому случаю, т. е. недопущению перехода генератора в режим двигателя.

¹⁾ Г. А. Люст. Применимость двигателей внутреннего сгорания на электрических станциях. Изв. Петрогр. Политехн. инст., 1916, т. 25, стр. 1.

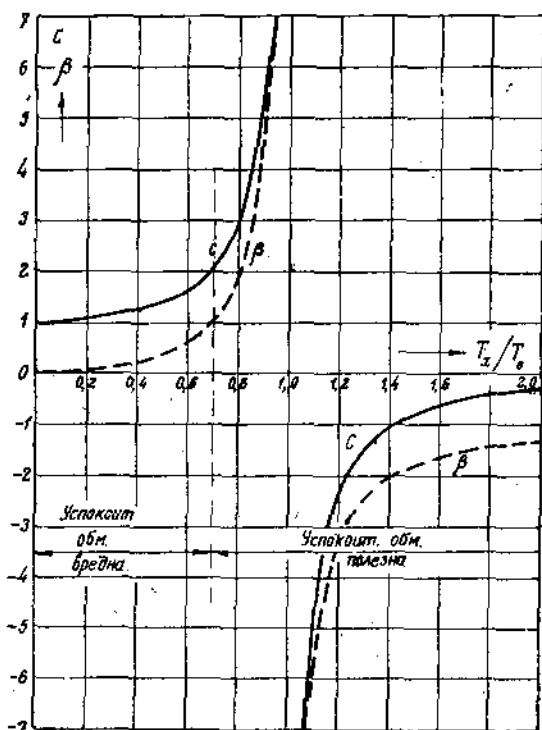
141*. Колебания электрической мощности генератора.

Будем для простоты пренебрегать потерями и считать электрическую (отдаваемую в сеть) мощность генератора равной электромагнитной мощности. При колебаниях скорости ротора вследствие изменения угла θ электромагнитная мощность генератора изменяется. В отсутствии успокоительной обмотки ($D=0$) на постоянную мощность P_{ϕ_0} , соответствующую равномерной скорости Ω_1 , накладывается переменная мощность, зависящая от изменения угла θ ; эта мощность выше была названа синхронизирующей (§ 113):

$$\Delta P_{\psi} = S\alpha\Omega_1. \quad (231)$$

При свободных колебаниях эта мощность (как и отклонение α , см. § 133) изменяется по синусоидальному закону. При вынужденных колебаниях эта мощность представляет собою сумму гармоник, соответствующих гармоникам вращающего момента первичного двигателя. Амплитуда каждой гармоники равна (ср. § 139):

$$\Delta P_{\psi x} = S\alpha_x' \Omega_1 = S\Omega_1 \frac{h_x}{Jx^2\Omega_1^2/p - S} = \frac{\Omega_1 h_x}{\left(\frac{T_0}{T_x}\right)^2 - 1} = \beta_x h_x \Omega_1, \quad (232)$$



где

$$\beta_x = \frac{1}{\left(\frac{T_0}{T_x}\right)^2 - 1}. \quad (233)$$

Таким образом, амплитуда гармоники электромагнитной мощности равна некоторой части β_x от соответствующей амплитуды гармоники вращающего момента первичного двигателя h_x . Кривая β_x представлена на рис. 202 в функции от T_x/T_0 .

Мощность первичного двигателя $M_x\Omega_1$, с одной стороны, переходит в кинетическую энергию вращающихся масс, с другой, — через синхронизирующую мощность передается в электрическую сеть. Для каждого момента времени можем написать

$$S\alpha_x' \Omega_1 = J\Omega \frac{d\Omega}{dt} -$$

$$- h_x \Omega_1 \cos(x\Omega_1 t - \gamma_x).$$

Рис. 202. Зависимость β_x и модуля резонанса c_x от отношения T_x/T_0 .

Величина колебаний электромагнитной мощности зависит от соотношения между моментом инерции и синхронизирующей силой; в некоторых случаях могут получиться колебания мощности между маховиком и сетью, когда колебания электромагнитной мощности становятся больше колебания мощности первичного двигателя ($\beta_x > 1$). В этом случае колебания происходят так же, как и в случае свободных колебаний, когда в период

ускорения электромагнитная мощность переходит в кинетическую энергию вращающихся масс, а в период замедления — отдается в сеть за счет уменьшения кинетической энергии (§ 130).

При наличии успокоительной обмотки к колебаниям синхронизирующей мощности добавляются колебания асинхронной мощности успокоителя (§ 115). Асинхронная мощность равна вращающему моменту успокоительной обмотки $D \frac{da}{dt}$ (§ 115), умноженному на угловую скорость Ω_1 ; следовательно, она пропорциональна скорости и максимум ее, как следует из формулы (225), отстает во времени на 90° от максимума синхронизирующей мощности. Амплитуда (максимум) асинхронной мощности равна:

$$D \frac{da}{dt} \Omega_1 = D \Omega_1 \frac{h_x \kappa \Omega_1}{V(D\kappa\Omega_1)^2 + (J\kappa^2\Omega_1^2/p - S)^2}; \quad (234)$$

здесь вместо $\frac{da}{dt}$ подставлено его выражение (см. § 139). Амплитуда синхронизирующей мощности при наличии успокоительной обмотки равна:

$$S a \Omega_1 = S \Omega_1 \frac{h_x}{V(D\kappa\Omega_1)^2 + (J\kappa^2\Omega_1^2/p - S)^2}. \quad (235)$$

Так как обе амплитуды во времени сдвинуты на 90° , то амплитуда полной колебательной мощности равна корню квадрату из суммы квадратов отдельных амплитуд:

$$\Delta P = \frac{V(D\kappa\Omega_1)^2 + S^2}{V(D\kappa\Omega_1)^2 + (J\kappa^2\Omega_1^2/p - S)^2} h_x \Omega_1 = \beta_x' h_x \Omega_1; \quad (236)$$

здесь

$$\beta_x' = \frac{V(D\kappa\Omega_1)^2 + S^2}{V(D\kappa\Omega_1)^2 + (J\kappa^2\Omega_1^2/p - S)^2}. \quad (237)$$

Наличие успокоительной обмотки, всегда уменьшая колебания ротора, не всегда уменьшает колебания электрической мощности. При бесконечно большом затухании ($D = \infty$), подставляя в формулу (237) $D = \infty$ и раскрывая неопределенность, получаем $\beta_x' = 1$. При уменьшении D коэффициент β_x' изменяется и при $D = 0$ равен:

$$\beta_x = \frac{1}{\left(\frac{T_0}{T_s}\right)^2 - 1}. \quad (233a)$$

Изменение β_x' происходит монотонно, т. е. в одну сторону, без промежуточных максимумов и минимумов.¹⁾ Если при $D = 0$ (в отсутствии успокоительной обмотки) $\beta_x > 1$, то, применяя успокоительную обмотку, всегда получим уменьшение β_x' (а следовательно, уменьшение колебаний мощности); в предельном случае ($D = \infty$) получаем $\beta_x' = 1$, т. е. колебания электрической мощности становятся равными колебаниям мощности первичного двигателя. Если при $D = 0$ имеем $\beta_x < 1$ (колебания электрической мощности меньше колебаний мощности первичного двигателя), то наличие успокоителя увеличивает колебания электрической мощности; в пределе ($D = \infty$) снова получим $\beta_x' = 1$, т. е. колебания электрической мощности станут равными колебаниям мощности первичного двигателя. Объясняется это тем, что в этом случае успокоительная обмотка сильно уменьшает

¹⁾ R. Richter. Elektrische Maschinen, т. II, Berlin, 1930.

колебания скорости ротора, поэтому избыточная мощность первичного двигателя не может аккумулироваться в кинетическую энергию вращающихся масс, а целиком переходит в электрическую мощность. Вследствие этого при $\beta_x < 1$, т. е. при $T_x/T_0 < 1/\sqrt{2}$ (см. формулу 233) успокоительная обмотка не применяется.

142*. Влияние маховика на колебания ротора синхронного генератора.

а) В работающем в одиночку генераторе, приводимом во вращение поршневым двигателем, амплитуда колебаний ограничивается исключительно моментом инерции ротора J . Последний в формулах часто заменяют пропорциональным ему маховым моментом $G D_r^2 = 4gJ$, где G — вес ротора в килограммах, D_r — диаметр инерции ротора в метрах, g — ускорение силы тяжести ($9,81 \text{ м/сек.}^2$). Необходимый маховой момент можно сосредоточить в самом роторе — роторы маховичного типа (§ 223) — или в отдельном маховике. При абсолютно жестком вале обе эти конструкции равноценны в смысле уменьшения колебаний. В действительности вал обладает упругостью и поэтому подвержен так называемым крутильным колебаниям. Явление крутильных колебаний состоит в том, что при колебаниях ротора вокруг положения равновесия сидящий на том же валу маховик колеблется с тем же периодом, но колебания его отстают по фазе от колебаний ротора. Поэтому относительное движение ротора и маховика происходит в разные стороны, и участок вала, находящийся между ротором и маховиком, скручивается то в одну, то в другую сторону. Крутильные колебания оказывают влияние на колебания ротора генератора и при условии резонанса могут увеличивать последние. Кроме того, крутильные колебания могут вызвать поломку вала.

В случае двух вращающихся масс на валу, оси которых расположены на расстоянии l (в метрах), обе массы будут колебаться в разные стороны относительно некоторой остающейся неподвижной (узловой) плоскости сечения вала, перпендикулярного к оси.¹⁾ Для свободных крутильных колебаний, т. е. в отсутствии вынуждающей силы можно составить два уравнения (пренебрегая сопротивлениями):

$$\left. \begin{aligned} J_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + \frac{J_p \sigma}{l} (\varphi_1 - \varphi_2) &= 0 \\ J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + \frac{J_p \sigma}{l} (\varphi_2 - \varphi_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (238)$$

здесь J_1 и J_2 — моменты инерции первой и второй вращающейся массы в $\text{кгм}^2 \times \text{сек.}^2$, φ_1 и φ_2 — угол закручивания вала в радианах, отсчитанный для каждой массы от начального положения (относительного узлового сечения вала), $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$ — полярный момент инерции вала в м^4 , d — диаметр вала в м , σ — модуль скольжения материала вала в кг/м^2 (для стали $\sigma \approx 850 \times 10^7 \text{ кг/м}^2$). Решая эти уравнения совместно, получаем период свободных крутильных колебаний вращающихся масс относительно узловой плоскости сечения вала:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{J_1 J_2 l}{\sigma J_p (J_1 + J_2)}} \quad (239)$$

¹⁾ С. П. Тимошенко и Дж. Лессельс. Прикладная теория упругости. Ленинград.

Если вал имеет неодинаковый диаметр по длине, то его заменяют эквивалентным валом, имеющим одинаковый диаметр, например, диаметр d_1 , и длину

$$l = l_1 + l_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 + l_3 \left(\frac{d_1}{d_3} \right)^4 + \dots; \quad (240)$$

здесь l и d с соответствующими индексами — длины и диаметры отдельных участков вала.

Если между взаимными колебаниями вращающихся масс и одной из гармоник вращающего момента первичного двигателя получается резонанс ($T_s = T_x$), то амплитуда колебаний ротора значительно возрастает, теоретически становясь равной бесконечности (ср. § 139). Для избежания этого необходимо изменить период крутильных колебаний вала, изменяя его диаметр.¹⁾

б) При параллельной работе генераторов на общую сеть необходимо избегать резонанса крутильных колебаний с каждым из возможных свободных колебаний генераторов (§ 134).

143*. Применение успокоительной обмотки.

Для увеличения затухания колебаний часто применяют успокоительную, или демпферную, обмотку (§ 114).

Амплитуда вынужденных колебаний при наличии успокоительной обмотки равна (§ 139):

$$\alpha_{\max} = \sum \frac{h_x}{\sqrt{(Dx\Omega_1)^2 + (Jx^2\Omega_1^2/p - S)^2}}. \quad (241)$$

Как видно из этого выражения, успокоительная обмотка при надлежаще выбранном D делает возможной работу даже при условии резонанса (§ 139) и позволяет уменьшить вес маховика. Полное уничтожение механических колебаний, однако, вредно. Маховик увеличивает свою кинетическую энергию в период ускорения (избытка мощности первичного двигателя) и расходует ее в период замедления, чем выравнивает мощность первичного двигателя. В отсутствии же механических колебаний изменения мощности первичного двигателя не будут выравниваться маховиком, а посредством потока успокоительной обмотки передаются на статор и вызывают колебания электрической мощности генераторов (§ 141). Эти колебания должны покрываться за счет других машин, что вызовет нежелательные уравнительные токи между ними. Поэтому при $T_x/T_0 < 1/\sqrt{2}$ или, что то же, при модуле резонанса $c_x < 2$ применение успокоительной обмотки вредно (§ 141).

В случае свободных колебаний успокоительная обмотка обуславливает их затухание. Логарифмический декремент колебания (§ 133) равен:

$$\delta_k = \frac{DTp}{4J}; \quad (202a)$$

здесь T — период свободных колебаний; он зависит от параметров успокоительной обмотки, хотя практически этим можно пренебречь (§ 135). Обмотку рассчитывают обычно так, чтобы получить $\delta_k \geq 0,4 \div 0,5$.

¹⁾ Подсчет периода крутильных колебаний для случая трех и более вращающихся масс см.: 1) С. Н. Тимошенко и Дж. Лессельс. Прикладная теория упругости. Ленинград; 2) Н. М. Пинес. Мигание света в электрических сетях вследствие крутильных колебаний роторов электрических машин. Э. 1931, № 4, стр. 193.

144*. Несинхронное включение синхронных машин на параллельную работу.

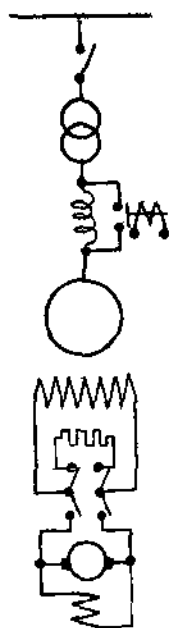


Рис. 203. Включение синхронной машины через реактивную катушку.

Для ускорения включения синхронных машин на параллельную работу в последнее время применяют иногда включение без синхронизации (§ 127). Включение производится следующим образом: доводят скорость вращения машины до значения, близкого к синхронному (желательно, чтобы скорость отличалась от синхронной не более, чем на $1 \div 1,5\%$), дают ток возбуждения, соответствующий э. д. с., равной $10 \div 20\%$ от напряжения сети, и приключают к сети через реактивную катушку (рис. 203). По включении машины уравнение движения ее может быть написано в обычном виде (§ 119):

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S\alpha = 0. \quad (191b)$$

Так как до включения машина вращалась с равномерной скоростью, то вращающий момент первичного двигателя равнялся моменту сопротивления, а потому в уравнение не входит. Решается это уравнение обычным способом (§ 133); постоянные интегрирования определяются, исходя из условия, что начальный угол отклонения (в момент включения) равен α_0 ,

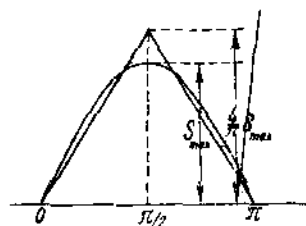


Рис. 204. Замена синусоиды эквивалентным треугольником.

а начальная скорость равна $\frac{d\alpha}{dt} = \omega_0$. В этом случае получаем

$$C_1 = \frac{2J\omega_0[p + D\alpha_0]}{\sqrt{4SJ/p - D^2}}; \quad C_2 = \alpha_0. \quad (242)$$

Подставляя эти значения в решение уравнения (191b), получаем

$$\alpha = \varepsilon^{-\frac{Dp}{2J}t} \sqrt{\frac{4Jp(J\omega_0^2/p + D\omega_0\alpha_0 + S\alpha_0^2)}{4SJ/p - D^2}} \sin\left(\sqrt{\frac{4SJ/p - D^2}{2J}}t + \eta\right); \quad (243)$$

здесь

$$\eta = \arctg \frac{\alpha_0 \sqrt{4SJ/p - D^2}}{2J\omega_0/p + D\alpha_0}.$$

Уравнение (191b) справедливо лишь для малых колебаний ($\alpha < 25^\circ$, § 133). При несинхронном включении α может доходить до 180° . Поэтому в последнем случае правильное уравнение писать в следующем виде, не разлагая электромагнитную мощность в ряд Тейлора:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S_{\max} \sin \alpha = 0; \quad (244)$$

здесь

$$S_{\max} = \frac{mE_Q U}{9,81 \Omega \tau} \text{ кгм};$$

угол $\alpha = \theta$ (§ 133); $\frac{d^2 \alpha}{dt^2}$ и $\frac{d\alpha}{dt}$ представляют собою ускорение и скорость изменения угла θ . Так как решение уравнения (244) сложно, то для

упрощения можно синусоиду $S_{\max} \sin \alpha$ заменить через треугольник (рис. 204), высота которого равна $\frac{4}{\pi} S_{\max} = 1,27 S_{\max}$. Тогда для углов $-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}$ уравнение (244) имеет вид:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D \frac{d \alpha}{dt} + \frac{1,27}{\pi/2} S_{\max} \alpha = 0, \quad (245)$$

а для углов $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{2}$:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D \frac{d \alpha}{dt} + \frac{1,27}{\pi/2} S_{\max} (\pi - \alpha) = 0. \quad (246)$$

Решение этих уравнений то же самое, что и для уравнения (191b), лишь вместо S необходимо в формулу (243) подставить $S_1 = \frac{1,27}{\pi/2} S_{\max} = 0,812 S_{\max}$ а при $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{2}$ взять вместо α угол $\gamma = \pi - \alpha$.

Начальную скорость ω_0 можно выразить через скольжение $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, где n_1 — синхронная скорость вращения потока статора, n_2 — скорость вращения ротора; начальная скорость $\omega_0 = 2 \pi \nu$ эл. радиан/сек., где ν — частота тока; если s выражено в процентах, то указанное выражение надо разделить на 100.

Если включение машины в сеть происходит в неблагоприятный момент времени, когда $\alpha_0 = 180^\circ$, то через машину в момент включения пройдет ток, равный двойному значению ударного тока короткого замыкания (§ 194). Для уменьшения толчка тока при включении применяют реактивную катушку и понижают э. д. с. включаемой машины. Если э. д. с. машины равна $v^0/0$ от номинального напряжения, то значение тока включения равно $1 + \frac{v^0/0}{100}$ от ударного тока вместо двойного значения. При сопротивлении реактивной катушки x_r ток включения (ср. § 186) равен:

$$I_{so} = \left(1 + \frac{v^0/0}{100}\right) \frac{1,8\sqrt{2}U}{x_s + x_r}, \quad (247)$$

где x_s — сопротивление рассеяния генератора, U — напряжение сети. Обычно допустим ток включения, равный тройному значению амплитуды номинального тока. Отсюда необходимое сопротивление реактивной катушки:

$$x_r = \frac{1,8(1 + v^0/0/100)}{3} - x_s. \quad (248)$$

Для быстрого втягивания в синхронизм необходимо иметь большое значение успокоительного момента и синхронизирующей силы. Поэтому успокоительная обмотка должна выполняться с высоким активным сопротивлением по сравнению с реактивным. Необходимо иметь в виду, что включение реактивной катушки одновременно с понижением тока включения понижает успокоительный момент, величина которого пропорциональна квадрату напряжения, и понижает синхронизирующую силу, пропорциональную напряжению. Уменьшение возбуждения на величине успокоительного момента не сказывается, синхронизирующая сила уменьшается с уменьшением возбуждения.

На рис. 205 представлены кривые колебаний ротора в случае включения при $\alpha_0 = 0$, а на рис. 206 — при $\alpha_0 = 180^\circ$. Кривые вычислены по уравнению (243). Данные генератора: $P = 33\,000$ kW, $n = 3000$ об./мин., $p = 1$, $GD_2^2 = 7260$ кг $\times$ м ^{2} , $J = 184$ кг $\times$ сек. ^{2} .

Успокоительный момент при полном напряжении вычислен по формуле (178) и равен $D = 1138 \text{ кгм} \times \text{сек.}$; синхронизирующая сила равна $S_{\max} = 7500 \text{ кгм}$ (вычислена по формуле 205, в предположении $\cos \theta_1 = 1$, $f_k = I_k/I_N = 0,7$); скольжение $s = 1\%$, откуда $\omega_0 = \pi$ радиан/сек.; ударный ток включения для всех кривых $I_{30} = 3\sqrt{2}I_N$; реактивное сопротивление рассеяния генератора $x_s = 15\%$. Значения э. д. с. $v\%$, сопротивления реактивной катушки x_r и соответствующие им значения D и $S_{\max}$ в процентах от D и $S_{\max}$, получающихся при номинальной э. д. с. и отсутствии реактивной катушки, указаны на рисунках.

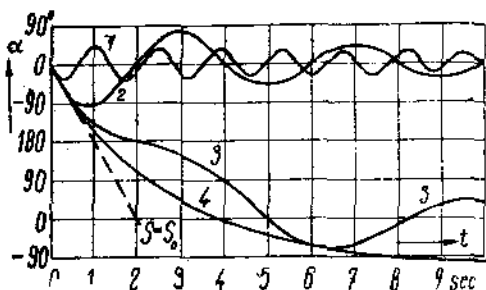


Рис. 205. Влияние возбуждения и сопротивления реактора на колебания при включении в момент времени, соответствующий $\alpha_0 = 0$: 1) $v = 100\%$; $x_r = 7x_s$; $D = 1,34\%$; $S_{\max} = 60\%$; 2) $v = 100\%$; $x_r = 3,4x_s$; $D = 5,2\%$; $S_{\max} = 22,8\%$; 3) $v = 3\%$; $x_r = 3,12x_s$; $D = 5,9\%$; $S_{\max} = 2,9\%$; 4) $v = 0$; $x_r = 3x_s$; $D = 6,25\%$; $S_{\max} = 0$.

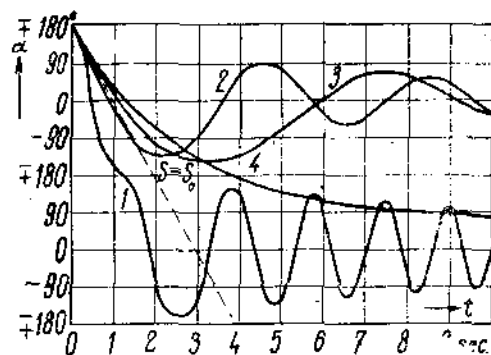


Рис. 206. Влияние возбуждения и сопротивления реактора на колебания при включении в момент времени, соответствующий $\alpha_0 = 180^\circ$. Значения v , x_r , D и $S_{\max}$ те же, что и на рис. 205.

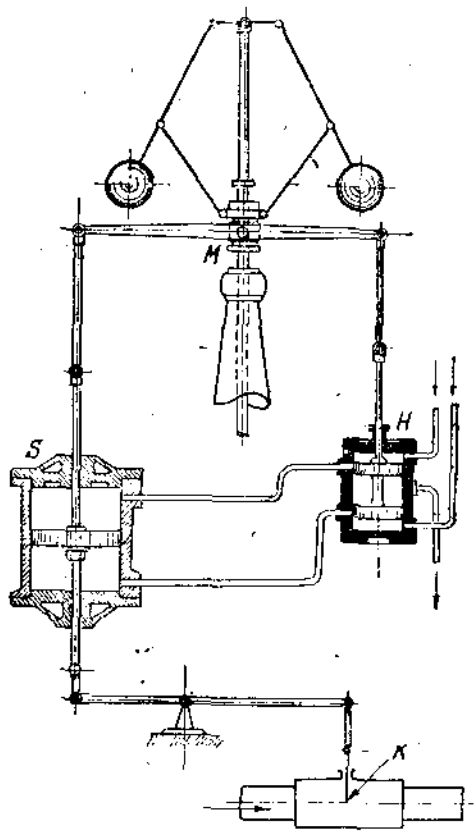


Рис. 207. Схема непрямого регулирования: M — муфта, H — золотник, S — сервомотор, K — впускной клапан.

С целью уменьшения толчков тока и мощности при включении применяют автоматическое включение при помощи реле, производящих замыкание масляного выключателя в момент времени, близкий к совпадению э. д. с. ($\alpha_0 \approx 0$); точной синхронизации все же не требуется, поэтому продолжительность включения значительно меньше, чем при точной синхронизации. ¹⁾

¹⁾ Литература: 1) W. Peters. Neue Verfahren zum Synchronisieren von Synchronmaschinen und Synchronkraftwerken. S.-Z. 1929, стр. 163, 240; 2) H. Rengier. Grobsynchronisierung leerlaufender Turbogeneratoren. AEG-Mitt. 1931, стр. 426; 3) W. Peters. Schnellsynchronisierung grosser Maschineneinheiten. E.T.Z. 1931, стр. 753; 4) G. Meiners. Grobsynchronisierung von Synchronmaschinen mit dem Stern Dreieckschalter. E. u. M. 1932, стр. 441.

145*. Характеристики регуляторов скорости первичных двигателей.

Регуляторы скорости первичных двигателей основаны обычно на действии центробежных сил и состоят из масс, вращающихся вокруг оси со скоростью, пропорциональной скорости машины. Центробежные силы, развиваемые этими массами, действуют на муфту, управляющую непосредственно (прямое регулирование) или через промежуточные механизмы (непрямое, или косвенное, регулирование) впускными клапанами первичного двигателя. При помощи статических сил, создаваемых силой веса или натяжением пружин, муфта удерживается в определенном положении равновесия; последнее, очевидно, зависит от величины центробежной силы, другими словами, от скорости вращения. На рис. 207 изображена схема непрямого регулирования. Обычно величина открытия впускного клапана пропорциональна положению муфты. Вследствие этого получается зависимость мощности от положения муфты или, другими словами, зависимость скорости от величины нагрузки (рис. 208); приближенно эту зависимость можно принять за прямую, тогда мощность равна (§ 117):

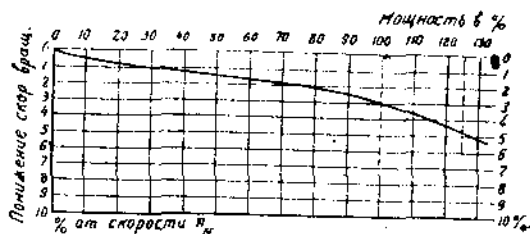


Рис. 208. Характеристика регулятора паровой турбины.

$$P_d = P_N - \frac{P_N}{\delta_r \Omega_N} (\Omega - \Omega_N); \quad (183a)$$

здесь P_N и Ω_N — номинальные мощность и угловая скорость, Ω — переменная угловая скорость; δ_r — степень неравномерности регулятора (§ 117):

$$\delta_r = \frac{\Omega_0 - \Omega_N}{\Omega_N} = \frac{n_0 - n_N}{n_N}. \quad (181a)$$

В специальных изодромных регуляторах добавочные механизмы после изменения мощности снова доводят скорость вращения до прежней величины; в них зависимость между скоростью и нагрузкой представляет собою горизонтальную прямую. Полная изодромность, несмотря на получающееся при этом постоянство частоты синхронного генератора при разных нагрузках, при параллельной работе все же не желательна, так как распределение нагрузок между синхронными машинами не будет равномерным, а будет зависеть от случайных причин; может получиться сброс нагрузки с одних машин за счет перегрузки других. При падающей характеристике регулятора каждому значению скорости соответствует вполне определенная мощность, благодаря чему при соответствующем подборе характеристик регуляторов (рис. 209) можно получить распределение нагрузок, пропорциональное мощностям отдельных машин.

Практически, вследствие неизбежной игры и трения в регуляторе, передаточных и распределительных механизмах, скорость машины при одной и той же мощности может изменяться в пределах от Ω' до Ω'' , причем регулятор остается к этим изменениям нечувствителен. Коэффициент

$$\epsilon = \frac{\Omega' - \Omega''}{\Omega_1}, \quad (249)$$

где $\Omega_1 = (\Omega' + \Omega'')/2$ — среднее значение скорости, носит название коэффициента нечувствительности регулятора. Характеристика регулятора в этом случае изображается двумя кривыми, между которыми лежит область нечувствительности регулятора. Вследствие этого равномерное распределение нагрузки при параллельной работе нарушается, так как одинаковой скорости могут соответствовать разные мощности P_1 и P_2 (рис. 210). Разность между ними тем меньше, чем больше наклон характеристики. Равномерное распределение нагрузок можно получить и в этом случае, если подобрать характеристики так, чтобы совпадали кривые $\Omega_{\min}$ одной машины и $\Omega_{\max}$ другой.

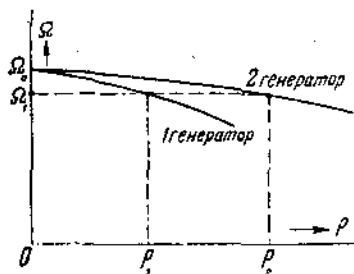


Рис. 209. Распределение нагрузки между параллельно работающими машинами.

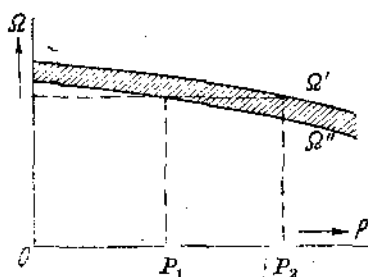


Рис. 210. Характеристика регулятора с большой степенью нечувствительности.

Если скорость первичного движения неравномерна за один оборот (поршневые машины), причем степень неравномерности машины равна:

$$\delta = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega_1}, \quad (208a)$$

то регулятор скорости не должен отзываться на эти изменения скорости; для этого необходимо условие:

$$\varepsilon > \delta.$$

Общая степень неравномерности регулятора

$$\Delta = \delta_r + \varepsilon. \quad (250)$$

В обычно применяемых регуляторах: 1) для паровых турбин $\delta_r = 2 \div 5\%$, $\varepsilon = 0,5 \div 1,0\%$, 2) для гидравлических двигателей $\delta_r = 2\%$, $\varepsilon = 0,3 \div 0,5\%$, 3) для поршневых машин $\Delta = \varepsilon > \delta$, обычно $\Delta = 4 \div 6\%$.

Существуют регуляторы, в которых отсутствуют вращающиеся массы, подверженные центробежным силам. Регулирование в них производится посредством изменения давления масла; давление создается специальным насосом, сидящим на конце вала турбины, и зависит от скорости вращения турбины.¹⁾

Все указанные выше типы регуляторов начинают действовать при изменении скорости машины, вследствие чего получают большие изменения скорости при колебаниях нагрузки (§ 147). В последнее время предложены регуляторы, начинающие действовать при возникновении ускорения машины;²⁾ изменения скорости при них получают незначительными.

¹⁾ T. E. Purcell. Load Dump Tests Made on Colfax Turbines. Power, апрель, 1929, стр. 590, 627.

²⁾ L. Barbillion. Le problème de la régulation des groupes électrogènes en parallèle au cours d'une perturbation. R. G. E., апрель 1930, стр. 575, 623.

146*. Процесс регулирования.

Исследуя уравнение сил, действующих на регулятор, ¹⁾ можно вывести следующие заключения.

1) При выведении муфты регулятора на величину x из положения равновесия, соответствующего некоторой скорости Ω , на муфту начинает действовать сила ΔF , пропорциональная x и стремящаяся вернуть ее в положение равновесия.

2) При всяких изменениях скорости, вызываемых изменениями нагрузки, на муфту регулятора начинает действовать сила, передвигающая ее в положение, соответствующее новой нагрузке; вследствие инерции муфта не останавливается в новом положении равновесия, а проходит дальше на величину x ; при этом появляется сила ΔF , пропорциональная x , вследствие чего муфта начинает совершать колебательные движения вокруг нового положения равновесия.

Перемещения муфты пропорциональны изменениям мощности первичного двигателя, поэтому на синхронный генератор будет действовать вынуждающая сила, заставляющая его колебаться. В отсутствии затухания колебаний регулятора получаются незатухающие колебания генератора, амплитуда которых постепенно увеличивается. Поэтому абсолютно чувствительный регулятор (не обладающий трением и другими силами сопротивления) неприменим; регулятор должен иметь сопротивление движению для того, чтобы колебания его затухали. Сопротивление создается давлением масла на поршни в цилиндрах (рис. 207); величина его обычно пропорциональна скорости движения муфты.

Решение задачи о совместном движении регулятора и двигателя сложно. Сущность явления заключается в следующем. Пусть нагрузка генератора в некоторый момент времени уменьшилась на величину ΔP_1 . Скорость генератора и первичного двигателя увеличивается на величину $\Delta \Omega_1$ и на муфту начинает действовать сила, передвигающая ее вверх. Муфта при этом движении прикрывает впускной клапан.

Если бы муфта и регулирующие органы первичного двигателя мгновенно следовали изменению скорости, а регулятор не обладал бы инерцией, то одновременно с изменением скорости на величину $\Delta \Omega_1$ муфта пришла бы в новое положение равновесия, мощность генератора уменьшилась бы на величину ΔP_1 , а соответствующая новому положению муфты скорость была бы больше первоначальной на величину $\Delta \Omega_1$. В действительности, вследствие сопротивлений и трения в механизмах, муфта движется с замедлением и приходит в новое положение равновесия на время t_1 позже, чем скорость генератора достигнет значения, соответствующего новому положению равновесия муфты. К этому времени добавляется время t_2 , которое проходит между моментом времени, когда муфта достигает определенного положения равновесия, и моментом времени, когда мощность первичного двигателя достигнет значения, соответствующего этому положению муфты. Суммарное время $t_0 = t_1 + t_2$ называется временем запаздывания действия регулятора. В течение времени запаздывания регулятор не производит изменения мощности первичного двигателя, а потому последний продолжает двигаться с ускорением и получает новое приращение скорости $\Delta \Omega_2$. По истечении времени t_1 муфта приходит в новое положение равновесия, но не останавливается в нем, а продолжает двигаться дальше по двум причинам: 1) она пришла в это

¹⁾ De Marchena. Influence des régulateurs sur le fonctionnement en parallèle et description d'un nouveau système de commande de ces régulateurs. Bull. Soc. Intern. Electr., 1902, т. 2, стр. 754.

положение с некоторой скоростью, а следовательно, проходит его в силу инерции; 2) по достижении муфтой нового положения равновесия двигатель имеет скорость большую, чем соответствует этому положению вследствие добавочного приращения скорости $\Delta\Omega_2$,

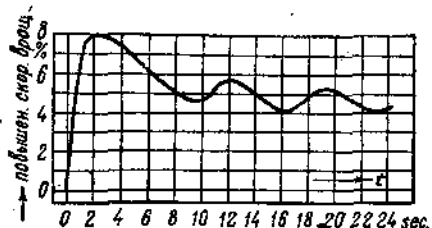


Рис. 211. Изменение скорости синхронного генератора при сбросе нагрузки.

а потому на муфту действует добавочная сила, заставляющая муфту двигаться дальше. Муфта продолжает закрывать впускной клапан; в результате мощность первичного двигателя становится меньше, чем соответствует нагрузке, и двигатель станет замедляться. Муфта начнет двигаться вниз, приближаясь к положению равновесия, но снова проходит его, и т. д. Очевидно, что эти колебания муфты для правильной работы машины должны быть затухающими.

На рис. 211 изображена кривая колебаний скорости синхронного генератора при сбросе нагрузки.¹⁾

147*. Влияние регуляторов скорости на параллельную работу синхронных машин.

В изолированно работающем генераторе колебания скорости, вызванные регулятором, не могут принять опасных размеров, если только регулятор обладает достаточным затуханием. При параллельной работе синхронных машин колебания самого регулятора могут оказаться в резонансе с собственными колебаниями синхронных машин, что повлечет за собой сильное увеличение амплитуды колебаний. Поэтому необходимо избегать резонанса, причем лучше иметь период собственных колебаний регулятора меньше, чем период колебаний генераторов, так как в противном случае медленные колебания скорости, вызванные регулятором, очень трудно сделать затухающими. Наблюдения показывают,²⁾ что если регулятор имеет очень большую частоту колебаний, при том сопровождающихся соответственными изменениями открытия впускного клапана, то это все же может не оказывать влияния на изменения мощности (а следовательно, и скорости вращения) генератора, если последний обладает достаточным моментом инерции. Практически резонанс колебаний регулятора и машин наблюдается очень редко.

Для того, чтобы регулятор начал действовать при изменениях нагрузки, требуется изменение скорости. Для уменьшения изменений скорости необходима большая чувствительность регулятора, т. е. малое время запаздывания t_0 (§ 146); однако, слишком чувствительный регулятор способен создать собственные колебания; для уничтожения их надо увеличивать успокоение регулятора, что увеличивает t_0 . Для удовлетворения этим противоречивым требованиям необходимо иметь малый момент инерции регулятора (пружинные регуляторы), малый ход муфты, малое трение (оба последние условия осуществимы при косвенном регулировании через сервомотор). При выполнении указанных условий можно для избежания колебаний регулятора сделать большое успокоение, без опасности сильно

¹⁾ K. Kühn, Versuche über Maschinenregelung und Parallelbetrieb in der Grosskraftwerken Hirschfelde und Böhlen. Teil II, E.T.Z. 1931, стр. 1215, 1270.

²⁾ T. E. Purcell and A. P. Hayward. Operating Characteristics of Turbine Governors J. A. I. E. E. 1930, стр. 366.

увеличить t_0 . Инерция регулятора играет некоторую полезную роль, так как препятствует быстрым и большим изменениям скорости при внезапных изменениях нагрузки.

Для паровых турбин время затаздывания при полном сбросе нагрузки $t_0 = 2 \div 3$ сек., в позднейших конструкциях регуляторов и паровпускных вентилей это время доведено до 1 сек. Для гидравлических турбин $t_0 = 3 \div 10$ сек. В поршневых двигателях очень большую чувствительность регулятора иметь нельзя (§ 145); необходимо, кроме того, избегать значений t_0 , равных $T_0/2$, $3T_0/2$, $5T_0/2$ и т. д., где T_0 — период собственных колебаний генераторов для того, чтобы не получить так называемых самовозбуждающихся колебаний.¹⁾

¹⁾ F. Reinhardt. Selbsterregte Schwingungen bei Parallelbetrieb von Synchronmaschinen. S.-Z. 1925, стр. 431.

ГЛАВА X.

СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ.

148. Принцип действия трехфазного синхронного двигателя.

Синхронный двигатель, как и синхронный генератор, состоит из статора, снабженного трехфазной обмоткой, и ротора с обмоткой возбуждения постоянного тока. Если в статоре ток отсутствует, а ротор создает магнитный поток, то ротор может оставаться в покое в любом положении по отношению к статору (рис. 212, *a*). Пропустим по обмотке фазы *A* статора постоянный ток. Под влиянием этого тока поток полюсов искажится (рис. 212, *b*), так как ток статора создает свои магнитные линии. Вследствие бокового распора магнитных линий проводники *A* с током испытывают электромагнитную силу, направленную в правую сторону (§ 7), вследствие чего обмотка *A* стремится сдвинуться вправо. Так как, однако, обмотка статора укреплена неподвижно, а обмотка ротора может вращаться вместе с ротором, то под влиянием распора магнитных линий ротор повернется в левую сторону и станет по оси потока фазы *A* (рис. 212, *c*). В этом положении поток относительно оси полюсов симметричен, и односторонний распор магнитных линий отсутствует. Если теперь выключить ток из фазы *A* и включить в фазу *B*, то повторится то же явление и ротор повернется еще на угол 60° . Таким образом, при пропускании по фазной обмотке статора постоянного тока обмотка возбуждения вместе с ротором будет всегда устанавливаться по оси фазной обмотки, или, другими словами, по направлению потока статора.

Пропуская по трем фазам обмотки статора трехфазный ток, получим результирующий поток. Обмотку статора, питаемую трехфазным током, в любой момент времени можно заменить катушкой, ось которой направлена по оси потока статора (рис. 213); от катушки, питаемой постоянным током, она отличается лишь тем, что в средних витках ток имеет большее значение, а в крайних—меньшее. Вследствие искажений потока ротора, вносимых током статора, ротор будет стремиться всегда стать по оси катушки. Так как ток статора переменный, то поток статора, а следовательно, и ось катушки, образуемой обмоткой статора, вращаются в пространстве со скоростью

$$n = \frac{60\nu}{p}, \quad (29a)$$

соответствующей частоте тока ν (§§ 24, 70). Соответственно этому будет вращаться с той же скоростью и ротор.

Из этого механизма явлений в синхронном двигателе следуют два важных вывода: во-первых, что ротор синхронного двигателя может вращаться только синхронно с потоком статора, и, во-вторых, что синхронный двигатель без специальных пусковых устройств не может быть приведен во вращение простым включением в сеть.

Докажем, что ротор может вращаться только синхронно с потоком статора (иметь одинаковую с ним скорость). Действительно, пусть скорость вращения потока статора больше скорости ротора. Пока положение

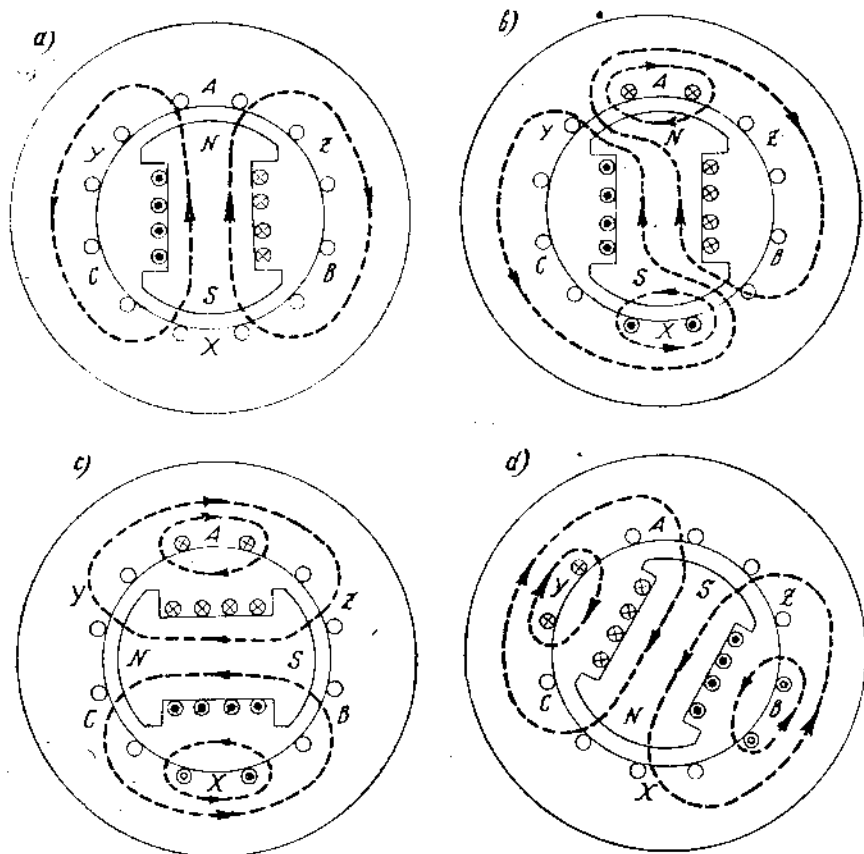


Рис. 212. Синхронный двигатель.

ние ротора относительно потока статора имеет вид, указанный на рис. 214, а, на ротор действует сила, вращающая его влево. Когда поток статора, вращаясь быстрее ротора, опередит ротор на угол, больший 90° , эта сила станет действовать вправо (так как поток ротора всегда сохраняет свое направление, вследствие возбуждения постоянным током). Ротор начнет замедляться. После поворота потока статора относительно ротора на 180° , электромагнитная сила снова будет действовать влево и т. д. Среднее значение электромагнитной силы за один оборот ротора будет равно нулю, поэтому ротор остановится. Вращение синхронного двигателя возможно только в том случае, если сила, действующая на ротор, сохраняет все время свой знак, что будет только при синхронной скорости.

Таким образом, синхронный двигатель может развивать вращающий момент только при синхронной скорости полюсов и потока статора. Если скорости их отличаются друг от друга, то вращающий момент имеет пульсирующий характер, причем среднее значение момента за один оборот ротора равно

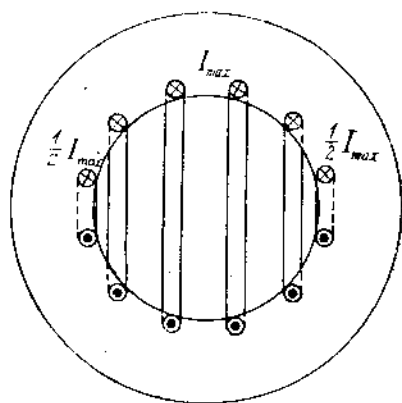


Рис. 213. Замена трехфазной обмотки эквивалентной катушкой.

нулю. Вследствие этого непосредственный пуск синхронного двигателя от сети без специальных пусковых устройств невозможен. При приключении двигателя к сети магнитный поток статора получает сразу полную скорость вращения $n = 60/p$. Для того чтобы вращающий момент получился направленным все время в одну сторону, ротор должен за время поворота потока на угол 180 эл. градусов получить полную скорость, так как в противном случае вращающий момент станет пульсирующим. За такое короткое время (равное $t_1 = 60/2pn = 1/100$ секунды) ротор вследствие инерции не может получить столь большой скорости, а потому останется в покое. Поэтому для пуска синхронного двигателя в ход необходимы специальные пусковые устройства (§ 160).

Из предыдущих рассуждений ясно, что если ось потока статора и ось ротора (а следовательно, и ось результирующего потока междужелезного пространства) совпадают, то бокового распора магнитных линий нет и на ротор не действуют электромагнитные силы. Сила на ротор действует только в том случае, если ось его отстает от оси потока междужелезного пространства на некоторый угол θ . Чем больше сопротивление движению ротора, тем больше, очевидно, будет отставание оси ротора от оси потока междужелезного пространства (§ 152). Точно так же ясно, что вращение ротора возможно только при условии $\theta < 90^\circ$; при $\theta > 90^\circ$ сила действует в сторону замедления вращения ротора.

Мы рассматривали работу синхронного двигателя с явно выраженными полюсами. Работа двигателя с цилиндрическим ротором ничем не отличается от рассмотренной. Работа многополюсного двигателя протекает так же, как и двухполюсного. Число полюсов ротора всегда равно числу полюсов потока статора, поэтому каждый полюс ротора стремится стать по оси потока статора соответствующего полюсного деления.

149. Диаграммы напряжения синхронного двигателя.

Как и в генераторе, результирующий поток междужелезного пространства синхронного двигателя представляет собою геометрическую сумму

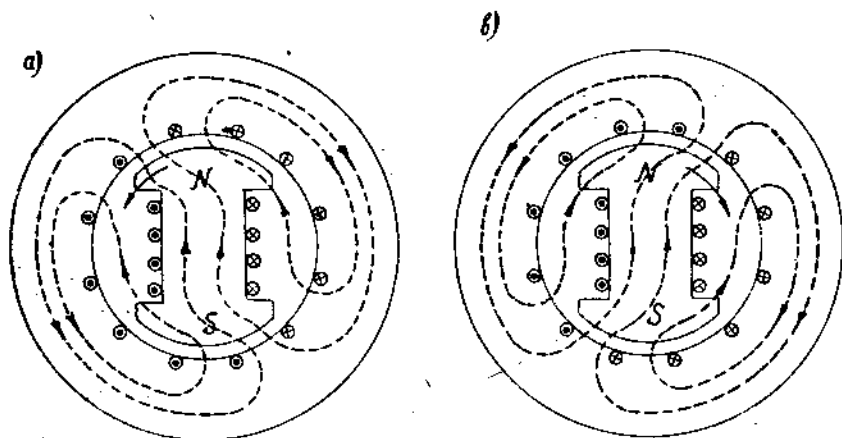


Рис. 214. К пояснению синхронного вращения двигателя.

потока полюсов и потока реакции статора. Этим результирующим потоком индуктируется в обмотке статора э. д. с. В генераторе активный ток имеет одинаковое направление с э. д. с. В двигателе активный ток и э. д. с. противоположны друг другу. При работе двигателя по обмотке статора проходит ток; рассмотрим общий случай, когда ток отстает от напряжения сети на некоторый угол φ . При указанном на рис. 214, а

направлении тока в статоре и потока полюсов ротор вращается в левую сторону; при вращении ротора магнитный поток между железного пространства пересекает обмотку статора; не трудно убедиться по правилу правой руки (§ 5), что э. д. с. направлена навстречу току, а следовательно, и навстречу приложенному к двигателю напряжению. На рис. 215

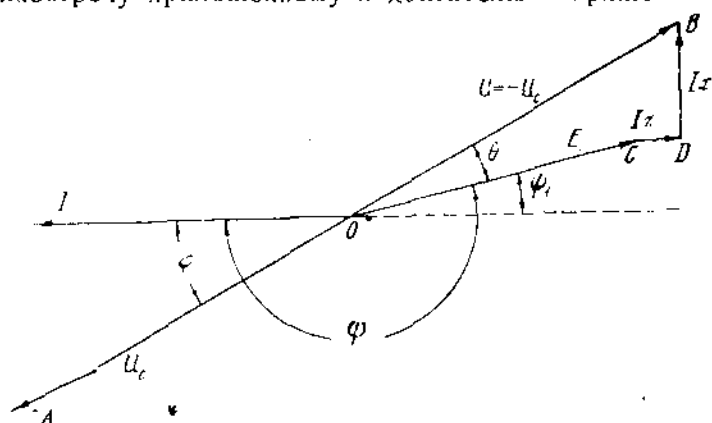


рис. 215. Диаграмма Бен-Эшенбурга для синхронного двигателя.

изображена диаграмма Бен-Эшенбурга для двигателя. Ток I отстает от напряжения сети $U_c = \overline{OA}$ на угол φ . Напряжение сети U_c уравновешивается

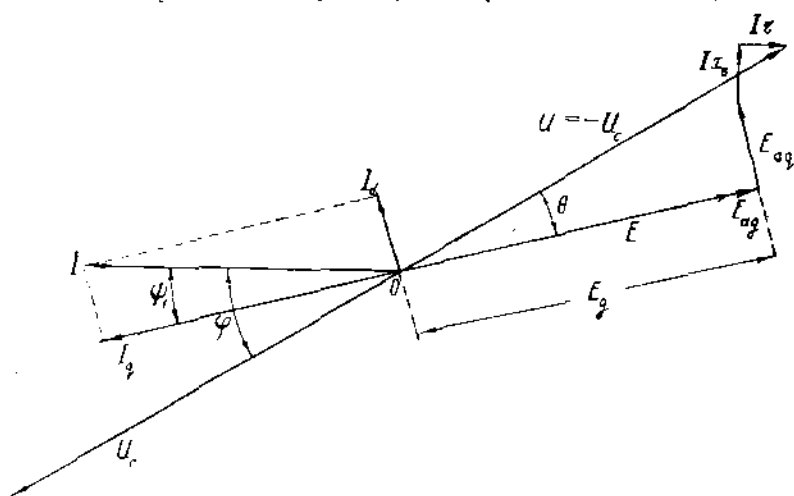


Рис. 216. Диаграмма Блонделя для синхронного двигателя.

вается падением напряжения (синхронным xI и активным rI) и обратной э. д. с. E (ср. § 80):

$$\dot{U}_c = -(\dot{E} + \dot{E}_x + \dot{E}_r) = -(\dot{E} - jxI - jrI). \quad (251)$$

Поэтому, вычитая из вектора э. д. с. $E = \overline{OC}$, активное падение напряжения $rI = \overline{CD}$ и синхронное падение напряжения $xI = \overline{DB}$, получим вектор $\overline{OB}$, равный и противоположный вектору $U_c = \overline{OA}$. Вектор $\overline{OB}$ будем называть составляющей напряжения на зажимах двигателя. Диаграмма обычно строится следующим образом (рис. 215). Откладываем вектор составляющей напряжения $\overline{OB}$, обратный вектору напряжения сети; вычитая из него падения напряжения xI и rI , находим э. д. с. E . На рис. 216

построена для двигателя диаграмма Blondеля. Как видно из диаграммы, в двигателе при токе, отстающем от напряжения сети, продольная э. д. с. реакции E_{ag} совпадает по направлению с э. д. с. E , индуктированной потоком полюсов, а поперечная E_{aq} опережает E на 90° (в генераторе E_{ag} направлено навстречу E , а E_{aq} отстает на 90°). В двигателе э. д. с. E отстает от составляющей напряжения на зажимах U ; следовательно, если в генераторе считать угол θ положительным, то в двигателе θ отрицателен. Для двигателя обычно строят диаграмму Бен-Эшенбурга, так как последняя дает точное значение мощности (§ 121).

150. Электромагнитный вращающий момент синхронного двигателя.

Вращающий момент синхронного двигателя обусловлен электромагнитными силами, действующими на проводники. В § 112 уже указывалось, что в случае исчезновения вращающего момента первичного двигателя, приложенного к генератору, ротор, при том же направлении тока в обмотке статора, начнет вращаться в обратную сторону. Величина вращающего момента для проводников одной фазы в двигателе определяется той же формулой (144), что и для генератора (§ 112). При дальнейшем преобразовании этой формулы необходимо принять во внимание указанное выше обратное направление вращения двигателя по сравнению с генератором и в соответствии с этим при той же системе координат формулу (145) писать в виде:

$$x = -\omega t. \quad (252)$$

Соответственно этому э. д. с. равна $e = \sqrt{2} E_0 \sin(-\omega t) = -\sqrt{2} E_0 \sin \omega t$, а ток $i = -I_{\max} \sin(\omega t - \psi)$. Тогда для одной фазы обмотки статора получаем выражение вращающего момента

$$M_p = -2 \frac{p\tau}{\pi} I f_{m1} \omega 10^{-1} I_{\max} \sin(\omega t - \psi) [B_q \cos \omega t - B_g \sin \omega t]; \quad (253)$$

здесь $\cos(-\omega t) = \cos \omega t$, а $\sin(-\omega t) = -\sin \omega t$; вместо i подставлено $i = -I_{\max} \sin(\omega t - \psi)$. Суммируя выражения вращающих моментов для каждой фазы и производя тригонометрические преобразования аналогично формуле (150), получим

$$M_\psi = -3 \frac{p\tau}{\pi} f_{m1} \omega I 10^{-1} [B_q I_{\max} \sin \psi - B_g I_{\max} \cos \psi]. \quad (254)$$

Обычно вместо угла ψ подставляют угол ψ_1 (рис. 215); очевидно:

$$\psi = 180 + \psi_1. \quad (255)$$

Подставляя в формулу (254) вместо ψ величину (255), получаем

$$M_\psi = +3 \frac{p\tau}{\pi} f_m \omega I 10^{-1} [B_q I_{\max} \sin \psi_1 - B_g I_{\max} \cos \psi_1]. \quad (256)$$

Так как второй член, стоящий в скобках, всегда больше первого, то M_ψ получается отрицательной величиной; это указывает, что мощность не отдается в сеть, а потребляется из сети. Считая для двигателя положительной мощность, потребляемую из сети, получим

$$M_\psi = 3 \frac{p\tau}{\pi} f_{m1} \omega I 10^{-1} [B_g I_{\max} \cos \psi_1 - B_q I_{\max} \sin \psi_1] \text{ дин} \times \text{см}. \quad (257)$$

Для перевода в кгм это выражение надо разделить на $9,81 \times 10^7$. Заменяя индукции через э. д. с., получаем (аналогично формуле 151):

$$\begin{aligned} M_\psi &= \frac{3}{9} E_g I \cos \psi_1 - \frac{3}{9} E_g I \sin \psi_1 \text{ ватт} \times \text{сек.} = \\ &= \frac{3}{9,812} E_g I \cos \psi_1 - \frac{3}{9,812} E_g I \sin \psi_1 \text{ кгм}. \end{aligned} \quad (258)$$

Электромагнитная мощность синхронного двигателя равна:

$$P_{\psi} = M_{\psi} \Omega = 3 E_g I \cos \psi_1 - 3 E_q I \sin \psi_1 \text{ ватт.} \quad (259)$$

Сравнивая выражения (258) и (259) для двигателя с выражениями (152) и (153) для генератора, видим, что они отличаются знаками перед вторыми членами. Это объясняется тем, что в генераторе поперечный $I_q = I \cos \psi$ и продольный $I_d = I \sin \psi$ токи совпадают соответственно с продольной E_g и поперечной E_q э. д. с. (рис. 152), вследствие чего и дают мощность одного знака; в двигателе поперечный ток I_q направлен навстречу [про-

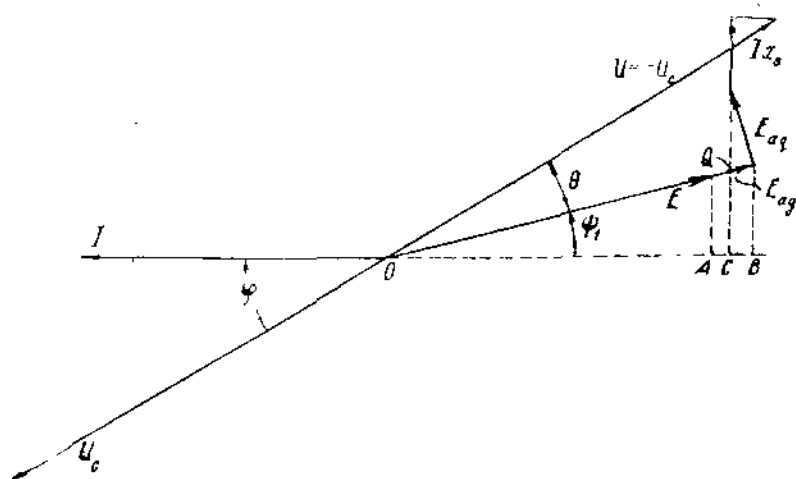


Рис. 217. К выводу формулы для электромагнитной мощности синхронного двигателя.

дольной э. д. с. E_g , а продольный ток I_d совпадает с поперечной э. д. с. E_q (рис. 216); здесь произведения этих величин дают мощности разного знака.

Электромагнитный вращающий момент синхронного двигателя M_{ψ} представляет собою момент, создаваемый вращающимся потоком между-железного пространства; его часто заменяют пропорциональной ему электромагнитной мощностью P_{ψ} (формула 259), выраженной в ваттах, и называют в этом случае моментом в синхронных ваттах. Полезный вращающий момент на валу двигателя M_2 меньше, чем электромагнитный момент M_{ψ} (§ 153).

151. Мощность синхронного двигателя.

Подставляя в формулу (259) вместо E_g величину $E + E_{ag}$, а вместо E_q величину E_{aq} (§ 149, рис. 216), получаем следующее выражение для электромагнитной мощности синхронного двигателя:

$$P_{\psi} = 3 E I \cos \psi_1 + 3 E_{ag} I \cos \psi_1 - 3 E_{aq} I \sin \psi_1. \quad (260)$$

Обращаясь к рис. 217, видим, что

$$E I \cos \psi_1 = I \times \overline{OA};$$

$$E_{ag} I \cos \psi_1 = I \times \overline{AB};$$

$$E_{aq} I \sin \psi_1 = I \times \overline{BC}.$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} P_{\psi} &= 3EI \cos \psi_1 + 3E_{aq}I \cos \psi_1 - 3E_{aq}I \sin \psi_1 = \\ &= 3I \times OA + 3I \times \overline{AB} - 3I \times \overline{BC} = 3I \times \overline{OC}. \end{aligned}$$

Обозначим отрезок $\overline{OQ}$ через E_Q ; тогда $\overline{OC} = E_Q \cos \psi_1$ и мощность равна:

$$P_{\psi} = 3E_Q I \cos \psi_1 = m E_Q I \cos \psi_1 \text{ ватт;} \quad (261)$$

здесь m — число фаз. Таким образом, электромагнитная мощность синхронного двигателя пропорциональна эквивалентной э. д. с. E_Q ; эквивалентная э. д. с. E_Q представляет собою э. д. с., индуцированную основным потоком полюсов в ненасыщенной машине с цилиндрическим ротором (выражение для P_{ψ} имеет тот же вид, что и для генератора, § 113).

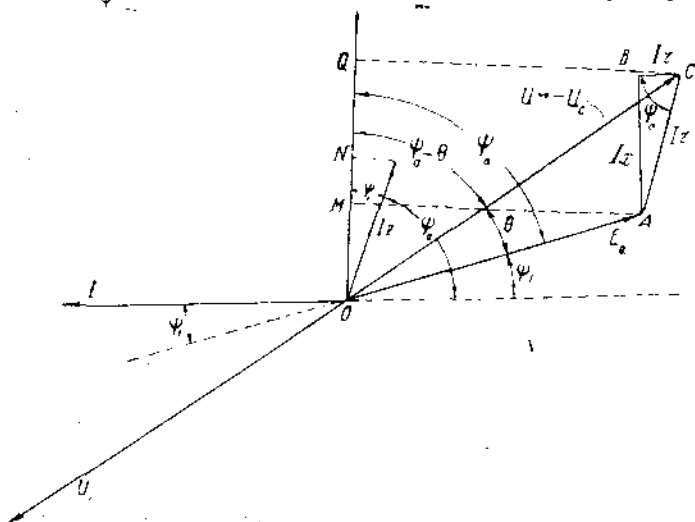


Рис. 218. К выводу формулы для электромагнитной мощности синхронного двигателя.

Мощность P_{ψ} представляет собою функцию угла θ — угла расхождения между осью полюсов и осью результирующего потока. Для определения зависимости P_{ψ} от θ проведем через O линию, упреждающую вектор $Iz = \overline{AC}$ на угол ψ_1 (рис. 218). Проекция вектора Iz на эту линию равна:

$$Iz \cos \psi_1 = \overline{ON} = \overline{OQ} - \overline{OM} = U \cos (\psi_a - \theta) - E_Q \cos \psi_a;$$

отсюда

$$P_{\psi} = m E_Q I \cos \psi_1 = \frac{m O N E_Q}{z} = \frac{m E_Q}{z} [U \cos (\psi_a - \theta) - E_Q \cos \psi_a]. \quad (262)$$

Для генератора мы имели формулу (§ 113):

$$P_{\psi g} = \frac{m E_Q}{z} [E_Q \cos \psi_a - U \cos (\psi_a + \theta)].$$

Принимая во внимание, что для двигателя угол θ отрицателен по сравнению с углом θ для генератора, получим из формулы (155), подставляя в нее вместо θ угол $-\theta$:

$$P_{\psi g} = \frac{m E_Q}{z} [E_Q \cos \psi_a - U \cos (\psi_a - \theta)] = -P_{\psi};$$

здесь P_ψ — мощность двигателя; этого и следовало ожидать, так как мощность в двигателе потребляется из сети, а в генераторе отдается в сеть.

Электромагнитная мощность двигателя P_ψ представляет собою мощность синхронно вращающегося потока между железного пространства. Эта мощность передается потоком со статора на ротор.

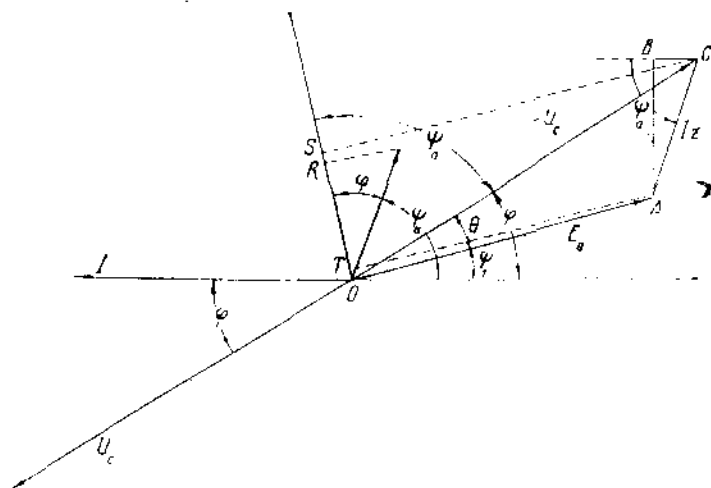


Рис. 219. К выводу формулы для подведенной мощности синхронного двигателя.

Подведенная к двигателю из сети мощность P_1 больше электромагнитной мощности P_ψ на величину потерь в обмотке статора $Q_{cst} = mI^2r$:

$$P_1 = P_\psi + mI^2r = mUI \cos \varphi \text{ ватт}; \quad (263)$$

здесь φ — угол сдвига фаз между током и напряжением на зажимах двигателя. Так же, как и для P_ψ , можно вывести зависимость P_1 от угла θ . Для этого проводим через O линию OS , упреждающую вектор Iz на угол φ (рис. 219); проекция Iz на эту линию равна:

$$Iz \cos \varphi = OR = OS - OT = U \cos \psi_a - E_Q \cos (\psi_a + \theta),$$

откуда

$$P_1 = \frac{mU}{z} [U \cos \psi_a - E_Q \cos (\psi_a + \theta)]. \quad (264)$$

Полезная мощность двигателя P_2 меньше электромагнитной мощности P_ψ на величину потерь в железе Q_{Fe} и механических Q_R :

$$P_2 = P_\psi - Q_{Fe} - Q_R = P_1 - Q_{cst} - Q_{Fe} - Q_R. \quad (265)$$

152. Зависимость электромагнитного момента синхронного двигателя от угла θ .

Так как электромагнитный момент M_ψ прямо пропорционален электромагнитной мощности P_ψ , то он также представляет собою функцию угла θ — угла расхождения между осью полюсов и осью результирующего потока машины:

$$M_\psi = \frac{P_\psi}{\omega} = \frac{mE_Q}{\omega z} [U \cos (\psi_a - \theta) - E_Q \cos \psi_a]. \quad (266)$$

Как указывалось в § 148, в двигателе ось полюсов отстает на угол θ от оси результирующего потока. На рис. 220,а представлена зависимость M_ψ от θ ; в положительную сторону отложены моменты, соответствующие

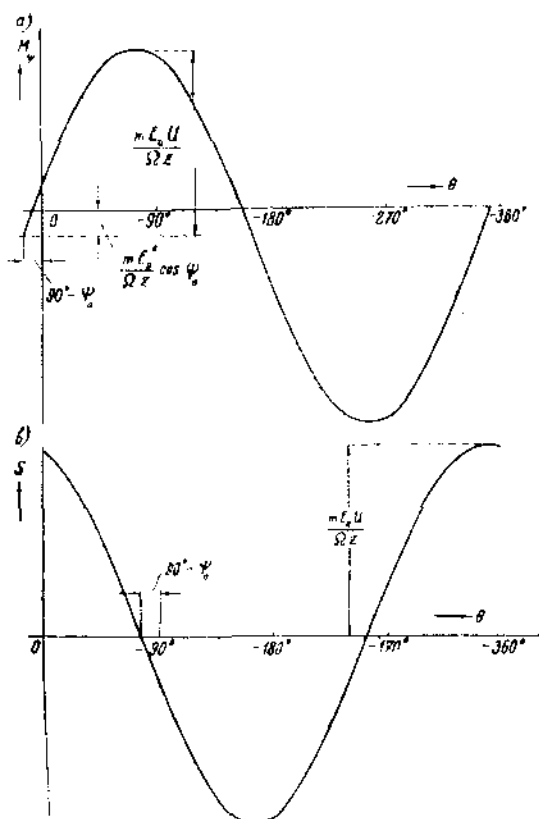


Рис. 220. а) Зависимость электромагнитного момента синхронного двигателя от угла θ ; б) зависимость синхронизирующего момента от угла θ .

мощности, потребляемой из сети. При значении $\theta \approx 90^\circ$ момент M_ψ имеет максимум; при дальнейшем увеличении θ , т. е. при отставании оси полюсов от оси результирующего потока междужелезного пространства на угол больший 90° , вращающий момент уменьшается, что ведет к замедлению скорости вращения ротора и к дальнейшему увеличению угла θ . При $\theta > 180^\circ$ вращающий момент становится отрицательным; двигатель не может преодолеть момент сопротивления на валу и останавливается или, как говорят, выпадает из синхронизма. Область отрицательных вращающих моментов соответствует работе машины в качестве генератора (см. § 121).

Из выражения (261) можно для электромагнитного момента получить следующую формулу:

$$M_\psi = \frac{m E_Q I}{\Omega} \cos \psi_1 = C \Phi / \cos \psi_1; \quad (267)$$

здесь C — постоянная, Φ — основной магнитный поток полюсов, прямо пропорциональный э. д. с. E_Q (§ 80).

153. Полезный вращающий момент синхронного двигателя.

Полезный вращающий момент синхронного двигателя M_2 меньше электромагнитного момента M_ψ на величину моментов, идущих на преодоление потерь в железе и механических потерь:

$$M_2 = M_\psi - M_{Fe} - M_R. \quad (268)$$

154. Опрокидывающий, или максимальный, вращающий момент синхронного двигателя.

Электромагнитный вращающий момент синхронного двигателя M_ψ есть функция угла θ (§ 152) и при некотором значении угла θ имеет максимум (рис. 220,а); угол θ , соответствующий $M_{\psi \max}$, находим, приравняв нулю производную от M_ψ по θ :

$$\frac{dM_\psi}{d\theta} = \frac{m E_Q U}{\Omega Z} U \sin(\psi_1 - \theta) = 0;$$

отсюда

$$\sin(\psi_a - \theta) = 0, \text{ или } \theta_{\max} = \psi_a. \quad (269)$$

Подставляя это значение в формулу для M_ψ , получаем:

$$\begin{aligned} M_{\psi \max} &= \frac{mE_Q}{\Omega z} [U - E_Q \cos \psi_a] \text{ ватт} \times \text{сек.} = \\ &= \frac{mE_Q}{9,81 \Omega z} [U - E_Q \cos \psi_a] \text{ кгм.} \end{aligned} \quad (270)$$

Этот вращающий момент называется максимальным моментом, или опрокидывающим. Если момент сопротивления на валу двигателя больше опрокидывающего момента, то двигатель выпадает из синхронизма и останавливается. Как видно из формулы (270), опрокидывающий момент зависит от э. д. с. двигателя E_Q (другими словами, от возбуждения). При некотором значении E_Q имеем максимальное значение опрокидывающего момента; соответствующее ему значение E_Q находим, приравняв нулю производную от $M_{\psi \max}$ по E_Q :

$$\begin{aligned} \frac{dM_{\psi \max}}{dE_Q} &= \frac{mU}{\Omega z} - \frac{2E_Q m}{\Omega z} \cos \psi_a = 0; \\ E_{Q \max} &= \frac{U}{2 \cos \psi_a}. \end{aligned} \quad (271)$$

Следовательно, максимальное значение опрокидывающего момента равно:

$$M_{\psi M} = \frac{mU^2}{4\Omega z \cos \psi_a} = \frac{mU^2}{4\Omega r}; \quad (272)$$

здесь r — активное сопротивление обмотки статора, $r = z \cos \psi_a$. Таким образом, максимальное значение опрокидывающего момента обратно пропорционально активному сопротивлению обмотки статора и не зависит от реактивного сопротивления статора.

Если положить $r = 0$, а следовательно, $\psi_a = 90^\circ$ (§ 113), то величина опрокидывающего момента равна:

$$M_{\psi \max} = \frac{mE_Q U}{\Omega x}; \quad (273)$$

выражение для электромагнитного момента (266) при $r = 0$ имеет вид:

$$M_\psi = \frac{mE_Q U}{\Omega x} \sin \theta; \quad (274)$$

здесь x — синхронное реактивное сопротивление двигателя.

Перегрузочная способность двигателя, т. е. отношение опрокидывающего момента к номинальному, в предположении $r = 0$ равна:

$$\mu = \frac{M_{\psi \max}}{M_{\psi N}} = \frac{1}{\sin \theta_N}; \quad (275)$$

здесь через θ_N обозначен угол θ , соответствующий номинальному электромагнитному моменту $M_{\psi N}$. В современных нормальных двигателях имеем при активной нагрузке $\theta_N = 20^\circ \div 30^\circ$, $\sin \theta_N = 0,35 \div 0,5$, соответственно чему

$$\mu = \frac{1}{\sin \theta_N} = \frac{1}{0,35 \div 0,5} = 3,0 \div 2,0;$$

в некоторых двигателях μ доходит до 4.

Наличие активного сопротивления статора r уменьшает величину перегрузочной способности μ , поэтому для увеличения последней необходимо уменьшать r . Путем уменьшения процентного значения $x\%$ по сравнению с E_Q можно уменьшить угол θ , а следовательно, увеличить μ .

Для этого надо уменьшать ампер-витки реакции якоря по сравнению с ампер-витками полюсов, чего можно достигнуть увеличением между-железного пространства. Для ряда двигателей американской конструкции перегрузочная способность приведена в таблице VIII (§ 165).

155. Синхронизирующая мощность синхронного двигателя.

Перегрузочная способность характеризует перегружаемость синхронного двигателя лишь при медленном увеличении нагрузки. При внезапном увеличении нагрузки двигатель начинает совершать колебания так же, как и синхронный генератор (см. главу IX). Поэтому даже при увеличении нагрузки до величины, меньшей опрокидывающей, двигатель может выпасть из синхронизма, если изменение угла θ вследствие инерции ротора окажется столь значительным, что новое значение θ станет $> 90^\circ$. Развиваемая при этом синхронным двигателем мощность уменьшается (рис. 220, а), вследствие чего двигатель может остановиться. Устойчивость работы синхронного двигателя поэтому характеризуется не столько перегрузочной способностью, сколько синхронизирующей силой (§ 113):

$$P_s = \frac{dP_\psi}{d\theta} = \frac{mE_Q U}{z} \sin(\psi_a - \theta), \quad (276)$$

или синхронизирующим моментом:

$$S = \frac{P_s}{\Omega} = \frac{mE_Q U}{\Omega z} \sin(\psi_a - \theta). \quad (277)$$

На рис. 220, б изображен синхронизирующий момент в функции от угла θ . Как видно из формулы (277), максимальное значение синхронизирующего момента равно опрокидывающему моменту; поэтому величина перегрузочной способности дает некоторое представление об устойчивости работы синхронного двигателя. Уравнение колебаний для синхронного двигателя такое же, как и для генератора (§ 119).

Подверженность синхронного двигателя колебаниям представляет существенный недостаток их, так как при больших колебаниях нагрузки, а в особенности, при резких колебаниях напряжения или частоты сети двигатель может выпасть из синхронизма. Электромагнитный момент (§ 152, формула 266) при сопротивлении статора r , равном нулю, равен:

$$M_\psi = \frac{mE_Q U}{\Omega x} \sin \theta; \quad (266a)$$

как видно из этой формулы, при понижении напряжения U момент M_ψ уменьшается, что влечет за собою увеличение угла θ . Синхронизирующий момент S (277) с понижением U также уменьшается. При резких понижениях напряжения, часто встречающихся в сетях вследствие аварий, увеличение θ может произойти настолько значительно, что двигатель выпадает из синхронизма. Еще более опасными для сохранения синхронизма являются внезапные изменения частоты, происходящие иногда при авариях в сети, так как при быстром изменении частоты двигатель оказывается вращающимся несинхронно; практика показывает, что при внезапном изменении частоты на $0,5 \div 1,0$ пер./сек. двигатель уже не может втянуться в синхронизм и останавливается.

Для увеличения устойчивости параллельной работы двигателей, их снабжают успокоительной обмоткой на роторе, создающей асинхронный вращающий момент (§ 115). Необходимо, однако, отметить, что асинхронный вращающий момент уменьшается пропорционально квадрату уменьшения напряжения, а потому его эффект при понижении напряжения уменьшается. Все же современные синхронные двигатели, снабженные успокоительными обмотками, работают вполне устойчиво.

156. Влияние изменения тока возбуждения на работу синхронного двигателя.

При изменении тока возбуждения основной поток полюсов в синхронном двигателе изменяется, что, очевидно, должно отразиться на рабочих характеристиках двигателя. Рассмотрим работу двигателя при постоянной

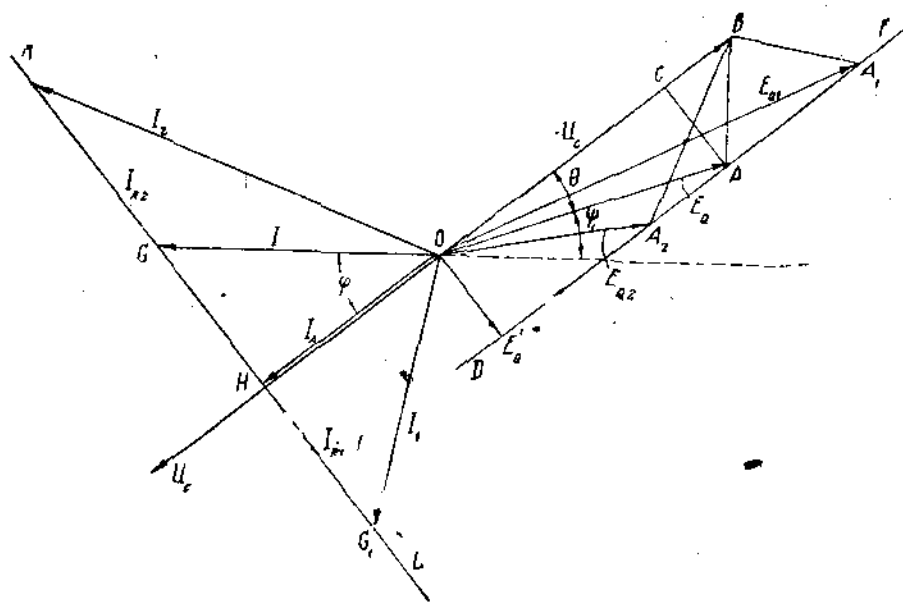


Рис. 221. Диаграмма синхронного двигателя для работы при разном возбуждении.

электромагнитной мощности и переменном токе возбуждения i . Из рис. 221 следует, что в пренебрежении активным сопротивлением обмотки статора ($r=0$, $\psi_a=90^\circ$) мощность P_ψ равна:

$$P_\psi = \frac{mE_q U}{x} \sin \theta = \frac{mU}{x} \overline{AC},$$

здесь $\overline{AC} = \overline{OA} \sin \theta = E_q \sin \theta$ — перпендикуляр, опущенный из конца вектора э. д. с. E_q на направление вектора напряжения U . Поэтому при $P_\psi = \text{const}$ и $U = \text{const}$ величина отрезка $\overline{AC}$ должна оставаться неизменной, а следовательно, конец вектора E_q должен при всех значениях тока возбуждения лежать на прямой DF , параллельной вектору U и отстоящей от него на расстояние $\overline{AC}$.

а) Увеличение возбуждения. Если $U = \text{const}$, $P_\psi = \text{const}$, а ток возбуждения i увеличен до величины, которой соответствует значение э. д. с. E_{q_1} , то синхронное падение напряжения будет равно $I_1 x = \overline{A_1 B}$.

Ток статора перпендикулярен к вектору падения напряжения $I_1 x$, поэтому при новом значении тока возбуждения ток статора направлен по OG_1 и равен $I_1 = \overline{A_1 B} / x$. Разлагая ток статора на активную составляющую $I_A = \overline{OH}$ и реактивную $I_R = \overline{HG_1}$, можем сделать следующие заключения. При увеличении тока возбуждения активная составляющая тока статора не изменяется. Появляющаяся реактивная составляющая тока отстает на 90° от составляющей напряжения на зажимах двигателя U и опережает на 90° напряжение сети U_c . Реактивный ток замыкается через статор двигателя и статор генератора. Так как он отстает на 90° от составляющей напряжения двигателя, то по отношению к двигателю он является индуктивным — намагничивающим. По отношению к напряжению сети этот ток является упреждающим на 90° , т. е. емкостным. Этот ток стремится уравнять напряжения генератора и двигателя, поэтому его называют часто уравнительным. Следствием увеличения тока возбуждения двигателя является уменьшение угла θ и увеличение E_Q . При этом, как следует из § 154, опрокидывающий момент и перегрузочная способность двигателя возрастают. Следовательно, увеличение тока возбуждения двигателя полезно с точки зрения увеличения устойчивости его работы. Полное значение тока статора при увеличении тока возбуждения, как следует из рис. 221, увеличивается. Поэтому во избежание перегрева двигателя сильно увеличивать ток возбуждения нельзя. Увеличение возбуждения двигателя по сравнению с возбуждением, соответствующим протеканию только активного тока, называется перевозбуждением двигателя.

б) Уменьшение возбуждения. Если уменьшать ток возбуждения, то э. д. с. E_Q уменьшается. Так как мощность P_ϕ остается постоянной, то конец вектора E_Q движется по прямой DF . Новое значение падения напряжения равно $I_2 x$; соответствующий ему ток статора I_2 отстает на 90° от $I_2 x$. Разлагая $I_2 = \overline{G_2 H}$ на активную и реактивную составляющие, замечаем: активная составляющая I_A остается неизменной; появившаяся реактивная составляющая I_R оказывается упреждающей на 90° составляющую напряжения двигателя U и отстающей на 90° от напряжения сети U_c . Следовательно, по отношению к двигателю этот ток является емкостным (намагничивающим), по отношению к сети — индуктивным (размагничивающим). Полное значение тока статора увеличивается. Угол θ увеличивается, а E_Q уменьшается, вследствие чего перегрузочная способность уменьшается, что вредно отражается на устойчивости двигателя. При уменьшении тока возбуждения до некоторого предела, а именно, до значения, соответствующего э. д. с. E_Q' (E_Q' перпендикулярно к U), угол θ становится равным 90° ; синхронизирующая сила становится равной нулю, а перегрузочная способность равной единице. Дальнейшее уменьшение тока возбуждения ведет к выпадению двигателя из синхронизма. Значение тока возбуждения, соответствующего E_Q' , является пределом устойчивости. Практически на опыте иногда ток возбуждения можно уменьшить до значений, меньших предельного без выпадения двигателя из синхронизма; это объясняется тем, что в двигателе имеется всегда остаточное намагничивание. Уменьшение тока возбуждения ниже нормального называется недовозбуждением двигателя.

Таким образом, изменением тока возбуждения можно регулировать реактивный ток, потребляемый двигателем. При перевозбуждении двигатель потребляет из сети емкостный ток, при недовозбуждении — индуктивный. Конец вектора полного тока I при

изменении возбуждения движется по прямой KL , перпендикулярной к вектору напряжения U ; это следует из того, что активная составляющая тока I_A остается постоянной.

Если не пренебрегать активным сопротивлением обмотки статора r , диаграмма работы двигателя (рис. 221) получается более сложной.¹⁾

157. U-образные кривые синхронного двигателя (или кривые Mordey).

Изменяя ток возбуждения синхронного двигателя, изменяем его реактивный, а следовательно, и полный ток. Откладывая величину тока статора в функции от тока возбуждения при постоянной мощности P_ϕ и постоянном напряжении сети U_c , получим кривую 1 (рис. 222), являющуюся характерной U-образной формой. Кривая 2 дает $\cos \varphi$ двигателя. Минимальное значение тока равно активной составляющей I_A , т. е. соответ-

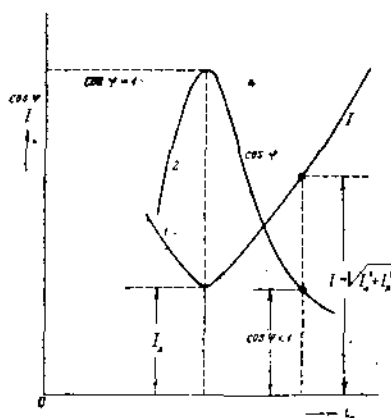


Рис. 222. Изменение тока статора I (кривая 1) и $\cos \varphi$ (2) при изменении возбуждения синхронного двигателя.

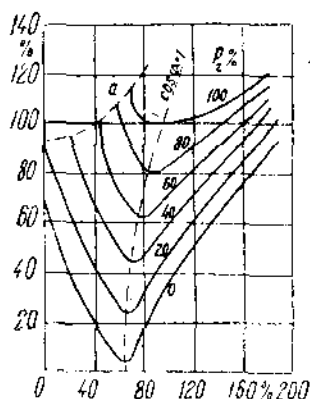


Рис. 223. U-образные кривые синхронного двигателя при разной полезной мощности P_2 .

ствует $\cos \varphi = 1$. При уменьшении и увеличении тока возбуждения ток статора увеличивается; при токе $i > i_1$ ток статора, опережающий по отношению к напряжению сети, при $i < i_1$ — отстающий, где через i_1 обозначен ток возбуждения, соответствующий $\cos \varphi = 1$. На рис. 223 изображен ряд U-образных кривых, соответствующих разной мощности. Как видно из рисунка, значения тока возбуждения, соответствующие $\cos \varphi = 1$, при увеличении нагрузки увеличиваются. Это объясняется тем, что при увеличении нагрузки увеличивается активная составляющая тока, а следовательно, увеличиваются потоки рассеяния, создаваемые активной составляющей. Для компенсации сдвига фаз, вызванного этими потоками рассеяния, требуется увеличение тока возбуждения. Кривая a соответствует пределу устойчивости двигателя (§ 156). U-образные кривые двигателя по своему характеру одинаковы с U-образными кривыми генератора (§ 122).

На рис. 224 изображены U-образные кривые синхронного двигателя при постоянной нагрузке, но при разных напряжениях на зажимах.

При опытном снятии U-образных кривых обычно поддерживают постоянную полезную мощность P_2 . Подведенная из сети к двигателю мощ-

¹⁾ См. В. А. Толвинский. Синхронные машины. Петроград, 1923.

ность P_1 не остается при этом постоянной (рис. 225): она минимальна при $\cos \varphi = 1$ и увеличивается при недовозбуждении и при перевозбуждении. Это увеличение обусловлено увеличением джоулевых потерь в обмотке статора $Q_{cu1} = mI^2r$ вследствие увеличения полного тока I . Железные потери Q_{Fe} также изменяются при изменении тока возбуждения; они уменьшаются при недовозбуждении и увеличиваются при перевозбуждении. Влияние изменения их, однако, незначительно. При определении $\cos \varphi$ по опытным данным

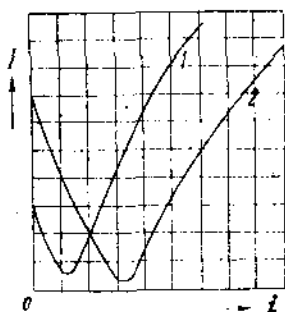


Рис. 224. U-образные кривые синхронного двигателя при разном напряжении на зажимах: 1) напряжение равно половине номинального, 2) номинальное напряжение.

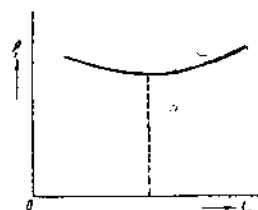


Рис. 225. Изменение подведенной мощности P_1 при постоянной полезной мощности P_2 и переменном возбуждении i .

часто не удается получить точку $\cos \varphi = 1$. Это объясняется наличием неодинакового порядка высших гармоник в кривой э. д. с. и в кривой тока. Ваттметр учитывает мощность лишь тех высших гармоник, которые присутствуют одновременно и в кривой э. д. с. и в кривой тока. Вольтметр и амперметр обычно учитывают все высшие гармоники. Поэтому значение $\cos \varphi$, определяемое по показаниям ваттметра, вольтметра и амперметра:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} UI},$$

в случае наличия гармоник неодинакового порядка в кривой э. д. с. и в кривой тока получается всегда меньше единицы.

158. Применение синхронного двигателя для компенсации $\cos \varphi$ сети.

Сети, питаемые синхронными генераторами, представляют собою индуктивную нагрузку, так как трансформаторы и большинство линий, а в особенности, индукционные двигатели, являющиеся наиболее распространенными двигателями переменного тока, обладают индуктивным сопротивлением. Это вызывает протекание по сети индуктивного, по отношению к напряжению генераторов, тока, вследствие чего коэффициент мощности сети всегда меньше единицы: $\cos \varphi < 1$. В небольших сетях, в особенности имеющих осветительную (активную) нагрузку, вред, приносимый индуктивным током, вследствие малой величины этого тока мало ощутителен. В сетях большой мощности индуктивный ток достигает большой величины по сравнению с активным, и доставляемый им вред весьма значителен. Главная часть индуктивного тока сети представляет собою намагничивающий ток индукционных двигателей, не зависящий от нагрузки. Этот ток, наряду с активным током, пропорциональным мощности, доставляется синхронными генераторами. Таким образом, по обмоткам генераторов

проходит полный ток I , равный геометрической сумме активного тока I_A и индуктивного I_R :

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_R^2}.$$

Мощность, получаемая от генератора, ограничивается нагреванием его, которое зависит от полного тока; поэтому чем больше индуктивный ток (т. е. чем ниже $\cos \varphi$), тем меньше должен быть активный ток во избежание перегрева генератора. При этом надо иметь в виду, что индуктивный ток в генераторе является размагничивающим (§ 75), поэтому для поддержания постоянства напряжения генератора требуется увеличивать ток возбуждения; ток возбуждения, а следовательно, и нагревание ротора при данном полном токе тем больше, чем ниже $\cos \varphi$. Поэтому при низком $\cos \varphi$ генератор очень плохо используется в смысле получения активной мощности. Пропускная способность

линий, трансформаторов и аппаратуры также зависит от полного тока, а поэтому передаваемая ими активная мощность тоже понижается с уменьшением $\cos \varphi$. Падение напряжения в линиях при данном полном токе тем больше, чем меньше $\cos \varphi$. Таким образом, коэффициент использования турбин, генераторов, трансформаторов, сети и т. д. уменьшается с уменьшением $\cos \varphi$, а это вызывает увеличение стоимости электрической энергии. Все эти обстоятельства заставили повести решительную борьбу за повышение $\cos \varphi$ установок. Так как нормально

возбужденный синхронный двигатель работает при $\cos \varphi = 1$, а при перевозбуждении потребляет из сети емкостный ток (§ 156), то он может служить для улучшения $\cos \varphi$ сети; такая возможность повела к более широкому распространению синхронных двигателей, чем это было в старых установках. Перевозбуждая синхронный двигатель, помещенный вблизи индукционных, получаем реактивный ток, емкостный по отношению к сети. Так как емкостный и индуктивный токи сдвинуты на 180° друг от друга, то емкостный ток синхронного двигателя в линиях и в генераторе компенсирует индуктивный ток, потребляемый индукционными двигателями. В результате линии и генератор избавляются от индуктивного тока и доставляют только активный ток (рис. 226). Реактивный ток синхронного двигателя в этом случае идет непосредственно в индукционные двигатели, по отношению к которым этот ток является намагничивающим.

Улучшение $\cos \varphi$ установки путем применения синхронных двигателей можно произвести двумя способами: 1) заменой части индукционных двигателей синхронными, работающими при $\cos \varphi = 1$; 2) компенсацией индуктивных токов, потребляемых индукционными двигателями, емкостными токами перевозбужденных синхронных двигателей (работающих при $\cos \varphi < 1$, упрещающем). Рассмотрим эти два способа на примерах.

Первый способ. Индукционные двигатели работают при общей потребляемой активной мощности P_A и общем коэффициенте мощности $\cos \varphi_1$. Требуется путем применения синхронных двигателей, работающих

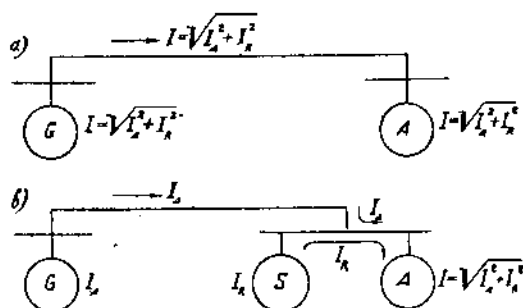


Рис. 226. Включение синхронного двигателя для улучшения $\cos \varphi$ сети: распределение тока в отсутствии синхронного двигателя (а) и при включении синхронного двигателя (б). G—генератор, А—асинхронный двигатель, S—синхронный двигатель.

с $\cos \varphi = 1$, поднять общий коэффициент мощности до значения $\cos \varphi_2$. Из теории переменных токов известно, что если кажущаяся мощность равна $P = \sqrt{3} UI$ киловольт-ампер, то активная мощность равна $P_A = P \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ киловатт, а реактивная $P_R = P \sin \varphi = \sqrt{3} UI \sin \varphi$ киловольт-ампер; при этом $P = \sqrt{P_A^2 + P_R^2}$, т. е. P представляет собою геометрическую сумму активной и реактивной составляющих мощности, сдвинутых на 90° друг от друга. Угол между P и P_A равен φ . На рис. 227 изображена сумма мощностей P_A и P_{R1} установки, дающих кажущуюся мощность P_1 при $\cos \varphi_1$ (треугольник OAB). Для получения общего коэффициента мощности $\cos \varphi_2$ при том же значении P_A кажущаяся мощность должна быть $P_2 = P_A / \cos \varphi_2$, а реактивная $P_{R2} = P_2 \sin \varphi_2$; следовательно, новый треугольник мощностей будет OAC . Синхронные двигатели рабо-

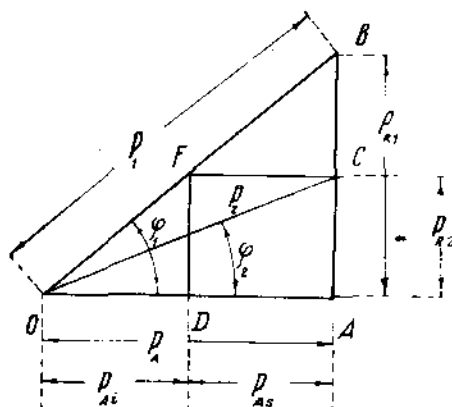


Рис. 227. Улучшение $\cos \varphi$ сети включением синхронных двигателей.

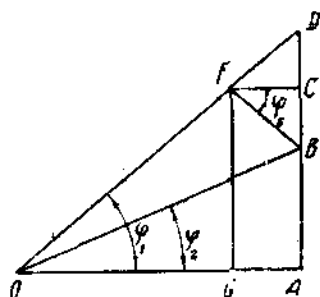


Рис. 228. Улучшение $\cos \varphi$ сети путем перевозбуждения синхронных двигателей.

туют при $\cos \varphi = 1$, поэтому они потребляют только активную мощность. Реактивная мощность $P_{R2} = \overline{AC}$ потребляется индукционными двигателями; так как коэффициент мощности последних остается тот же самый, то активная мощность их равна $P_{A1} = \overline{OD}$. Тогда синхронные двигатели должны, очевидно, потреблять активную мощность $P_{As} = P_A - P_{A1} = \overline{DA}$.

Второй способ. Общая активная мощность индукционных двигателей равна P_A при $\cos \varphi_1$. Требуется поднять $\cos \varphi$ до значения $\cos \varphi_2$ путем применения синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением при $\cos \varphi_s$ упрещающем. Реактивную мощность, соответствующую емкостному току, откладываем в сторону опережения. Так как общий коэффициент мощности установки должен равняться $\cos \varphi_2$, то кажущаяся мощность P_2 равна $\overline{OB}$ (рис. 228); проводя из B линию под углом φ_s , получаем $\overline{BC}$ — реактивную мощность синхронных двигателей, $\overline{CF}$ — активную мощность синхронных двигателей, $\overline{BF}$ — кажущуюся мощность синхронных двигателей, $\overline{FG}$ и $\overline{OG}$ — соответственно реактивную и активную мощности индукционных двигателей.

Синхронные двигатели, работающие при $\cos \varphi < 1$ упрещающем, имеют больший вес и стоят дороже, чем двигатели на эту же мощность при $\cos \varphi = 1$. В практике распространены двигатели, работающие при номи-

нальном $\cos \varphi_N = 0,8 \div 0,9$, так как увеличение стоимости компенсируется приносимым ими улучшением коэффициента мощности сети.

Если активная нагрузка синхронного двигателя равна нулю, то он может потреблять только реактивный ток, работая при $\cos \varphi \cong 0$. Такой двигатель носит название синхронного компенсатора; он применяется для компенсации индуктивных токов в сети и для регулирования напряжения (§ 159).

159. Синхронный компенсатор.

Синхронный двигатель, работающий вхолостую (активная мощность равна нулю) и потребляющий из сети реактивный ток, называется синхронным компенсатором (или, иногда, синхронным конденсатором). Применяют синхронные компенсаторы: 1) для улучшения $\cos \varphi$ сети, 2) для регулирования напряжения у потребителя.

1. Улучшение $\cos \varphi$ сети. В этом случае синхронный компенсатор работает всегда с перевозбуждением, посылая в сеть емкостный ток, компенсирующий индуктивный ток индукционных двигателей. Работа его аналогична работе перевозбужденного двигателя (§ 158), применяемого для улучшения $\cos \varphi$ установки, отличаясь лишь тем, что активная мощность его равна нулю.

2. Регулирование напряжения. В крупных сетях с линиями большой длины путем поддержания постоянного напряжения на генераторной станции нельзя получить постоянного напряжения в разных точках сети у потребителей. Напряжение у потребителей отличается от напряжения генераторов на величину падения напряжения в линиях; последнее сильно изменяется как по величине, так и по знаку в зависимости от величины и характера нагрузки. При большой индуктивной нагрузке напряжение у потребителей значительно меньше напряжения генераторов; при малой нагрузке в случае наличия емкостного сопротивления линий оно может стать больше напряжения генераторов. Для поддержания постоянного напряжения у потребителей ставят синхронные компенсаторы. При индуктивной нагрузке синхронный компенсатор работает с перевозбуждением и, посылая емкостный ток, компенсирует индуктивный ток нагрузки, а следовательно, и падение напряжения, вызванное этим током. При емкостном токе в линиях (малая нагрузка) синхронный компенсатор работает с недобуждением и дает в сеть индуктивный ток, компенсирующий емкостный ток в линиях, а следовательно, и вызванное емкостным током увеличение напряжения. Изменение тока возбуждения синхронного компенсатора производится обычно автоматически.

Конструктивно синхронный компенсатор выполняется с облегченным валом и фундаментом, так как вращающий момент его почти равен нулю (он должен преодолевать только механические и железные потери).

160. Пуск в ход синхронных двигателей.

В § 148 уже указывалось, что пуск синхронного двигателя путем подключения его к сети невозможен. Это обстоятельство (наряду с малой перегрузочной способностью) являлось крупнейшим недостатком синхронных двигателей, вследствие чего, несмотря на преимущества (главным образом, высокий $\cos \varphi$), они до последнего времени были распространены очень мало. В настоящее время путем видоизменения конструкции ротора (§ 165) удалось получить желаемые пусковые характеристики синхронного двигателя, так что основной недостаток синхронного двигателя отпадает; поэтому в последнее время синхронные двигатели проникают в промышленность более широко.

Практически применяемые способы пуска в ход синхронных двигателей можно разделить на два основных: 1) пуск при помощи постороннего двигателя (§§ 161, 162), 2) непосредственный асинхронный пуск от сети (§ 165). Теоретический интерес представляет пуск при помощи изменения частоты (§ 164); на практике он не получил распространения.

Все сказанное ниже о пуске синхронного двигателя в одинаковой мере относится и к пуску синхронного компенсатора, так как последний в отношении пуска представляет собою синхронный двигатель, пускаемый вхолостую.

161. Пуск в ход синхронного двигателя при помощи постороннего двигателя.

При этом способе синхронный двигатель пускается как генератор: он разворачивается посторонним двигателем до синхронной скорости, синхронизируется с сетью и приключается к ней как генератор (§ 126). После отключения пускового двигателя синхронная машина автоматически переходит в режим двигателя (§ 112). Если синхронный двигатель пускается вхолостую, то мощность пускового двигателя должна покрывать лишь потери в синхронном двигателе. Вращающий момент, необходимый для трогания с места, равен:

$$M_0 = \mu G \frac{d}{2} \text{ кг} \times \text{см}; \quad (278)$$

здесь μ — коэффициент трения, равный в среднем 0,3; G — вес вращающихся масс в кг; d — средний диаметр цапф в см. Отсюда мощность пускового двигателя, необходимая для трогания с места:

$$P_0 = M_0 \Omega_2 = \mu G \frac{d}{2} \frac{2\pi n_2}{60} \text{ кгсм/сек.} = 1,54 G d n_2 10^{-6} \text{ киловатт}; \quad (279)$$

здесь $\Omega_2 = 2\pi n_2/60$ — синхронная угловая скорость пускового двигателя. Когда двигатель начнет вращаться, то мощность пускового двигателя должна покрывать: 1) мощность, необходимую для сообщения ускорения, и 2) потери холостого хода синхронного двигателя. Работа, идущая на сообщение ускорения при доведении двигателя до синхронной скорости, равна:

$$A = \frac{1}{2} J \Omega_1^2 9,81 = \frac{1}{2} \frac{G D_f^2}{4g} \left(\frac{2\pi n_1}{60} \right)^2 9,81 \text{ ватт} \times \text{сек.};$$

здесь $J = G D_f^2/4g$ — момент инерции вращающихся масс в $\text{кгм} \times \text{сек}^2$, $G D_f^2$ — маховой момент в кгм^2 , $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение силы тяжести, $\Omega_1 = 2\pi n_1/60$ — синхронная угловая скорость синхронного двигателя. При полном времени пуска t_0 секунд максимальная мощность равна:

$$P_a = \frac{2A}{t_0} = 2,74 \frac{G D_f^2}{t_0} n_1^2 10^{-6} \text{ киловатт}. \quad (280)$$

Если пусковой двигатель имеет синхронную скорость вращения n_2 , то мощность, отнесенная к его синхронной скорости, равна:

$$P_a' = P_a \frac{n_2}{n_1} = 2,74 \frac{G D_f^2}{t_0} \frac{n_1}{1000} \frac{n_2}{1000} \text{ киловатт}. \quad (281)$$

Обозначая потери холостого хода синхронного двигателя через Q_0 , получаем полную мощность пускового двигателя:

$$P_n = 2,74 \frac{G D_f^2}{t_0} \frac{n_1}{1000} \frac{n_2}{1000} + Q_0 \text{ киловатт}. \quad (282)$$

Так как время пуска t_0 обычно мало, то пусковой двигатель выбирают с таким расчетом, чтобы при пуске он имел перегрузку $200 \div 300\%$. Обычно мощность пускового двигателя равна $5 \div 10\%$ от мощности синхронного двигателя при пуске последнего вхолостую.

Пуск синхронного двигателя под нагрузкой при помощи постороннего двигателя не производят вследствие неэкономичности, так как в этом случае необходимо иметь пусковой двигатель на полную мощность нагрузки.

В качестве пускового двигателя выбирают: 1) шунтовой двигатель постоянного тока, 2) индукционный двигатель. Применение шунтового двигателя постоянного тока распространено мало, так как редко встречаются установки с независимым источником постоянного тока. Индукционные двигатели для пуска выбирают обычно с числом полюсов $2p_2$ на два меньше, чем число полюсов синхронного двигателя $2p_1$, для того чтобы скорость индукционного двигателя $n_2 = 60 \nu p_2$ можно было получить выше скорости синхронного двигателя. Синхронизма достигают путем введения реостата в цепь ротора индукционного двигателя.

Так как при одинаковом вращающем моменте мощность пускового двигателя обратно пропорциональна числу полюсов (ср. формулу 279), то иногда выбирают пусковой индукционный двигатель с числом полюсов $2p_2$, равным числу полюсов синхронного двигателя. В этом случае вследствие скольжения индукционный двигатель имеет скорость вращения на $2 \div 4\%$ меньше синхронной. Синхронизма достигают путем включения постоянного тока в цепь ротора индукционного двигателя, либо включают синхронный двигатель в сеть через реактивную катушку без синхронизации, как при аналогичном включении генераторов (§ 144). Такой пуск хотя и требует меньшего индукционного двигателя, но, вследствие большого толчка тока и низкого $\cos \varphi$ при пуске, он менее удовлетворителен, чем пуск при помощи двигателя, имеющего $2p_2 = 2(p_1 - 1)$. Там, где пусковые токи мало сказываются на режиме сети, его все же часто применяют.¹⁾

162. Пуск в ход синхронного двигателя при помощи индукционного двигателя, включенного последовательно со статором синхронного двигателя.

Этот способ пуска часто применяют в последнее время. Статор пускового индукционного двигателя, сидящего на одном валу с синхронным, включается последовательно со статором синхронного двигателя (рис. 229). При пуске реостат R в цепи ротора пускового двигателя A ставится на максимальное сопротивление, а цепь ротора синхронного двигателя S замыкается накоротко, после чего замыкается главный выключатель I и индукционный двигатель приводит во вращение синхронный.

Напряжение сети распределяется между статорами синхронного и индукционного двигателей прямо пропорционально их реактивным сопротивлениям. При малых скоростях реактивное сопротивление индукционного двигателя значительно выше, чем синхронного, так как, во-первых, индукционный двигатель имеет меньшую мощность, а во-вторых, цепь ротора его замкнута на большое сопротивление, а цепь ротора синхронного двигателя замкнута накоротко. По мере приближения к синхронизму реактивное сопротивление индукционного двигателя уменьшается, вследствие

¹⁾ О пуске синхронных двигателей см.: 1) брошюра В.В.С.: Das Anlassen des Synchronmotors und sein Verhalten im Betrieb. 1264 D — VII. 1. Mai 1931; 2) L. Lebrecht. Anlauf synchroner und asynchroner Phasenschieber. A. E. G.-Mitt. 1931, стр. 366.

чего большая часть напряжения приходится на статор синхронного двигателя. По достижении синхронизма статор синхронного двигателя замыкается выключателем 2 на звезду. На рис. 229 F — возбудитель.

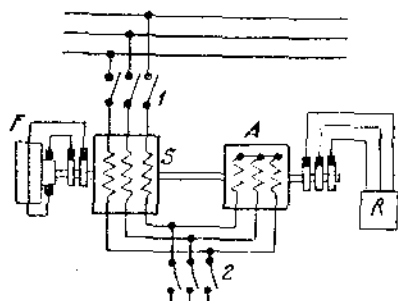


Рис. 229. Схема пуска синхронного двигателя при помощи последовательно включенного индукционного двигателя.

Такой способ пуска в сравнении с обычным пуском от постороннего двигателя (§ 161) обладает тем преимуществом, что не требует синхронизационных приспособлений и в то же время не дает больших толчков тока и низкого $\cos \phi$ при пуске. В качестве пускового двигателя применяют индукционный двигатель с числом полюсов меньшим или равным числу полюсов синхронного двигателя. В последнем случае $\cos \phi$ при пуске получается выше, а пусковой ток ниже. Для достижения синхронизма в этом случае включают в цепь ротора пускового двигателя постоянный ток.

163. Непосредственный пуск синхронного двигателя.

Непосредственный пуск синхронного двигателя возможен: 1) путем изменения частоты с помощью специально выделенного для пуска синхронного генератора (§ 164), 2) при помощи уложенной на роторе синхронного двигателя специальной пусковой обмотки (§ 165); в этом случае синхронный двигатель пускается непосредственно от сети в качестве асинхронного (индукционного).

164*. Пуск при помощи вспомогательного генератора.

Непосредственный пуск обычного синхронного двигателя от сети невозможен, так как за небольшой промежуток времени $t_1 = \frac{1}{2\pi}$ (§ 148) ротор не может получить необходимого количества движения $J\Omega_1$ (здесь J — момент инерции вращающихся частей, $\Omega_1 = 2\pi n/p$ — угловая скорость ротора). Если уменьшить частоту переменного тока ω до величины ω_2 , то промежуток времени становится больше ($t_2 = \frac{1}{2\omega_2}$), а необходимое количество движения меньше ($J\Omega_2$). Поэтому импульс силы Ft_2 , действующей на ротор, может оказаться достаточным для ускорения ротора (необходимое условие $Ft_2 = J\Omega_2$; здесь F — результирующая электромагнитных сил). Для уменьшения частоты при пуске необходимо питать двигатель от специально выделенного для пуска синхронного генератора, в котором частоту постепенно увеличивают от нуля до нормальной.

Пуск производят следующим образом. Неподвижный двигатель соединяют электрически с неподвижным генератором. Генератору дается от постороннего источника максимальный ток возбуждения; в двигателе устанавливают возбуждение, дающее э. д. с., равную половине э. д. с. генератора. При этом условии получается максимальный пусковой момент (ср. § 154, формула 271).¹⁾ Постепенно открывая впускной клапан первичного двигателя, приводят во вращение синхронный генератор; частота тока в последнем растет постепенно от нуля, в соответствии с чем растет скорость синхронного двигателя. За время пуска возбуждение синхронного двигателя необходимо поднять до величины, соответствующей э. д. с., рав-

¹⁾ При трогании с места можно положить $x = 0$, $z = r$, а следовательно, $\cos \phi_a \approx 1$.

ной э. д. с. генератора. По достижении нормальной скорости генератор одновременно с двигателем синхронизируется с сетью и приключается к ней.¹⁾

Этот способ пуска возможен только в тех установках, где можно выделить для пуска специальный генератор, поэтому широкого распространения он не получил. Пуск возможен только вхолостую или при незначительной нагрузке.

165. Асинхронный пуск синхронных двигателей.

Для возможности асинхронного пуска на роторе синхронного двигателя укладывают специальную пусковую обмотку, выполненную так же, как и успокоительная обмотка (§ 114), в виде стержней, лежащих в полюсных наконечниках и образующих беличье колесо. Такая обмотка аналогична, следовательно, короткозамкнутой обмотке индукционного двигателя; в синхронных двигателях с явно выраженными полюсами она отличается от последней лишь некоторой несимметрией, так как стержни уложены только в полюсных наконечниках. Для уменьшения пускового тока двигатель пускают (как и короткозамкнутые индукционные двигатели) от пониженного напряжения. После достижения двигателем скорости, близкой к синхронной, в обмотку возбуждения включают постоянный ток и двигатель втягивается в синхронизм (двигатель с явно выраженными полюсами при малой нагрузке может войти в синхронизм и без включения постоянного тока). Таким образом, процесс пуска распадается на два периода: 1) разгон двигателя, когда он работает только как индукционная машина, 2) втягивание в синхронизм после включения постоянного тока в ротор, когда двигатель работает одновременно как индукционная и как синхронная машина.

Рассмотрим сначала для простоты двигатель с цилиндрическим ротором, имеющий пусковую обмотку в виде симметричного беличьего колеса. Величина вращающего момента, создаваемого пусковой обмоткой, равна:²⁾

$$M_a = \frac{m_2 w_2^2 f_2^2 p E_Q^2}{2\pi w^2 f_{m1}^2 v} - \frac{s r_2}{r_2^2 + s^2 x_2^2} \cdot \frac{1}{9,81} \text{ кг.м;} \quad (283)$$

здесь m_2 — число фаз пусковой обмотки, p — число пар полюсов, w_2 — число витков одной фазы пусковой обмотки, E_Q — э. д. с. в обмотке статора, w — число витков одной фазы обмотки статора, f_{m1} и f_2 — коэффициенты обмоток статора и ротора, v — частота тока в статоре, r_2 и x_2 — активное и реактивное сопротивления пусковой обмотки, причем x_2 подсчитывается при частоте v ($x_2 = 2\pi v L_2$, где L_2 — коэффициент самоиндукции пусковой обмотки); s — скольжение:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad (284)$$

здесь n_1 — скорость вращения потока статора, n_2 — скорость вращения ротора. Как следует из формулы (283), вращающий момент при заданном напряжении и частоте сети зависит от сопротивлений пусковой обмотки r_2 и x_2 и от скольжения, а следовательно, и от скорости вращения ротора n_2 . Максимальное значение момент вращения имеет при $s x_2 = r_2$, т. е. при скольжении, равном:

$$s = s_M = \frac{r_2}{x_2}. \quad (285)$$

¹⁾ R. Bräuderlin, Zum Frequenzanlauf synchroner Maschinen. E. T. Z. 1924, стр. 1239.

²⁾ Ф. Н. Холуянов, Асинхронные двигатели трехфазного и однофазного тока. М. — Лгр. 1931.

На рис. 230 представлена зависимость вращающего момента M_a от скорости ротора n_2 при разных значениях отношения r_2/x_2 . При скольжениях s , меньших скольжения s_M , соответствующего максимальному значению вращающего момента, можно приближенно считать момент M_a пропорциональным скольжению:

$$M_a = D's; \quad (286)$$

здесь

$$D' = \frac{m_2 \omega_2^2 f_2^2 p E_Q^2}{9,81 \times 2\pi \omega_2^2 f_{m1}^2 r_2}.$$

Из кривых рис. 230 следует, что для получения большого пускового момента необходимо иметь значение реактивного сопротивления пусковой обмотки, близкое к активному. Максимальный пусковой момент получается при условии $x_2 = r_2$. При заданном моменте сопротивления на валу M_R , скорость, до которой дойдет синхронный двигатель под действием асинхронного момента, определяется точкой пересечения кривых асинхронного момента M_a и момента сопротивления M_R (точка А на рис. 231). Для того

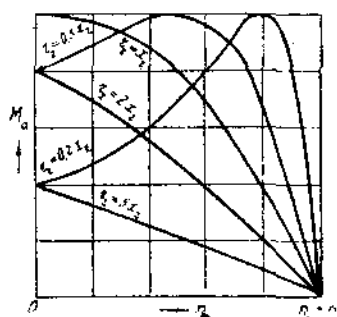


Рис. 230. Зависимость вращающего момента пусковой обмотки M_a от скорости ротора n_2 при разных значениях отношения r_2/x_2 .

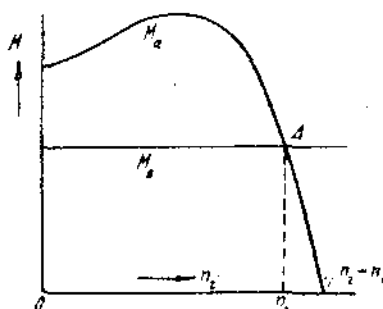


Рис. 231. Определение скорости, которую получит синхронный двигатель под влиянием пусковой обмотки.

чтобы двигатель втянулся в синхронизм, необходимо включить постоянный ток в обмотку возбуждения. По включении постоянного тока появляется электромагнитный момент M_ψ (§ 152):

$$M_\psi = -\frac{m E_Q U}{x} \sin \theta = S_{\max} \sin \theta;$$

здесь $S_{\max}$ представляет собою максимальное значение синхронизирующей силы (§ 155).

Уравнение движения ротора может быть написано в следующем виде (ср. § 144):

$$J \frac{d\Omega}{dt} + D's + S_{\max} \sin \theta = M_R. \quad (287)$$

Скольжение можно выразить в следующем виде:

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{p\Omega_1} = \frac{1}{p\Omega_1} \cdot \frac{dx}{dt}; \quad (284a)$$

здесь $\frac{dx}{dt}$ — скорость отклонения ротора от положения, соответствующего синхронной скорости (§ 119; ср. также § 144). Обозначим величину $\Gamma/p\Omega_1$

через D ; так как $\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d\alpha}{dt}$ (§ 119), а угол θ можно заменить через α , где α — отклонение ротора от положения, соответствующего холостому ходу ($\theta = 0$), то уравнение (287) получает вид:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + S_{\max} \sin \alpha = M_R. \quad (287a)$$

Решение подобного уравнения очень сложно. Воспользуемся графической интерпретацией этого уравнения. На рис. 232 синусоида 1 представляет собою кривую электромагнитного вращающего момента $S_{\max} \sin \alpha$ в функции от угла α . Прямая AB представляет собою момент сопротивления M_R . Скольжение s и асинхронный момент $M_a = D \frac{d\alpha}{dt}$ будем откладывать от прямой AB , причем положительный момент M_a будем откладывать вниз от прямой AB , а отрицательный — вверх. Пусть включение постоянного тока в обмотку возбуждения происходит в момент времени, когда $\alpha = 0$ (точка O).

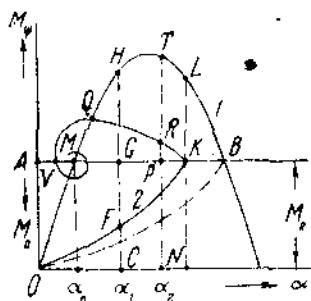


Рис. 232. Кривые вращающих моментов, действующих на двигатель при асинхронном пуске.

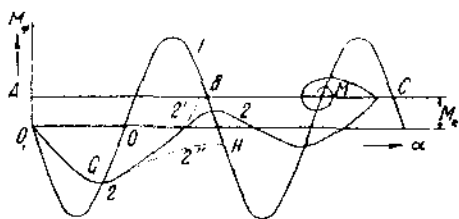


Рис. 233. Кривые вращающих моментов, действующих на двигатель при асинхронном пуске.

Электромагнитный момент при этом $M_\phi = 0$; скольжение равно s , при котором асинхронный момент $M_a = M_R$. Так как двигатель вращается со скольжением, то он начинает отставать от вращающегося потока статора и угол α увеличивается. При этом появляется электромагнитный момент M_ϕ , ускоряющий ротор, вследствие чего скольжение двигателя уменьшается, а вместе с ним уменьшается и асинхронный момент M_a по кривой 2. При некотором значении $\alpha = \alpha_1$ имеем $M_\phi = \overline{CH}$, $M_a = \overline{FG}$, $M_R = \overline{CO}$; избыточный вращающий момент $M_\phi + M_a - M_R = \overline{FII}$ равен моменту $J \frac{d\Omega}{dt}$, затрачиваемому на сообщение ускорения ротору. В точке K двигатель достигает синхронизма; асинхронный момент и скольжение равны нулю. Но на ротор продолжает действовать избыточный момент $M_\phi - M_R = \overline{KL}$. Поэтому двигатель продолжает ускоряться, угол α уменьшается; скольжение при этом становится отрицательным и на ротор действует отрицательный асинхронный момент. В точке α_2 имеем $M_\phi - M_a - M_R = \overline{AT} - \overline{PR} - \overline{NP} = \overline{RT}$.

Так как избыточный момент $\overline{RT}$ все еще положительный, то ротор продолжает ускоряться. После точки Q избыточный момент становится отрицательным, ротор начинает замедляться, достигает синхронизма в точке V ; в этом положении на него действует отрицательный момент,

¹⁾ A. Mauduit. Machines électriques, т. 2. Paris, 1931; также Étude sur la mise en synchronisme des moteurs synchrones démarrant sous charge, Revue B. V. C., дек. 1922, стр. 243.

поэтому ротор продолжает замедляться. Затем он снова ускоряется и т. д., пока не приходит в точку равновесия M_s ; здесь $M_\psi = M_R$, $M_a = 0$. Очевидно, для того чтобы двигатель вошел в синхронизм, не отстав от вращающегося потока на некоторое число полюсных делений, необходимо, чтобы кривая асинхронного момента 2 пересекала прямую AB влево от точки B . Если она пересечет ее вправо от точки B , то двигатель отстанет от потока на двойное полюсное деление. Этот процесс рассмотрен на рис. 233; здесь принято, что включение постоянного тока происходит в неблагоприятный момент: $\alpha = 180^\circ$ (точка O_1). Электромагнитный момент является отрицательным, поэтому двигатель после включения постоянного тока начинает двигаться с замедлением. Угол α увеличивается, скольжение и положительный асинхронный момент растут (кривая 2 на рис. 233). После достижения точки G положительный асинхронный момент становится больше M_ψ ,

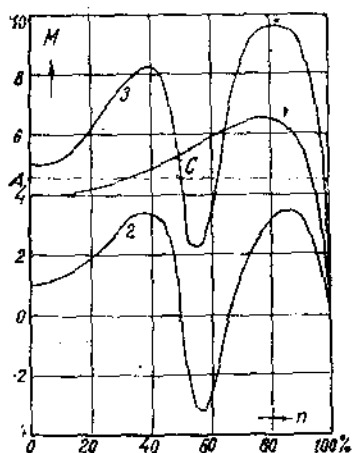


Рис. 234. Кривые вращающих моментов пусковой обмотки (1), обмотки возбуждения (2) и суммарного момента (3).

поэтому двигатель начинает ускоряться. Если он пересекает прямую AC влево от точки B (кривая 2'), то явление происходит как в предыдущем случае (рис. 232). Если асинхронный момент изменяется по кривой 2 и пересекает синусоиду M_ψ выше оси абсцисс, то ротор отстает еще на один полюс; кривая при этом приближается к оси абсцисс и в дальнейшем ротор втягивается в синхронизм в точке M . Если кривая асинхронного момента пересекает синусоиду M_ψ в точке H (ниже оси абсцисс), ротор не может достигнуть синхронизма.

Кривые асинхронного момента (рис. 230) построены в предположении разомкнутой обмотки возбуждения. Однако, при асинхронном пуске синхронных двигателей не рекомендуется оставлять обмотку возбуждения разомкнутой, так как магнитный поток статора, пересекающий ее вследствие неодинаковой в период пуска скорости потока и ротора, индуцирует в ней э. д. с.

Вследствие большого числа витков обмотки возбуждения эта э. д. с. достигает значения $3000 \div 4000$ и более вольт. Такое высокое значение э. д. с. (нормально напряжение возбудителя $60 \div 100$ В) может повредить изоляцию обмотки возбуждения. Поэтому следует замыкать обмотку возбуждения накоротко или на сопротивление; тогда индуцированная э. д. с. компенсируется падением напряжения. Замыкание обмотки возбуждения влечет за собою, однако, неприятное последствие, а именно, появление создаваемого ею вращающего момента. Обмотка возбуждения представляет собою однофазную обмотку. Такая обмотка создает вращающий момент, изменяющийся по кривой 2 на рис. 234. До скорости, равной половине синхронной, этот момент положителен, при большей скорости становится отрицательным. Кривая 1 представляет собою вращающий момент, создаваемый пусковой обмоткой, кривая 3 — суммарный момент. Если момент сопротивления равен OA , то двигатель дойдет до скорости, равной, примерно, половине синхронной (точка C) и будет продолжать работать на этой скорости; до синхронизма он дойти не может. Такое явление носит название однофазного включения.¹⁾ Для избежа-

¹⁾ К. А. Круг. Бесколлекторные асинхронные двигатели. Ленинград, 1928.

ния его необходимо уменьшать вращающий момент обмотки возбуждения, для чего лучше замыкать ее не накоротко, а на значительное активное сопротивление. Это имеет значение и для уменьшения пускового тока, так как замкнутая накоротко обмотка возбуждения играет роль вторичной обмотки трансформатора с большим индуктивным сопротивлением, что увеличивает величину пускового тока и уменьшает $\cos \varphi$ при пуске. Нормы германского союза электротехников (V. D. E.) рекомендуют замыкать обмотку возбуждения на сопротивление, в 10 раз превышающее сопротивление обмотки возбуждения. В некоторых двигателях американской конструкции обмотку возбуждения при пуске оставляют разомкнутой, но для уменьшения индуктированной в ней э. д. с. разбивают ее на несколько отдельных частей.

В двигателях с явно выраженными полюсами при пуске, с одной стороны, увеличивается одноосный эффект обмотки возбуждения, с другой стороны, облегчается втягивание в синхронизм. Сопротивление для магнитного потока в двигателе с явно выраженными полюсами различно по окружности ротора: наименьшее — в продольной оси, наибольшее — в поперечной оси. Продольная ось полюсов, вследствие тяжения магнитных линий, проходящих, главным образом, по этой оси, стремится всегда стать по оси потока статора; поэтому создается добавочный вращающий момент, так называемый реактивный (§ 128), который стремится установить ось полюсов по оси потока статора. При холостом ходе и при малых нагрузках реактивный момент оказывается часто достаточным для втягивания двигателя в синхронизм. При этом каждый полюс ротора может совпасть с любым из полюсов потока статора, в то время как полярность полюсов ротора, создаваемая током возбуждения, может оказаться не соответствующей этому; тогда при включении постоянного тока ротор должен отстать от потока на полюсное деление, что может повести к колебаниям. Для избежания этого применяют обычно автоматическое включение тока возбуждения при помощи реле, производящих включение в момент правильной полярности полюсов.

Синхронный двигатель тем легче достигает синхронизма, чем меньше скольжение, соответствующее значению асинхронного момента M_a , равного моменту сопротивления M_R (точка пересечения кривых M_a и M_R рис. 231). Из кривых рис. 230 видно, что чем больше пусковой момент M_0 , тем больше скольжение, соответствующее $M_a = M_R$. Таким образом, увеличение активного сопротивления пусковой обмотки с целью увеличения пускового момента M_0 ухудшает втягивание двигателя в синхронизм. Обычно пусковые свойства двигателя характеризуют пусковым моментом M_0 и так называемым синхронизируемым, или входным, моментом M_s . Последний представляет собою вращающий момент пусковой обмотки при скорости, равной 95% синхронной (скольжение $s = 5\%$). Чем больше синхронизируемый момент M_s , тем легче двигатель втягивается в синхронизм. В табл. VIII приведены значения M_0 и M_s в процентах от номинального вращающего момента для некоторых современных двигателей американской конструкции.

С целью увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока применяют трехфазную пусковую обмотку, уложенную в полюсных наконечниках и выведенную на кольца, к которым присоединяют пусковой реостат. Иногда применяют двойное беличье колесо аналогично индукционному двигателю Бушера. Применяют также электромагнитные муфты. В общем, все средства, предложенные для пуска короткозамкнутых индукционных двигателей, применимы к синхронным двигателям.¹⁾

¹⁾ Литература: 1) H. V. Putnam. Starting Performance of Synchronous Motors. Tr. A. I. E. E., янв. 1927, стр. 39; 2) T. M. Linville. Starting Performance of Salient-Pole Synchronous Motors.

Таблица VIII.

Характеристики синхронных двигателей.

Полезная мощность P_2	220	220	260	440	740	3700	3700 ¹⁾	kW
Скорость вращения n	164	450	400	150	180	250	250	об/мин
Пусковой момент M_0 в % от номинального	210	275	215	240	210	167	180	%
Синхронизируемый момент M_s в % от номинального	115	100	118	120	125	67	71	%
Перегрузочная способность μ	2,34	2,9	2,1	2,05	1,8	—	—	

Примечание. Двигатели (кроме двух последних) имеют пусковую обмотку, выведенную к кольцам. Пуск производится от полного напряжения сети.

166. Схемы включения для асинхронного пуска синхронных двигателей.

На рис. 235 приведена схема включения через реактор, уменьшающий величину пускового тока. Требуется всего два масляных выключателя: сначала замыкается 1, после достижения двигателем нормальной скорости замыкается 2. Недостаток этой схемы заключается в том, что пусковой момент уменьшается пропорционально квадрату подведенного напряжения, а пусковой ток — пропорционально первой степени напряжения.

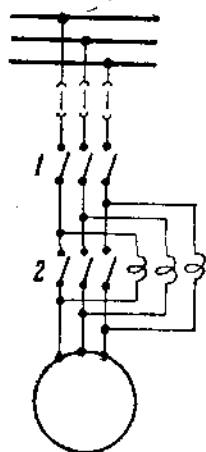


Рис. 235. Схема включения для пуска синхронного двигателя через реактор.

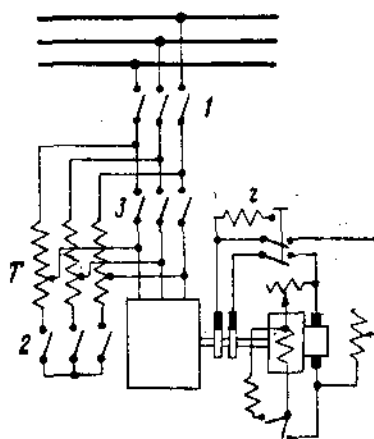


Рис. 236. Схема Корндорфера для пуска синхронного двигателя.

На рис. 236 приведена схема пуска через автотрансформатор, предложенная Корндорфером. Пуск производится в следующем порядке: 1) цепь возбуждения замыкается на сопротивление r ; 2) замыкается масляный выключатель 2, образующий нулевую точку автотрансформатора T ; 3) замыкается главный масляный выключатель 1; двигатель оказывается

Тр. А. И. Е. Е., апрель 1930, стр. 531; 3) В. М. Матюхин. Основные соотношения при асинхронном пуске синхронных двигателей. Вестник электротехники, 1930, № 9—10; 4) М. А. Hyde. Synchronous Motor with Phase Connected Damper Winding for High-Torque Loads. Tr. A. I. E. E., июнь 1931, стр. 600; 5) D. W. Mc. Lenegan and A. G. Ferris. Synchronous Motors. Design and Application to Meet Special Requirements. Tr. A. I. E. E., июнь 1931, стр. 607; 6) H. E. Edgerton and P. Fourmarier. The Pulling into Step of a Salient-Pole Synchronous Motor. Tr. A. I. E. E., июнь 1931, стр. 769; 7) C. E. Kilbourne. Improved Performance of Synchronous Motors with Respect to Starting and Stopping. G. E. R. 1932, стр. 571; 8) M. Liw-schitz und K. Baudisch. Synchronmotoren mit selbsttätigem Anlauf. S.-Z. 1933, стр. 101.

¹⁾ Двигатель завода „Электросила“.

приключенным к сети через автотрансформатор; 4) по достижении двигателем максимальной скорости включается постоянный ток в обмотку возбуждения; двигатель вытягивается в синхронизм; 5) выключается масляный выключатель 2; при этом двигатель оказывается приключенным к сети через часть автотрансформатора, играющую роль реактора; 6) замыкается масляный выключатель 3; двигатель приключается этим к полному напряжению сети. Между выключателями 2 и 3 должна быть блокировка, позволяющая включать каждый выключатель лишь при выключенном положении другого. При пуске через автотрансформатор пусковой ток и пусковой момент уменьшаются пропорционально квадрату напряжения.

167. Рабочие характеристики трехфазного синхронного двигателя.

На рис. 237 приведены рабочие характеристики синхронного двигателя, снятые при постоянных напряжении и частоте сети и при постоянном возбуждении двигателя. По оси абсцисс отложена полезная мощность P_2 . Так как скорость вращения синхронного двигателя постоянна, то полезный вращающий момент $M_2 = P_2/\Omega$ изменяется по прямой линии. Ток возбуждения установлен таким образом, что при холостом ходе двигателя имеет $\cos \varphi = 1$. При увеличении нагрузки $\cos \varphi$ несколько уменьшается, что объясняется тем, что с увеличением нагрузки растет сила

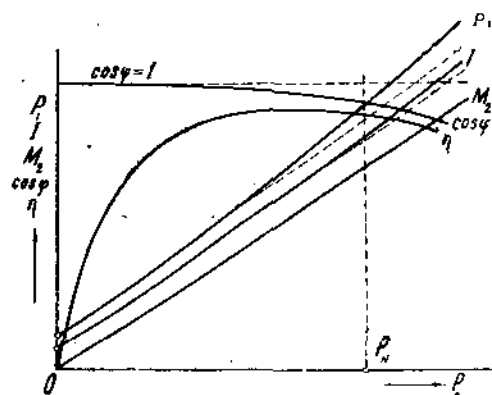


Рис. 237. Рабочие характеристики синхронного двигателя.

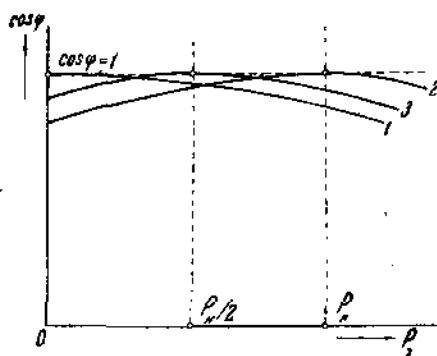


Рис. 238. Изменение $\cos \varphi$ синхронного двигателя в зависимости от нагрузки при разных значениях возбуждения.

тока двигателя, а следовательно, и реактивное падение напряжения, ухудшающее $\cos \varphi$ (ср. § 157). Подведенная мощность P_1 больше полезной P_2 на величину потерь; так как джоулевы потери с увеличением нагрузки увеличиваются, то подведенная мощность растет немного быстрее, чем по прямой линии. Сила тока $I = P_1/\sqrt{3} U \cos \varphi$ также растет быстрее, чем по прямой линии, вследствие увеличения P_1 и уменьшения $\cos \varphi$. Коэффициент полезного действия равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + U_n i_n + Q_v};$$

здесь U_n — напряжение возбудителя, i_n — сила тока возбуждения, Q_v — потери в возбудителе; если возбудитель у двигателя отсутствует, слагаемое Q_v отпадает.

При возбуждении, соответствующем значению $\cos \varphi = 1$ при холостом ходе, с увеличением нагрузки $\cos \varphi$ уменьшается (рис. 238, кривая 1).

причем двигатель потребляет из сети индуктивный ток. Если установить возбуждение, соответствующее $\cos \varphi = 1$ при полной нагрузке (кривая 2), то с уменьшением нагрузки $\cos \varphi$ уменьшается, но теперь двигатель потребляет емкостный ток. Кривая 3 на рис. 238 соответствует току возбуждения, дающему $\cos \varphi = 1$ при половинной нагрузке. При увеличении нагрузки двигатель потребляет из сети индуктивный ток, при уменьшении — емкостный.

Направление вращения трехфазного синхронного двигателя соответствует последовательности фаз сети и порядку расположения фазных обмоток на статоре, так как ротор вращается в ту же сторону, что и поток статора, а направление вращения последнего определяется порядком следования фаз. Для изменения направления вращения трехфазного синхронного двигателя необходимо переключить два провода, подходящие из сети к зажимам статора; при этом изменится направление вращения потока статора, а следовательно, и направление вращения ротора.

168. Однофазный синхронный двигатель.

В однофазном синхронном двигателе статор создает пульсирующий поток. Последний можно разложить на два вращающихся в разные стороны потока (§ 101). Приводя двигатель в синхронное вращение с одним из вращающихся потоков и включая его в сеть, вызовем появление электромагнитного вращающего момента. Обрато синхронный поток статора, как и в однофазном генераторе, вызывает большие потери и создает тормозящий вращающийся момент. Для уничтожения обрато синхронного потока необходимо применять успокоительную обмотку (§ 105). Если обрато синхронный поток уничтожен, то работа однофазного двигателя в общем не отличается от работы трехфазного.

Очевидно, что для изменения направления вращения однофазного синхронного двигателя достаточно при пуске развернуть его в обратную сторону и синхронизировать с соответственно вращающейся составляющей пульсирующего потока.

Асинхронный пуск однофазного двигателя не осуществим, так как пульсирующий поток статора не создает начального вращающегося момента.

Однофазные синхронные двигатели распространения не имеют.

ГЛАВА XI.

СИММЕТРИЧНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.

169. Общие замечания.

Совокупность параллельно работающих генераторных станций, передаточных и распределительных сетей и приемников электроэнергии называют электрической системой. По пути движения электрической энергии система состоит из ряда звеньев: 1) питающие систему синхронные генераторы, 2) повысительные подстанции с трансформаторами и аппаратурой, 3) линии передачи, 4) понизительные подстанции с трансформаторами и аппаратурой, 5) распределительные сети, 6) приемники электрической энергии (электродвигатели, электрические печи, осветительная нагрузка и т. п.). Некоторые из звеньев в несложных системах отсутствуют. Пространственно система состоит из отдельных участков, более или менее тесно связанных друг с другом (рис. 191).

Если значение сил токов, напряжений и мощностей в каждом участке системы остается неизменным, то система находится в равновесии, или, как говорят, режим работы системы является установившимся. Установившийся режим работы электрической системы характеризуется тем, что параметры, определяющие его (мощности первичных двигателей, нагрузки приемников, сопротивления всех участков системы и т. д.), сохраняют неизменную величину; только при этих условиях могут оставаться неизменными электрические мощности, токи и напряжения в отдельных участках системы. При разных значениях параметров системы получим, очевидно, разные установившиеся режимы. При каждом установившемся режиме энергия магнитных и электрических полей системы имеет вполне определенные значения. При переходе от одного установившегося режима к другому значения энергии должны измениться; так как это изменение не может произойти мгновенно, то переход от одного установившегося режима к другому продолжается в течение некоторого конечного промежутка времени.

Процесс перехода от одного установившегося режима работы электрической системы к другому называется переходным процессом, а режим работы системы в течение переходного процесса называется переходным, или не установившимся, режимом.

С точки зрения работы синхронных машин наибольшее значение имеют переходные процессы, связанные с внезапным изменением тока, отдаваемого машиной. При изменении тока обычно изменяется и мощность машины. При этом в системе возникают свободные колебания синхронных машин, рассмотрению которых посвящена глава IX. Однако, изменение тока, и именно увеличение его (появление сверхтоков, т. е. токов, пре-

вышающих номинальный ток), опасно для синхронной машины само по себе, независимо от изменения мощности и появления колебаний. Появление сверхтоков опасно, главным образом, для механической прочности синхронной машины, но если сверхтоки протекают по машине длительное время, то машина может получить недопустимую температуру, при которой разрушается изоляция и расплавляются обмотки. Сверхтоки большей частью появляются при аварийных режимах — коротких замыканиях, хотя могут возникнуть и без короткого замыкания — при приключении нагрузки, во много раз превышающей мощность машины, при несинхронном включении машин на параллельную работу и т. д. Переходный режим, связанный с появлением сверхтока вследствие короткого замыкания, называется режимом короткого замыкания, а протекающий при этом сверхток — током короткого замыкания. Сверхтоки, вызванные другими причинами, имеют, большей частью, последствия менее опасные, чем при коротком замыкании; так как процесс протекания их такой же, как и в случае короткого замыкания, то достаточно изучить только режим короткого замыкания.

При параллельной работе синхронных машин короткое замыкание всегда сопровождается колебаниями мощности между отдельными машинами, а следовательно, и появлением уравнивающих токов между ними, что необходимо принимать во внимание при определении сверхтоков. Однако, прежде, чем изучать режим короткого замыкания и колебаний одновременно, необходимо изучить каждый режим отдельно. Поэтому в главе IX рассмотрены колебания синхронных машин без учета влияния на колебания изменений, вносимых изменением сверхтока, протекающего по машине; в настоящей главе рассмотрен режим короткого замыкания, не сопровождающийся колебаниями. Очевидно, такое короткое замыкание в системе может наблюдаться при работе синхронной машины в одиночку.

170. Определения.

Коротким замыканием называется замыкание участка системы на малое сопротивление (в пределе равно нулю), следствием чего оказывается появление сверхтоков, т. е. токов, превышающих допустимое для данного участка системы значение. Так как сверхтоки могут появиться и в результате перегрузки, различают обычно ток перегрузки и ток короткого замыкания.

Одновременное соединение всех трех фаз между собою (рис. 239, а) называется трехполюсным коротким замыканием (или трехфазным); одновременное соединение двух фаз между собою (рис. 239, б) называется двухполюсным коротким замыканием (или двухфазным); соединение между фазой и нейтралью (рис. 239, в) называется однополюсным коротким замыканием (или однофазным). Однополюсное короткое замыкание происходит через землю, а потому наблюдается обычно только в установках с заземленной нейтралью; в генераторе с обмоткой, соединенной треугольником, оно не может иметь места. Одновременное соединение двух фаз с землей эквивалентно двухполюсному короткому замыканию, если нейтраль не заземлена, и одновременному появлению двух однополюсных коротких замыканий, если нейтраль заземлена. Трехполюсное короткое замыкание называется симметричным, двухполюсное и однополюсное — несимметричными.

При коротком замыкании система переходит от одного установившегося режима, соответствующего параметрам системы до появления короткого замыкания, к другому установившемуся режиму, соответствующему пара-

метрам системы при наличии короткого замыкания. Последний называют обычно установившимся коротким замыканием. Переходный процесс продолжается от 1 до 5 секунд. Соответственно этим режимам различают: 1) ток, проходящий по машине до короткого замыкания; он представляет собой ток нагрузки, если короткое замыкание происходит при режиме, в котором машина нагружена, или равно нулю, если короткое замыкание происходит при холостом ходе машины; 2) переходный ток короткого замыкания — ток, проходящий по машине в течение переходного режима; 3) установившийся ток короткого замыкания — ток, проходящий по машине при установившемся коротком замыкании. Процесс перехода тока от одного установившегося режима (до короткого замыкания) к другому (установившемуся короткому замыканию) сопровождается резким повышением тока и дальнейшим его снижением до установившегося значения, поэтому переходный ток короткого замыкания имеет разную величину в разные моменты времени переходного режима. Наибольшее из мгновенных значений переходного тока называется ударным током короткого замыкания; под ударным током всегда подразумевается мгновенное значение (амплитуда) тока, а не действующее. Значения переходного тока, лежащие между значениями ударного тока короткого замыкания и установившегося, называются промежуточными значениями тока короткого замыкания. Под установившимся током и под промежуточными значениями переходного тока подразумевают всегда действующее значение тока.

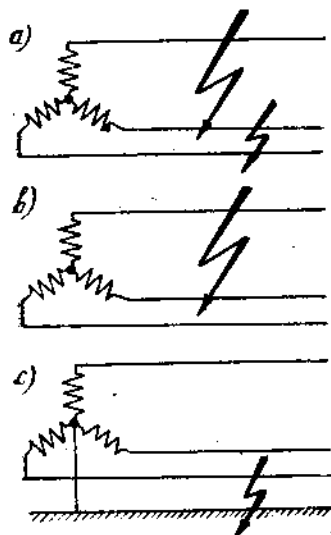


Рис. 239. Виды короткого замыкания: а) трехполюсное, б) двухполюсное, в) однополюсное.

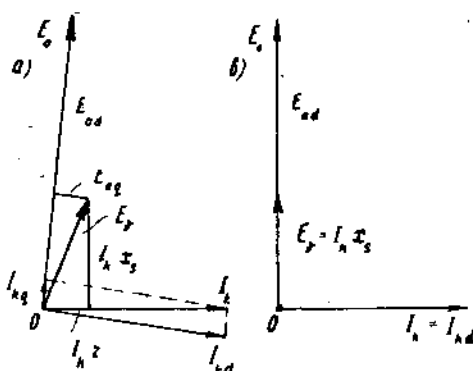


Рис. 240. Диаграмма Блонделя при установившемся коротком замыкании.

171. Установившееся короткое замыкание на зажимах синхронной машины.

Прежде чем рассматривать переходный режим короткого замыкания, рассмотрим установившееся короткое замыкание. Если короткое замыкание происходит на зажимах синхронной машины, то напряжение на зажимах машины равно нулю. В этом случае индуцированный результирующим потоком междужелезного пространства э. д. с. уравнивается только падениями напряжения в обмотке статора машины. На рис. 240, а приведена диаграмма Блонделя для случая короткого замыкания на зажимах машины. Вектор I_k — ток короткого замыкания; $r I_k$ и $x_s I_k$ — падения напряжения

в обмотке статора; E_b — э. д. с., индуцируемая результирующим потоком междужелезного пространства; E_{ad} и E_{aq} — э. д. с., соответствующие продольному и поперечному потокам реакции якоря; E_0 — э. д. с., индуцируемая потоком полюсов при холостом ходе машины. Вследствие малости угла ψ между E_0 и I_k очень близок к 90° , поэтому ток I_k является почти чисто реактивным и поток реакции якоря — почти чисто размагничивающим. Влияние, оказываемое на ток короткого замыкания активным сопротивлением обмотки статора r , очень мало, поэтому им всегда можно пренебрегать, и тогда диаграмма получает вид, изображенный на рис. 240, б. При пренебрежении сопротивлением r ток короткого замыкания является реактивным — продольным током I_{kd} (§ 92); э. д. с., соответствующая реакции якоря, обусловлена только продольным потоком (E_{ad}); поперечные составляющие тока и э. д. с. равны нулю:

$$I_{kq} = 0, \quad E_{aq} = 0.$$

Считая (как в диаграмме Бен-Эшенбурга) э. д. с., соответствующую потоку реакции, пропорциональной току ($E_{ad} = I_{kd} x_{ag}$), получаем из диаграммы (рис. 240, б):

$$I_{kd} = \frac{E_0}{x_s + x_{ag}} = \frac{E_0}{x}, \quad (288)$$

где $x = x_s + x_{ag}$ — синхронное реактивное сопротивление (§ 205). Таким образом, установившийся ток короткого замыкания равен э. д. с. холостого хода E_0 , деленной на синхронное реактивное сопротивление x .

Как указывалось в § 82, синхронное реактивное сопротивление x зависит от насыщения, поэтому при определении тока короткого замыкания по формуле (288) для разных токов возбуждения (разных значений E_0) необходимо пользоваться разными значениями x . Так как при нормальной работе машина всегда насыщена, то синхронная реактивность x , определенная по изменению напряжения при нормальной работе (§ 90), всегда меньше, чем синхронная реактивность при той же силе тока, но при коротком замыкании. Вследствие этого для вычисления тока короткого замыкания необходимо определять x по способу Бен-Эшенбурга (§ 82), а не по способу А.Л.Е. (§ 90).

Если короткое замыкание происходит на зажимах машины, то результирующий поток междужелезного пространства обычно невелик, а потому машину можно считать ненасыщенной. Обозначим для ненасыщенной машины э. д. с. реакции в продольной оси через

$$E_{ad} = I_{kd} x_{ad};$$

здесь x_{ad} — реактивное сопротивление, эквивалентное реакции якоря в продольной оси, — есть величина постоянная, не зависящая от насыщения машины. Синхронное реактивное сопротивление

$$x_d = x_s + x_{ad}$$

в этом случае также величина постоянная; оно определяется по прямой части характеристики холостого хода (§§ 82 и 205). Так как x_{ad} соответствует реакции якоря в продольной оси, то x_d будем называть синхронным сопротивлением для продольной оси машины (§ 92). Формула для тока короткого замыкания на зажимах машины получает вид:

$$I_{kd} = \frac{E_0}{x_d}; \quad (288a)$$

так как x_d соответствует ненасыщенной машине, то в формулу (288а) необходимо подставлять и значение E_0 , определенное для ненасыщенной машины по прямой части характеристики холостого хода (§ 205). Тогда при любом возбуждении можно пользоваться одним и тем же значением синхронного сопротивления x_d , что значительно упрощает расчеты токов короткого замыкания.

Если короткое замыкание происходит не на зажимах машины, а в сети, то машину нельзя уже считать ненасыщенной и формула (288а) даст неточный результат. Для получения точного значения тока в случае одного генератора можно пользоваться способом Рюденберга (§ 174). В случае большого числа генераторов в системе обычно пользуются способом Foerster'a: действительную характеристику холостого хода машины заменяют прямой линией, причем наклон этой прямой выбирают таким образом, чтобы она близко подходила к действительной характеристике в области нормального напряжения. Синхронное сопротивление в этом случае считают постоянным; тогда для вычисления тока короткого замыкания можно пользоваться формулой (288а), см. § 175.

172. Треугольник Потье.

Как следует из рис. 240, б, ампер-витки возбуждения при коротком замыкании AW_k затрачиваются на: 1) преодоление размагничивающих ампер-витков реакции якоря AW_a и 2) создание э. д. с. E_s , компенсирующей реактивное падение напряжения $x_s I_k$ (активным сопротивлением r пренебрегаем). Отложим на характеристике холостого хода ампер-витки AW_k (рис. 241). Ампер-витки реакции якоря при коротком замыкании в пренебрежении r прямо противоположны ампер-виткам возбуждения (§ 171). Вычитая из AW_k ампер-витки AW_a , получаем ампер-витки, идущие на создание э. д. с. рассеяния E_s :

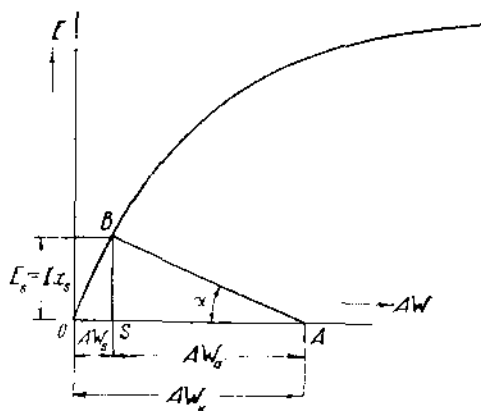


Рис. 241. Треугольник Потье.

$$AW_s = AW_k - AW_a. \quad (289)$$

Откладывая на характеристике холостого хода от AW_k ампер-витки AW_a в обратную сторону, получаем точку S, соответствующую AW_s . Очевидно, отрезок SB равен э. д. с. E_s . Треугольник ASB носит название треугольника Потье (Potier). Стороны треугольника Потье пропорциональны току обмотки статора: $AS = AW_a = 0,9 f_{m1} m w I = c_a I$; $SB = E_s = x_s I$; здесь $c_a = 0,9 f_{m1} m w$; x_s — реактивное сопротивление рассеяния. Так как угол BSA постоянный и равен 90° , то отрезок BA также изменяется пропорционально току. Если не пренебрегать r , то сторону AS треугольника Потье следует брать равной размагничивающим ампер-виткам реакции якоря $AW_{ad} = AW_a \sin \psi = c_a I \sin \psi = c_a I_a$. Тогда с достаточной точностью можно считать

$$SB = I z_s = I \sqrt{r^2 + x_s^2}.$$

173. Характеристика короткого замыкания.

Пользуясь треугольником Потье, легко получить зависимость тока короткого замыкания от возбуждения. Так как (рис. 242) $\operatorname{tg} \alpha = I_{x_s} / c_a = x_s c_a$, а x_s и c_a — величины постоянные, то стороны AB треугольников Потье, построенных для разных токов, всегда параллельны. Поэтому при разных возбуждениях (точки 1, 2, 3...) треугольник Потье имеет стороны A_1B_1 , A_2B_2 и т. д., соответственно чему получаем E_{s1} , E_{s2} и т. д. Если взять на оси ординат масштаб для токов, равный u/x_s , где u — масштаб для э. д. с., то величина E_s в масштабе токов равна току короткого замыкания I_k (так как $E_s = I_{x_s} = \overline{S_1B_1} \times u = S_1B_1 \frac{u}{x_s} x_s$). Строя кривую тока короткого замыкания I_k в функции тока возбуждения, получаем линию OK (рис. 242). Пока машина не насыщена, линия OK является прямой;

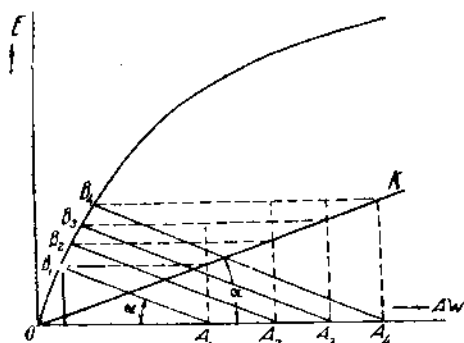


Рис. 242. Построение характеристики короткого замыкания

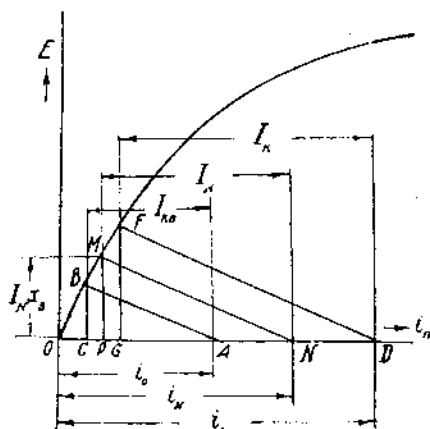


Рис. 243. Определение установившегося тока короткого замыкания по способу Рюденберга.

при наступлении насыщения линия OK загибается в сторону оси абсцисс, так как в насыщенной машине одинаковым приращениям падения напряжения ΔE_s соответствуют уже неодинаковые приращения тока возбуждения Δi_n . При указанном выше выборе масштаба для тока короткого замыкания (при котором кривая OK в масштабе тока дает I_k , а в масштабе э. д. с. — $I_k x_s$) угол наклона характеристики короткого замыкания к оси абсцисс равен α , причем $\operatorname{tg} \alpha = x_s c_a$. Если машина имеет закрытые или полузакрытые впадины, то характеристика короткого замыкания отклоняется в начальной части от прямой линии (§ 97).

174*. Способ Рюденберга для определения установившегося тока короткого замыкания синхронной машины.

а) Короткое замыкание на зажимах машины. Для определения установившегося тока короткого замыкания Рюденберг (R. Rüdenberg) использует треугольник Потье. Так как стороны треугольника Потье пропорциональны току короткого замыкания, то, построив треугольник для данного тока возбуждения, можно определить ток короткого замыкания, если известны коэффициенты пропорциональности x_s или $\frac{c_a}{x_s}$. Построение треугольника Потье для заданного тока возбуждения $i_1 = \overline{OD}$ (для которого требуется определить ток установившегося короткого замыкания) производится следующим образом. Проводим под углом $\alpha = \arctan x_s c_a$

из точки D линию $\overline{DF}$; в точке пересечения ее с характеристикой холостого хода получаем вершину треугольника Потье (рис. 243). Сторона GD в некотором масштабе изображает ток короткого замыкания ($GD = c_a I_k$). Для построения треугольника Потье и для определения масштаба в случае отсутствия данных о величине x_s и c_a можно воспользоваться следующими соотношениями. При возбуждении, соответствующем номинальному напряжению при холостом ходе i_0 , имеем ток короткого замыкания I_{k0} ; в некотором масштабе он равен отрезку $\overline{AC}$ (рис. 243); э. д. с. рассеяния $E_{s0} = \overline{BC}$. Если ток короткого замыкания равен номинальному току $I_{kN} = I_N = \overline{PN}$, то возбуждение должно быть равно i_N , а э. д. с. рассеяния $E_{sN} = \overline{MP}$. Считая начальную часть характеристики холостого хода прямой, получим, что треугольники OBA и OMN подобны, откуда

$$\frac{\overline{BA}}{\overline{MN}} = \frac{\overline{OA}}{\overline{ON}},$$

а следовательно:

$$\overline{ON} = \frac{\overline{MN} \times \overline{OA}}{\overline{BA}}.$$

Из подобия треугольников ABC и NMP следует, что $\frac{\overline{BA}}{\overline{MN}} = \frac{\overline{CA}}{\overline{PN}} = \frac{I_{k0}}{I_N}$.

Величина $\frac{\overline{CA}}{\overline{PN}} = \frac{I_{k0}}{I_N}$ называется кратностью тока короткого замыкания при

возбуждении холостого хода; обозначим ее через $f_{k0} = I_{k0}/I_N$. Тогда $\overline{ON} =$

$= \frac{\overline{OA}}{f_{k0}} = \frac{i_0}{f_{k0}}$. Величины f_{k0} и возбуждение при холостом ходе i_0 обычно известны (§ 217), поэтому нахождение точки N просто. Для построения

треугольника Потье требуется найти еще положение точки M . Величина $\overline{MP} = E_{sN} = I_N x_s$ представляет собою реактивное падение напряжения от потоков рассеяния; так как для синхронных машин обычно известно

процентное реактивное сопротивление $x_s \% = \frac{I_N x_s}{U_N} 100$ (§ 206), то отрезок

$\overline{MP}$ равен: $\overline{MP} = x_s \% \frac{U_N}{100}$. Соединяя точки N и M и опуская из M пер-

пендикуляр на ось абсцисс, получаем треугольник Потье. Отрезок $\overline{PN}$

равен I_N — номинальному току машины, откуда определяется масштаб для

тока короткого замыкания: $k = \overline{PN}/I_N$. Теперь для любого тока возбуждения i_1 определение тока короткого замыкания весьма просто. Проводим из i_1 линию, параллельную MN , и измеряем отрезок $\overline{DG}$. Ток короткого замыкания равен:

$$I_k = \frac{\overline{DG}}{k} = \frac{\overline{DG}}{\overline{NP}} I_N = \frac{\overline{DF}}{\overline{MN}} I_N$$

Если действительная характеристика холостого хода генератора неизвестна, можно пользоваться нормальной характеристикой синхронной машины, приводимой германскими нормами (§ 216), используя нормальные значения процентного реактивного сопротивления (§ 206) и кратности тока короткого замыкания (§ 217).

б) **Короткое замыкание в сети.** Если короткое замыкание происходит в сети, для определения тока установившегося короткого замыкания также можно пользоваться способом Рюденберга. В простейшем случае, когда коротким

замыканием вся нагрузка отключается (рис. 244) и сопротивление от генератора до места короткого замыкания чисто индуктивное, построение ведется тем же способом, что и для короткого замыкания на зажимах машины, но гипотенуза треугольника Потье проводится под углом α_c к оси абсцисс, причем $\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{x_s + x_c}{c_a}$, где x_s — реактивное сопротивление рассеяния генератора, x_c — реактивное сопротивление участка сети от генератора до места короткого замыкания. Построение производится на основании следующих соотношений (рис. 245). Отрезок $\overline{BC} = I_k x_s$, а отрезок $\overline{FD} = I_k (x_s + x_c)$; отсюда $\overline{FD} = \overline{BC} \frac{x_s + x_c}{x_s}$. Так как отрезок $\overline{BC}$ известен (см. пункт „а“), то нахождение отрезка $\overline{FD}$ просто. Очевидно, что отрезок $\overline{FG} = I_k x_c$ представляет собою напряжение на зажимах генератора при коротком замыкании в сети. В более сложных случаях короткого замыкания в сети, когда нагрузка не отключается, нахождение тока установившегося короткого замыкания затрудняется.¹⁾

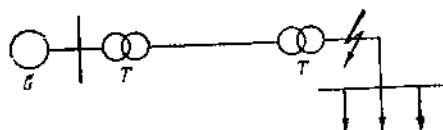


Рис. 244. Отключение нагрузки коротким замыканием.

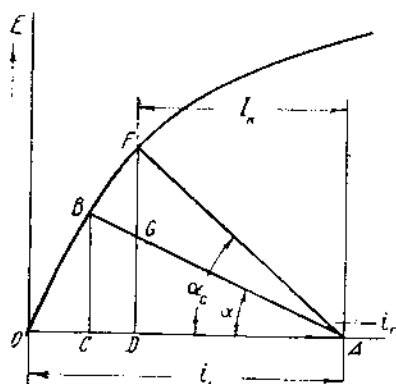


Рис. 245. Построение Рюденберга для случая короткого замыкания в сети.

175*. Способ Foerster'a для определения установившегося тока короткого замыкания.

Графический способ Рюденберга (§ 174) при расчете коротких замыканий в сложных сетях со многими генераторами практически затруднителен. Для того чтобы иметь возможность подсчитывать ток короткого замыкания аналитически по формуле

$$I_k = \frac{E_0}{x + x_c},$$

где x — синхронное сопротивление, x_c — сопротивление участка сети от генератора до места короткого замыкания, надо принять, что синхронное сопротивление x есть величина постоянная:

$$x = x_a + x_s = \text{const};$$

здесь x_a — сопротивление, эквивалентное реакции якоря, x_s — сопротивление рассеяния. В действительности при разных сопротивлениях сети x_c получаем разную величину тока I_k , что соответствует разной величине реакции якоря и разному насыщению машины (т. е. разным значениям x_a), вследствие чего подсчеты по этой формуле дают неправильный результат. Для того чтобы учесть насыщение, F. Foerster предлагает следующий способ подсчета.²⁾

¹⁾ Подробнее об этом см. F. Ollendorff. Praktische Berechnung von Kurzschlussströmen in mehrfach gespeisten Netzen. E. T. Z. 1931, стр. 1487, 1523, 1573.

²⁾ F. Foerster. Der Einfluss der Eisensättigung auf den Kurzschlussstrom von Synchronmaschinen. E. T. Z. 1926, стр. 1104.

Пусть имеем возбуждение i_1 , чему соответствует э.д.с. холостого хода E_{01} (рис. 246). Синхронное сопротивление равно (§ 82):

$$x = \frac{E_{01}}{I_{k1}};$$

здесь I_{k1} — ток при коротком замыкании на зажимах машины. Допущение постоянства этого синхронного сопротивления соответствует замене действительной характеристики холостого хода прямой линией, проходящей через точки C и F (рис. 246). Действительно, если провести по Рюденбергу (§ 174) из точки A луч AC , параллельный гипотенузе треугольника Потье, то имеем $BC = I_{k1}x_s$; $BD = I_{k1}x$, откуда $CD = I_{k1}(x - x_s) = I_{k1}x_a$. Принимая x_a (а следовательно, и x) постоянным, получим, что при изме-

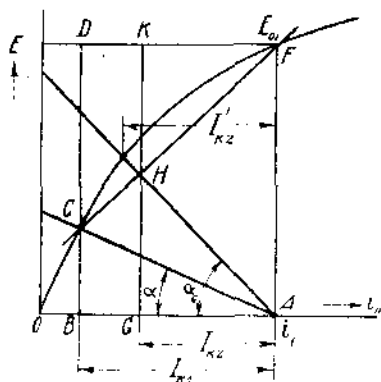


Рис. 246. Спрямление характеристики холостого хода.

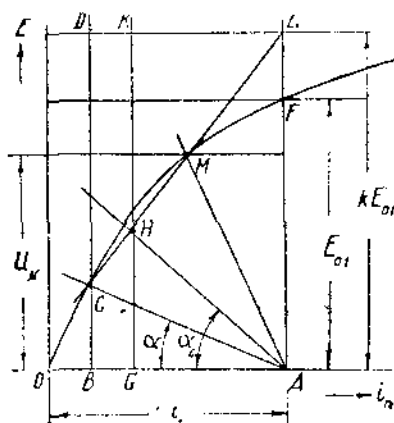


Рис. 247. Учет насыщения по Foerster'y.

нении I_k точка C должна двигаться по прямой, проходящей через точку C при $I_k = I_{k1}$ и через точку F при $I_k = 0$. Если короткое замыкание происходит в сети, то ток равен:

$$I_{k2} = \frac{E_{01}}{x + x_c}.$$

Откладывая $AG = I_{k2}$ и проводя из G линию, параллельную оси ординат, находим $GK = I_{k2}(x_a + x_s + x_c)$ и $HK = I_{k2}x_a$, откуда $GH = I_{k2}(x_s + x_c)$.

Так как $\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{HG}{AG} = \frac{I_{k2}(x_s + x_c)}{I_{k2}x_a}$ (§ 174), то для определения I_{k2} можно

проводить линию AH под углом $\alpha_c = \operatorname{arctg} \frac{x_s + x_c}{x_a}$ к оси абсцисс до пересечения со спрямленной характеристикой CF (т. е. поступать аналогично способу Рюденберга). Действительный ток короткого замыкания при тех же условиях I_{k2}' , полученный по способу Рюденберга с учетом насыщения, больше, как это видно из рис. 246. Для того чтобы учесть насыщение, Ф. Foerster проводит спрямленную характеристику холостого хода через точки C и L (рис. 247). Точка L соответствует возбуждению i_1 , для которого ищется ток короткого замыкания и определяется таким образом, чтобы спрямленная характеристика близко совпадала с действительной характеристикой холостого хода в пределах между линией AC , соответствующей э.д.с. рассеяния $E_s = BC$, и линией AM ,

пересекающей характеристику холостого хода в точке, соответствующей номинальному напряжению U_N . При больших напряжениях тогда, очевидно, будем получать токи короткого замыкания большие действительных, но короткое замыкание при таких напряжениях нереально. Обозначим отношение $\overline{AL}$ и $\overline{AF}$ через k , где k — коэффициент насыщения:

$$k = \frac{\overline{AL}}{\overline{AF}} = \frac{\overline{AL}}{E_{01}};$$

отсюда $\overline{AL} = kE_{01}$; таким образом, зная k , можно найти точку L . По Foerster'у при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению при полной нагрузке и $\cos \varphi = 0,7 \div 0,8$, коэффициент $k = 1,6$; при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению при холостом ходе, $k = 1,25$. Из рис. 247 имеем $\overline{BD} = kE_{01} = kI_{k1} x$; $\overline{BC} = I_{k1} x_s$; $\overline{CD} = I_{k1} (kx - x_s)$; при сопротивлении сети x_c имеем $\overline{GH} = I_{k2} (x_s + x_c)$; $\overline{HK} = I_{k2} (kx - x_s)$; $\overline{GK} = \overline{GH} + \overline{HK} = kE_{01}$, откуда

$$I_{k2} = \frac{kE_{01}}{kx + x_c} = \frac{E_{01}}{x + \frac{x_c}{k}};$$

здесь x и k — величины постоянные, следовательно, этой формулой можно пользоваться при аналитических подсчетах.

176. Внезапное короткое замыкание.

Синхронная машина состоит из магнитно-связанных цепей статора и ротора. При внезапном коротком замыкании в этих цепях появляются токи переходного режима, взаимодействующие друг с другом. Так как 1) коэффициент взаимоиנדукции между обмотками статора и ротора — величина переменная и 2) обмотка ротора несимметрична (расположена только в продольной оси полюсов), точное математическое рассмотрение вопроса внезапного короткого замыкания синхронной машины весьма сложно. Такой математический анализ приведен в книге J. Biermann's a. Ueberströme in Hochspannungsanlagen, Berlin, 1926 и в статье Yu H. Ku, Transient Analysis of A.-C. Machinery, Tr. A. I. E. E., июль 1929, стр. 707. Рюденберг заменяет действительную обмотку ротора симметричной многофазной, т. е. расположенной равномерно по всей окружности ротора, вследствие чего математическое решение вопроса значительно упрощается (см. книгу R. Rüdtenberg. Kurzschlussströme beim Betrieb von Grosskraftwerken. Berlin, 1925). Так как при математическом решении (помимо его сложности) затушевывается физическая сторона явления, ниже (§§ 178—187) процесс внезапного короткого замыкания рассмотрен только физически, на основании представлений о поведении магнитных потоков, связанных с замкнутыми проводящими контурами. Облекая эти представления в математические уравнения, можно получить в результате те же применяемые на практике формулы, что и при чисто математическом решении. При описании физических явлений, происходящих при внезапном коротком замыкании, будем придерживаться теории В. Ф. Миткевича о природе электрического тока и магнитного потока (В. Ф. Миткевич. Физические основы электротехники. Изд. Кубуч, Ленинград, 1932, см. в особенности, §§ 28—29 и 105), основные принципы которой, используемые при изучении внезапного короткого замыкания, приведены в § 177.

177. Свойства магнитных потоков, сцепленных с замкнутыми проводящими контурами.¹⁾

Магнитный поток, сцепляющийся с контуром тока, обладает инерцией. При изменении потока в контуре возникают силы как механического, так и электрического характера, стремящиеся сохранить величину магнитного потока неизменной.

Механические силы проявляются в передвижении контура относительно магнитного потока таким образом, чтобы он охватывал новый магнитный поток, равный первоначальному. Силы электрического характера проявляются в возникновении э. д. с. самоиндукции $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}$, создающей ток, который поддерживает прежнее значение потока. Эта э. д. с. по своему действию вполне аналогична механической силе инерции. При коротком замыкании имеем дело, главным образом, с появлением э. д. с. самоиндукции $\mathcal{E}$, вызывающей появление уравнительного тока. Уравнительный ток создает поток самоиндукции, компенсирующий изменение потока сцепления. В случае отсутствия каких-либо омических сопротивлений в контуре, возникший уравнительный ток и созданный им поток не исчезают; в этом случае магнитный поток сцепления может в действительности сохранять свою величину постоянной, что и наблюдается на опыте в сверхпроводниках (т. е. в проводниках, имеющих $r = 0$). В действительности, однако, уравнительный ток с течением времени уменьшается, так как контур обладает омическим сопротивлением, поглощающим энергию и переводящим ее в теплоту. Поэтому поток, созданный уравнительным током и компенсирующий изменения потока сцепления, с течением времени уменьшается, а следовательно, уменьшается и сцепляющийся с контуром общий поток; при наличии омического сопротивления контура о неизменности магнитного потока сцепления можно говорить только для начального момента времени; в дальнейшем поток постепенно изменяется. Так как компенсирующий поток самоиндукции прямо пропорционален уравнительному току, то достаточно получить закон изменения тока. Для замкнутого проводящего контура имеем уравнение:

$$L \frac{di}{dt} + ri = 0 \quad (290)$$

(емкостью обмоток синхронных машин можно пренебречь); здесь i — ток в контуре, L — коэффициент самоиндукции контура, r — омическое сопротивление. Внешняя э. д. с. равна нулю, так как мы рассматриваем только уравнительный ток, вызванный э. д. с. самоиндукции. Решение уравнения (290) имеет вид²⁾:

$$i = i_0 e^{-\frac{r}{L}t}, \quad (291)$$

здесь i_0 — начальное значение тока, e — основание натуральных логарифмов, t — время. Таким образом, уравнительный ток затухает по экспоненциальному закону; следовательно, и поток самоиндукции затухает по закону:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\frac{r}{L}t}, \quad (292)$$

¹⁾ В. Ф. Миткевич. Физические основы электротехники. Ленинград, 1932.

²⁾ А. Френкель. Теория переменных токов. Перевод с нем. М.—Лгр., 1933.

где Φ_0 — начальное значение потока. Коэффициент затухания r/L зависит только от параметров обмотки, по которой проходит уравнильный ток. Обозначая $L/r = T$, получаем

$$\Phi = \Phi_0 e^{-t/T}; \quad (293)$$

величина T имеет размерность времени и носит название постоянной времени обмотки (§ 212). Если в контуре имеется внешняя э. д. с., то уравнильный ток накладывается на ток внешней э. д. с.

178. Соотношения между потоком сцепления и током.

В дальнейшем при изучении короткого замыкания будем принимать следующие положения.

Все потоки распределены синусоидально.

Под потоком сцепления подразумеваем число потокосцеплений, т. е. величину

$$\Psi = f_w w \Phi, \quad (294)$$

где Ψ — поток сцепления, Φ — действительное число магнитных линий (реально существующий поток), w — число витков, с которыми сцепляется поток Φ , f_w — коэффициент обмотки. Так как одни и те же магнитные линии могут сцепляться с разными обмотками (поток взаимной индукции), то удобно, сохраняя число магнитных линий Φ неизменным, заменить действительные обмотки обмотками, имеющими одинаковые числа витков и коэффициенты обмоток. При такой замене потоки сцепления всех обмоток прямо пропорциональны действительному числу магнитных линий, поэтому все уравнения, относящиеся к действительным потокам, будут справедливы и для потоков сцепления. В дальнейшем все потоки сцепления будем относить к обмотке статора, для чего поток сцепления любой обмотки, имеющей w_1 и f_{w1} , надо умножить на величину $f_w w / f_{w1} w_1$, где f_w и w — обмоточный коэффициент и число витков обмотки статора, f_{w1} и w_1 — то же, рассматриваемой обмотки. Таким образом, под потоком сцепления обмотки возбуждения будем подразумевать поток сцепления, отнесенный к обмотке статора:

$$\Psi_n = f_{wn} w_n \Phi_n \frac{f_w w}{f_{wn} w_n} = f_w w \Phi_n. \quad (295)$$

Магнитный поток сцепления Ψ и создающий его ток I связаны следующим соотношением: ¹⁾

$$\Psi 10^{-8} = \sqrt{2} I L, \quad (296)$$

где L — коэффициент самоиндукции контура в генри, I — действующее значение силы тока в амперах; вводя вместо L реактивное сопротивление $jx = j\omega L$, где x — в омах, получаем

$$j\omega \Psi 10^{-8} = \sqrt{2} I jx; \quad (297)$$

здесь пользуемся комплексной формой реактивного сопротивления, для чего вводим символ $j = \sqrt{-1}$.

¹⁾ В. Ф. Миткевич, Физические основы электротехники. Ленинград, 1932.

Из формул (296) и (297) видно, что сила тока при данном потоке Ψ не зависит от угловой частоты ω ; поэтому в дальнейшем при определении I будем потокам, в действительности вращающимся с разной скоростью, приписывать одну и ту же скорость ω .

Поток сцепления обмотки возбуждения, отнесенный к обмотке статора, связан с э. д. с. холостого хода E_0 уравнением:

$$j\omega \Psi_n 10^{-8} = j\omega f_w w \Phi_n 10^{-8} = j2\pi f_w w \Phi_n 10^{-8} = j\sqrt{2} E_0. \quad (298)$$

[179. Изменение магнитных потоков, сцепляющихся с обмотками трехфазной синхронной машины, при внезапном коротком замыкании на зажимах машины.

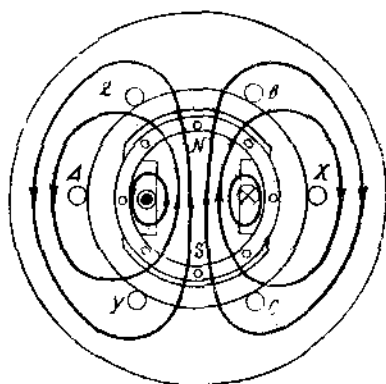
а) Внезапное короткое замыкание трехфазной синхронной машины, имеющей успокоительную обмотку на роторе, происходящее в момент прохождения э. д. с. рассматриваемой фазы A через нуль.

Поток, сцепляющийся с обмоткой возбуждения при холостом ходе, равен: $\Psi_n = \Psi_a + \Psi_{sn}$; здесь Ψ_{sn} — поток рассеяния полюсов; Ψ_a — продольный поток полюсов, проходящий через междужелезное пространство; Ψ_a сцепляется с успокоительной обмоткой и с обмотками статора. С обмоткой фазы A статора сцепляется поток Ψ , состоящий из: 1) потока взаимоиנדукции, созданного токами, проходящими по другим обмоткам (например, поток полюсов Ψ_a , сцепляющийся с обмоткой A) и 2) из потока самоиндукции, созданного токами, проходящими по обмотке фазы A (поток рассеяния статора Ψ_s , поток реакции статора Ψ_a). При холостом ходе сцепляющийся с обмоткой фазы A поток является потоком взаимоиנדукции, поток самоиндукции равен нулю. На рис. 248, а представлено распределение магнитных потоков при холостом ходе машины в момент времени, когда поток, сцепляющийся с витками обмотки фазы A статора, равен максимальному значению. В этот момент времени э. д. с. в фазе A равна нулю. Если в машине происходит внезапное короткое замыкание всех фаз статора, то по принципу инерции магнитного потока все сцепляющиеся с различными обмотками потоки должны оставаться постоянными (§ 177). Рассмотрим в отдельности потоки, сцепляющиеся с каждой обмоткой, причем примем, что короткое замыкание происходит в момент времени, когда поток, сцепляющийся с обмоткой фазы A статора, имеет максимальное значение (рис. 248, а).

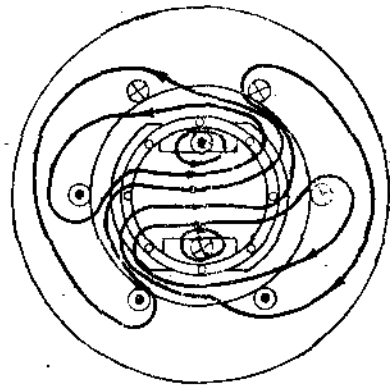
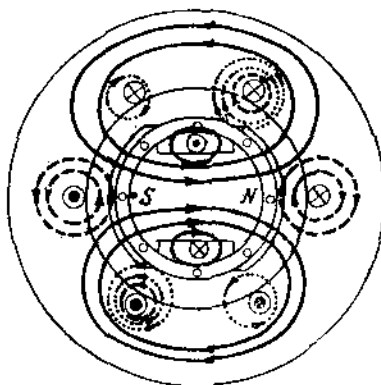
1) Магнитный поток, сцепляющийся с обмоткой фазы A статора, в течение переходного режима короткого замыкания стремится остаться постоянным. В начальный момент короткого замыкания он состоит только из потока взаимоиנדукции и равен продольному потоку северного полюса Ψ_a (рис. 248, а). При вращении ротора сцепляющийся с обмоткой фазы A поток взаимоиנדукции постепенно исчезает, так как Ψ_a движется вместе с ротором. Но вследствие пересечения потоком Ψ_a обмотки A в ней индуктируется ток i_c , создающий добавочный поток самоиндукции (§ 177); следовательно, поток, сцепляющийся при коротком замыкании с обмоткой фазы A , равен сумме: 1) уменьшающегося потока взаимоиנדукции и 2) добавочного потока самоиндукции. Так как по закону Ленца (§ 8) поток самоиндукции имеет то же направление, что и уменьшающийся поток взаимоиנדукции, а по величине равен его уменьшению, то суммарный поток, сцепляющийся с обмоткой фазы A , остается без изменения; по мере уменьшения потока взаимоиנדукции поток самоиндукции растет. Спустя четверть периода после начала короткого замыкания поток взаимоиנדукции равен нулю (рис. 248, б). Весь поток, сцепляющийся

a) $t=0$

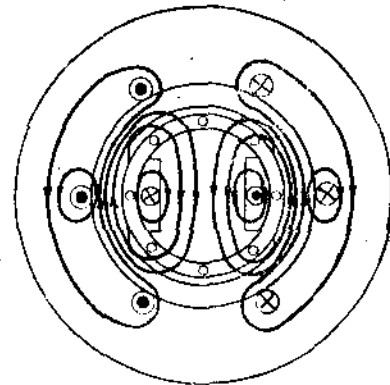
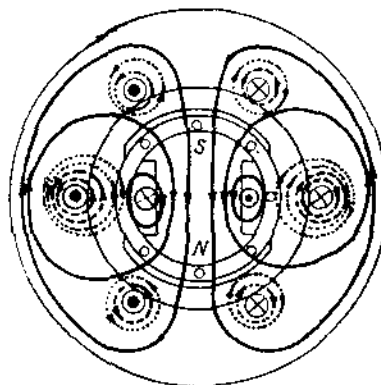
Рис. 248. Изменение потока, сцепляющегося с фазой A статора. Слева — положение отдельных потоков, справа — результирующая картина; сплошные линии — поток полюсов и результирующий поток, штриховой пунктир — постоянная составляющая потока Ψ_c , точечный пунктир — переменная составляющая потока Ψ_v .



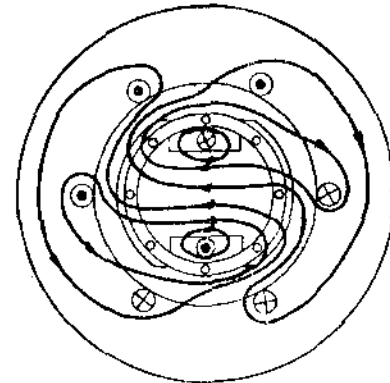
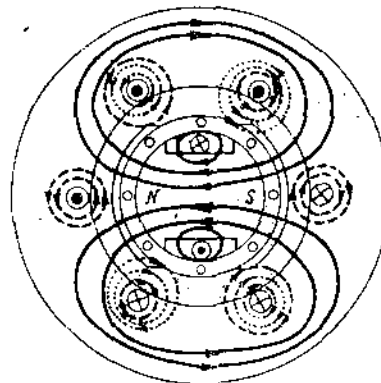
b) $t=T/4$



c) $t=T/2$



d) $t=3T/4$



в этот момент времени с обмоткой фазы A , является потоком самоиндукции и создается исключительно током i_c (рис. 248, b).

Поток самоиндукции существует до тех пор, пока по обмотке статора проходит ток i_c . Если бы омическое сопротивление обмотки статора r_g было равно нулю, то ток i_c сохранял бы неизменными свое направление и величину бесконечно долгое время. ¹⁾ Следовательно, и поток самоиндукции оставался бы все время постоянным. Тогда при исчезновении потока взаимной индукции в сцеплении с обмоткой A статора остался бы не изменяющийся с течением времени поток самоиндукции, равный по величине начальному значению потока взаимной индукции; ток короткого замыкания равнялся бы постоянному по величине и по направлению току i_c . В действительности сопротивление статора r_g не равно нулю; поэтому ток i_c , сохраняя свое направление неизменным, уменьшается с течением времени по величине (затухает). Уменьшение тока i_c происходит по экспоненциальному закону (§ 177); $i_c = I_{c\max} e^{-t/T_a}$, где $T_a = L/r_g$ — постоянная времени обмотки статора; r_g — омическое сопротивление, а L — коэффициент самоиндукции обмотки статора. Изменение тока i_c показано на рис. 249, a . Обычно i_c затухает по истечении 0,2 ÷ 0,3 секунд (§ 188). Соответственно уменьшению тока i_c уменьшается по такому же закону и поток самоиндукции. Вследствие этого постоянство потока, сцепляющегося с обмоткой, может поддерживаться только в начальный момент короткого замыкания. Так как направление тока i_c остается неизменным и при $r_g \neq 0$, то его называют составляющей постоянного тока короткого замыкания.

Поток взаимной индукции равен нулю спустя четверть периода после начала короткого замыкания (рис. 248, b). При дальнейшем движении ротора он начинает расти, но уже имеет обратное направление, так как в обмотку фазы A начинает входить продольный поток южного полюса. Суммарный поток, сцепляющийся с обмоткой A , должен уменьшиться, но при возрастании потока взаимной индукции обратного направления в обмотке фазы A индуцируется ток i_v , который по закону Ленца противодействует увеличению потока взаимной индукции (§ 177). Ток i_v создает магнитный поток, направленный навстречу потоку взаимной индукции, и поддерживает суммарный поток, сцепляющийся с обмоткой A , постоянным. Направление тока i_v , очевидно, такое же, как и у составляющей постоянного тока i_c . Спустя половину периода после начала короткого замыкания (рис. 248, c) через обмотку A проходит максимальный продольный поток южного полюса; в этот момент времени ток i_v , индуцированный этим потоком, имеет максимальное значение $I_{v\max}$, равное максимальному значению составляющей постоянного тока $I_{c\max}$. При дальнейшем движении ротора поток взаимной индукции уменьшается, вследствие чего уменьшается и противодействующий ему ток i_v . Спустя три четверти периода после начала короткого замыкания (рис. 248, d) поток взаимной индукции равен нулю; ток i_v также равен нулю. При дальнейшем движении ротора в обмотку A начинает входить продольный поток северного полюса; он индуцирует ток i_v уже обратного направления по сравнению с составляющей постоянного тока i_c . Спустя один период после начала короткого замыкания ток i_v имеет максимальное значение $I_{v\max}$, равное максимальному значению тока $I_{c\max}$, и направлен навстречу ему; суммарный ток в обмотке статора в этот момент времени равен нулю (рис. 250). Несмотря на это, поток, сцепляющийся с обмоткой A , равен прежнему значению,

¹⁾ Такое явление наблюдается в сверхпроводниках. См., например, В. Ф. Миткевич. Физические основы электротехники, Ленинград, 1932.

так как в данный момент времени он поддерживается током возбуждения. При дальнейшем движении ротора ток i_v снова начинает уменьшаться и т. д. Таким образом, ток i_v является переменным током, имеющим частоту $\nu = p\omega/60$; он называется составляющей переменного тока короткого замыкания. Величина его определяется величиной потока взаимной индукции, максимальное значение соответствует продольному потоку полюсов Ψ_d . Если продольный поток полюсов остается постоянным, то максимальное (и действующее) значение тока i_v остается постоянным (рис. 250). В действительности, как увидим ниже, поток Ψ_d уменьшается

по экспоненциальному закону с постоянной времени, зависящей от параметров обмоток ротора. По этому же закону уменьшается и ток i_v (рис. 249, б).

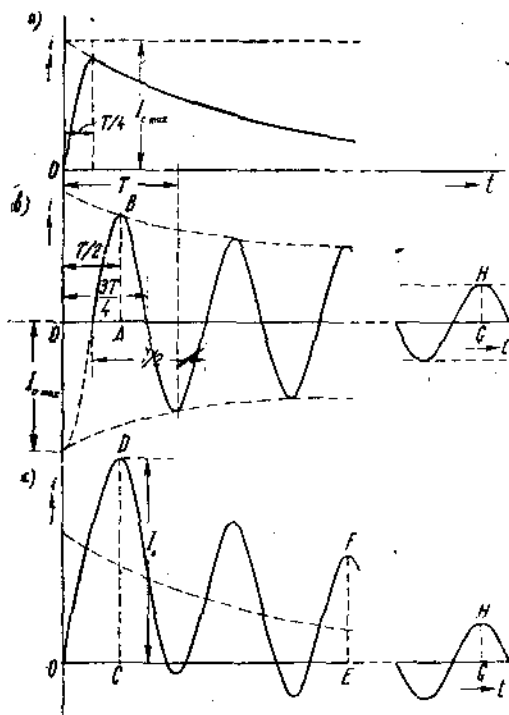


Рис. 249. Изменение тока в фазе А статора: а) составляющая постоянного тока, б) составляющая переменного тока, в) суммарный ток короткого замыкания.

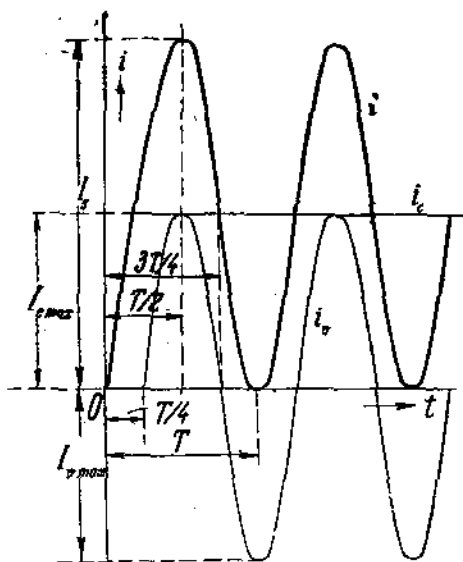


Рис. 250. Изменение составляющих тока короткого замыкания i_c и i_v в отсутствии насыщения.

Следовательно, ток короткого замыкания, проходящий по обмотке фазы А статора, представляет собою сумму двух токов: 1) составляющей постоянного тока i_c , затухающей с постоянной времени статора; этот ток можно назвать свободным уравнивающим током; 2) составляющей переменного тока i_v , затухающей с постоянной времени ротора (обмотки возбуждения); этот ток является вынужденным уравнивающим током. Суммарный ток короткого замыкания представлен на рис. 249, в. Максимальные значения составляющих постоянного и переменного тока равны друг другу: $I_{c\max} = I_{v\max}$. Наибольшее мгновенное значение суммарного тока называется ударным током короткого замыкания $I_s = \overline{CD}$; соответствующее ему наибольшее действующее значение тока i_v называется начальным значением составляющей переменного тока $I_{v0} = \overline{AB}/\sqrt{2}$, а наибольшее значение амплитуды составляющей переменного тока называется начальной амплитудой $I_{v0\max} = \overline{AB} =$

$=\sqrt{2} I_{\infty}$. Ток $I_k = \overline{GH}/\sqrt{2}$ есть установившийся ток короткого замыкания; ток $I_e = \overline{EF}/\sqrt{2}$ — промежуточное значение тока короткого замыкания. Действующее значение составляющей переменного тока короткого замыкания I_v равно в любой момент времени действующему значению переменного тока, имеющего постоянную амплитуду, равную амплитуде составляющей i_v для данного момента времени. Действующее значение полного тока короткого замыкания (переходного) равно корню квадратному из суммы квадратов составляющей постоянного тока i_e и действующего значения I_v составляющей переменного тока:

$$I_e = \sqrt{i_e^2 + I_v^2}.$$

Поток, сцепляющийся с обмоткой А статора, на основании предыдущих рассуждений, можно рассматривать как сумму: 1) постоянного затухающего потока самоиндукции Ψ_e , созданного током статора i_e ; этот поток неподвижен относительно обмотки статора, а следовательно, неподвижен в пространстве; максимальное значение потока Ψ_e равно Ψ_d ; 2) переменного потока взаимоиндукции полюсов Ψ_d , созданного токами ротора; этот поток вращается в пространстве (относительно обмотки статора) со скоростью ротора; 3) переменного потока самоиндукции Ψ_v , созданного током статора i_v ; этот поток равен по величине потоку Ψ_d и направлен ему навстречу. Суммарный поток, сцепляющийся с обмоткой статора А, следовательно, равен Ψ_e и исчезает с течением времени с постоянной времени статора. Поток полюсов Ψ_d , вращаясь вместе с ротором, пересекает все три фазы статора; так как все фазы статора замкнуты накоротко, то уравнивательный вынужденный ток i_v индуктируется в каждой фазе, но имеет в них сдвиг во времени в 120° , соответственно сдвигу фазных обмоток в пространстве. Поэтому переменный поток самоиндукции Ψ_v создается в каждой фазе; вследствие сдвига потоков Ψ_e каждой фазы во времени и в пространстве на 120° , результирующий поток всех трех фаз в $m/2$ раз больше потока одной фазы и вращается относительно статора с синхронной скоростью (§ 70); таким образом, результирующий поток всех трех фаз, создаваемый переменными токами i_v , неподвижен относительно полюсов.

2) Рассмотрим теперь успокоительную обмотку. До начала короткого замыкания с нею сцепляется поток полюсов Ψ_d ; пока Ψ_d остается постоянным, он не индуктирует в успокоительной обмотке никаких токов. При внезапном коротком замыкании возникают потоки самоиндукции статора Ψ_e и Ψ_v , созданные уравнительными токами статора i_e и i_v . Созданный переменным током i_v поток статора Ψ_v вращается синхронно с успокоительной обмоткой, а потому, если он остается неизменным по величине, не должен индуктировать в ней никаких токов. Однако, до начала короткого замыкания поток Ψ_v не существует. Появляясь при коротком замыкании, он пересекает успокоительную обмотку и индуктирует в ней ток i_{dc} , поддерживающий сцепляющийся с успокоительной обмоткой поток постоянным. Ток i_{dc} создает поток самоиндукции успокоительной обмотки, равный результирующему потоку Ψ_v всех фаз статора и направленный ему навстречу; так как в дальнейшем результирующий поток Ψ_v остается постоянным относительно успокоительной обмотки, то ток i_{dc} имеет неизменное направление.

Если бы омическое сопротивление успокоительной обмотки r_d было равно нулю, то ток i_{dc} оставался бы постоянным по величине; в действительности он, аналогично составляющей постоянного тока статора, затухает по закону $i_{dc} \approx I_{dc \max} e^{-t/T_d}$, где $T_d = L_d/r_d$ — постоянная времени успокоительной обмотки. Так как коэффициент самоиндукции успокоительной

обмотки L_d по сравнению с омическим сопротивлением r_d очень мал, ток i_{dc} затухает очень быстро; уже по истечении $2 \div 3$ периодов от начала короткого замыкания ($0,04 \div 0,06$ сек.) он равен нулю.

Кроме потока Ψ_v , обмоткой статора создается поток Ψ_c , неподвижный в пространстве. Этот поток также индуцирует в успокоительной обмотке уравнительный ток i_{dv} ; этот ток является переменным, имеющим частоту $\nu = p\Omega/60$. Величина его определяется потоком Ψ_c , следовательно, ток i_{dv} затухает по тому же закону, что и постоянный ток статора (рис. 251, с).

3) С обмоткой возбуждения до короткого замыкания сцепляется поток Ψ_n ; по обмотке проходит ток возбуждения i_n . При коротком замыкании в обмотке возбуждения индуцируются потоками статора уравнительные токи, поддерживающие поток обмотки возбуждения Ψ_n постоянным. Не останавливаясь подробно на этом процессе, так как он аналогичен с рассмотренным выше для успокоительной обмотки, можем сказать, что в обмотке возбуждения будет две составляющих уравнительного тока

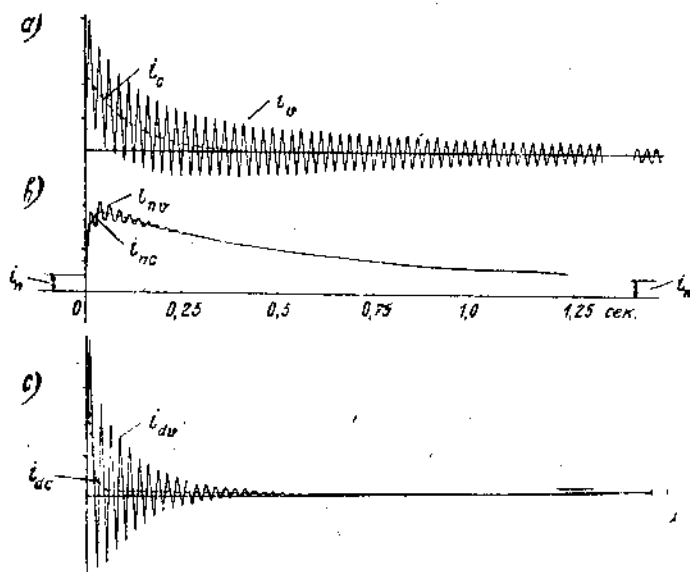


Рис. 251. Кривые тока при коротком замыкании: а) ток в статоре, б) ток в обмотке возбуждения, с) ток в успокоительной обмотке.

Ток постоянного направления i_{nc} индуцируется вращающимся синхронно с ротором потоком статора Ψ_v (вызванным переменным током i_v). Ток i_{nc} затухает по закону $i_{nc} = I_{nc \max} e^{-t/T_n}$, где $I_n = L_n/r_n$ — постоянная времени обмотки возбуждения; r_n — омическое сопротивление, L_n — коэффициент самоиндукции обмотки возбуждения. Вследствие большого значения L_n по сравнению с r_n , ток i_{nc} затухает медленно, в течение $1 \div 5$ секунд; так же медленно затухает и поток обмотки возбуждения. Кроме постоянной составляющей уравнительного тока i_{nc} , в обмотке возбуждения индуцируется неподвижным в пространстве потоком статора Ψ_c (вызванным постоянным током i_c) переменный ток i_{nv} нормальной частоты $\nu = p\Omega/60$. Ток i_{nv} затухает с постоянной времени статора. Уравнительные токи i_{nc} и i_{nv} накладываются на ток возбуждения i_n (рис. 251, б).

Вследствие появления уравнительных токов в успокоительной обмотке и в обмотке возбуждения, поддерживающих в начальный момент короткого замыкания сцепляющиеся с ними потоки неизменными, поток статора по существу не может проникнуть в ротор, что иллюстрируется правой частью

рис. 248, с (где изображен результирующий поток машины, в то время как на левой части изображены не существующие в действительности отдельные составляющие потоков).

Обмотка ротора вытесняет поток статора в междужелезное пространство. То же относится и к потоку ротора, который вытесняется в междужелезное пространство уравнительными токами статора и не может проникнуть в статор. Общий поток, существовавший в машине до короткого замыкания, расщепляется на две части: одна часть увлекается вместе с ротором, другая остается в сцеплении с обмоткой статора. Таким образом, потоки самоиндукции статора Ψ_c и Ψ_v в начальный момент короткого замыкания представляют собою поток рассеяния статора. Так как сопротивление для потока рассеяния статора велико, то для создания его требуется очень большой ток, чем и объясняется большая величина тока короткого замыкания. По истечении $1 \div 3$ периодов от начала короткого замыкания составляющая постоянного уравнительного тока в успокоительной обмотке затухает; поэтому поток, сцепляющийся с нею, изменяется; он уменьшается, так как теперь поток статора Ψ_v проникает в успокоительную обмотку. В обмотке возбуждения в это время уравнительный постоянный ток имеет еще прежнюю величину и сцепляющийся с нею поток Ψ_n остается постоянным. Выше указывалось, что поток Ψ_n состоит из двух составляющих: продольного потока Ψ_d и потока рассеяния полюсов Ψ_{sp} . Поток Ψ_d сцепляется с успокоительной обмоткой; от проникновения в нее потока статора Ψ_v поток Ψ_d уменьшается; в то же время поток рассеяния полюсов Ψ_{sp} , проходящий помимо успокоительной обмотки, растет таким образом, что общий поток Ψ_n , сцепляющийся с обмоткой возбуждения, остается постоянным. Входящий в статор поток Ψ_d , следовательно, уменьшается на величину добавочного потока рассеяния ротора, и ток статора i_v , индуктированный потоком Ψ_d , уменьшается. По мере затухания постоянной составляющей уравнительного тока в обмотке возбуждения i_{dc} , сцепляющийся с нею поток Ψ_n уменьшается. При этом все большая часть потока статора входит в ротор. Поток статора теперь состоит из потока рассеяния и из увеличивающегося постепенно потока реакции. Соответственно увеличению потока реакции статора поток Ψ_d , входящий в статор, непрерывно уменьшается; уменьшается и составляющая переменного тока статора i_v . Ток i_v затухает, следовательно, с постоянной времени обмотки возбуждения. Когда составляющая постоянного уравнительного тока ротора спадет до нуля, реакция статора примет нормальную величину, сопротивление обмотки статора станет равно синхронному сопротивлению, ток статора станет равным установившемуся току короткого замыкания; поток, входящий в статор, будет равен потоку, создаваемому ампер-витками $AW_n - AW_{sp}$, где AW_n — ампер-витки полюсов, AW_{sp} — ампер-витки реакции якоря.

б) Величина ударного тока в фазе А в машине с успокоительной обмоткой на роторе.

Определим величину ударного тока короткого замыкания в фазе А в случае, если короткое замыкание происходит в момент прохождения э. д. с. фазы А через нуль. Ударный ток равен сумме двух составляющих: постоянной i_c и переменной i_e (рис. 249, с); он проходит по обмотке спустя половину периода после начала короткого замыкания, когда обе составляющие складываются. Пренебрежем предварительно затуханием. Тогда ток i_c должен дать поток, равный потоку, сцепляющемуся с обмоткой фазы А в начальный момент короткого замыкания, т. е.

$$i_c L = \Psi_d 10^{-8} = \omega f_w \Phi_d 10^{-8}; \quad (299)$$

здесь Φ_d — продольный поток полюсов (число магнитных линий), w — число витков одной фазы обмотки статора, f_w — коэффициент обмотки, L — коэффициент самоиндукции статора. Так как поток Ψ_c статора представляет собою поток рассеяния, то вместо L следует подставить коэффициент самоиндукции потоков рассеяния S , т. е.

$$i_c S = i_c \frac{x_s}{\omega} = w f_w \Phi_d 10^{-8}, \quad (300)$$

откуда

$$i_c = \frac{w f_w \Phi_d \omega 10^{-8}}{x_s} = \frac{2\pi \nu f_w w \Phi_d 10^{-8}}{x_s}; \quad (301)$$

здесь $x_s = \omega S$ — реактивное сопротивление рассеяния, $\omega = 2\pi\nu$ — угловая частота тока, ν — частота в пер./сек. Так как при синусоидальном поле э. д. с. холостого хода равна (§ 57):

$$E_0 = \frac{4\pi}{2\sqrt{2}} f_w w \nu \Phi_d 10^{-8},$$

то

$$I_{c\max} = \frac{\sqrt{2} E_0}{x_s}. \quad (302)$$

Составляющая переменного тока (пренебрегая затуханием) также должна дать поток, равный Ψ_d , откуда

$$I_{v\max} = \frac{\sqrt{2} E_0}{x_s}. \quad (303)$$

Следовательно, ударный ток короткого замыкания (мгновенное значение его, т. е. амплитуда) в отсутствии затухания равен:

$$I_s = \frac{2\sqrt{2} E_0}{x_s}. \quad (304)$$

В то время, как составляющую переменного тока i_v по истечении половины периода от начала короткого замыкания можно считать неизменной, составляющая постоянного тока i_c к этому времени уже успевает сильно уменьшиться (рис. 249). По опытам Rüdénberg'a ударный ток короткого замыкания в среднем равен:

$$I_s = \frac{1,8\sqrt{2} E_0}{x_s}. \quad (305)$$

По этой формуле обычно и определяют I_s (§ 186).

с) Внезапное короткое замыкание синхронной машины, имеющей успокоительную обмотку на роторе, происходящее в момент прохождения э. д. с. рассматриваемой фазы A через максимум.

Мы рассматривали короткое замыкание в момент времени, когда поток, сцепляющийся с обмоткой фазы A статора, равен максимальному значению. Практически короткое замыкание может возникнуть в любой момент времени. Поэтому рассмотрим другой крайний случай, а именно, когда сцепляющийся с обмоткой фазы A поток равен нулю. По принципу инерции потока (§ 177) следует, что в этом случае во время переходного режима поток, сцепляющийся с обмоткой фазы A , должен быть равен нулю. Поэтому входящий в обмотку A при движении ротора поток Ψ_d индуцирует уравнительный ток i_v , являющийся на основании предыдущих рассуждений переменным; наибольшее значение тока i_v равно:

$$I_{v\max} = \frac{\sqrt{2} E_0}{x_s}. \quad (306)$$

Постоянный уравнивающий ток i_c не возникает, так как в начальный момент короткого замыкания поток, сцепляющийся с обмоткой фазы A , равен нулю. Следовательно, в этом случае ток короткого замыкания в статоре состоит только из составляющей переменного тока i_a , затухающей с постоянной времени ротора; наибольшее значение тока короткого замыкания (амплитуда) равно $I_{a\max}$.

В роторе (в успокоительной обмотке и в обмотке возбуждения) появляются те же уравнивающие токи, что и в предыдущем случае. Постоянные составляющие токов в роторе индуктируются переменным потоком самондукции всех трех фаз статора Ψ_a . Переменные составляющие токов в роторе индуктируются постоянным (неподвижным в пространстве) потоком самоиндукции фаз B и C статора, в которых явление происходит аналогично с рассмотренным в пункте „а“, так как потоки, сцепляющиеся с обмотками B и C в начальный момент короткого замыкания, не равны нулю.

д) Внезапное короткое замыкание синхронной машины, не имеющей успокоительной обмотки на роторе.

Для поддержания неизменности потока Ψ_c требуется вполне определенная величина тока:

$$i_c = \frac{\Psi_c 10^{-8}}{S} = \frac{\sqrt{2} E_0}{x_s}.$$

Если проводимость для магнитного потока остается все время постоянной ($S = \text{const}$), то ток i_c также остается постоянным. Это может быть только в машинах с цилиндрическим ротором с совершенной успокоительной обмоткой. В машинах с явно выраженными полюсами без успокоительной обмотки проводимость для магнитного потока Ψ_c не остается постоянной; она наименьшая, когда против оси фазы стоит середина полюса (так как в этом положении возмущению Ψ_c препятствуют уравнивающие токи в обмотке возбуждения и в полюсных наконечниках) и наибольшая, когда против оси фазы расположена поперечная ось машины (в этой оси нет никаких обмоток на роторе). Соответственно этому для поддержания постоянства потока Ψ_c требуется больший ток, когда ось фазы совпадает с осью полюсов, и меньший ток, когда ось фазы сдвинута на 90° от оси полюсов. Так как полюса непрерывно движутся относительно оси фазы, то составляющая постоянного тока в машине без успокоительной обмотки испытывает пульсации с двойной частотой (рис. 252). В этом случае составляющую постоянного тока можно представить как сумму двух токов: 1) среднего значения пульсирующего постоянного тока и 2) накладываются на него гармоники двойной частоты. В остальном переходный режим протекает в машине без успокоительной обмотки так же, как и в машине с успокоительной обмоткой, когда в последней исчезнет составляющая постоянного тока в успокоительной обмотке, поддерживающая постоянство потока Ψ_a . В этом случае ударный ток получается меньше, так как в то время как поток Ψ_a , сцепляющийся с обмоткой возбуждения, остается постоянным, поток, входящий в статор,

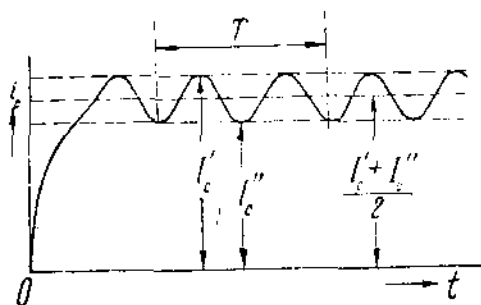


Рис. 252. Пульсации составляющей постоянного тока в машине с явно выраженными полюсами без успокоительной обмотки.

получается меньше, так как в то время как поток Ψ_a , сцепляющийся с обмоткой возбуждения, остается постоянным, поток, входящий в статор,

уменьшается на величину увеличения потока рассеяния ротора (см. пункт „а“). Ударный ток в этом случае равен:

$$I_s = \frac{1,8\sqrt{2} E_0}{x'_d}; \quad (307)$$

здесь x'_d — реактивное сопротивление, учитывающее рассеяние статора и ротора (§ 183).

180*. Величина начального тока трехполюсного короткого замыкания генератора с успокоительной обмоткой на роторе.

Для определения величины ударного тока и начальной амплитуды составляющей переменного тока короткого замыкания при любых условиях короткого замыкания можно воспользоваться физической картиной процесса короткого замыкания, разобранный в § 179. Рассмотрим генератор с явно выраженными полюсами и с успокоительной обмоткой, в котором короткое замыкание происходит на зажимах, причем до короткого замыкания генератор имеет нагрузку током I_n при угле сдвига фаз, равном ψ . Короткое замыкание генератора с цилиндрическим ротором является частным случаем этого, а потому отдельного рассмотрения не требует. На рис. 253 приведена диаграмма Blondеля (в пренебрежении насыщением) для режима работы генератора до короткого замыкания. На диаграмме $I_d = I_n \sin \psi$ — продольный ток нагрузки; $I_q = I_n \cos \psi$ — поперечный ток нагрузки; x_s — реактивное сопротивление рассеяния; x_{ad} — сопротивление, эквивалентное реакции якоря в продольной оси, x_{aq} — то же, в поперечной; $x_d = x_{ad} + x_s$ и $x_q = x_{aq} + x_s$ — продольное и поперечное синхронные сопротивления. Результирующий поток междужелезного пространства разложен на продольный поток Ψ_d и поперечный Ψ_q . При холостом ходе весь продольный поток Ψ_d , входящий из полюсов в якорь, сцепляется с успокоительной обмоткой. При равномерном вращении ротора в успокоительной обмотке тока нет. Попереч-



Рис. 253. Диаграмма Blondеля для ненасыщенной машины.

ный поток при холостом ходе ($I_n = 0$) равен нулю: $\Psi_d = 0$. Поток Ψ_n , сцепляющийся с обмоткой возбуждения, больше потока междужелезного пространства Ψ_d на величину потока рассеяния полюсов Ψ_{sn} (§ 77):

$$\Psi_n = \Psi_d + \Psi_{sn} = \Psi_d (1 + \tau_p); \quad (308)$$

здесь $\tau_p = \Psi_{sn}/\Psi_d$ — коэффициент рассеяния Гейланда для полюсов.

При нагрузке генератора током I_n поток междужелезного пространства (сцепляющийся с успокоительной обмоткой) в продольной оси равен $\Psi_d - \Psi_{ad}$, в поперечной — Ψ_{aq} (§§ 85, 92). Здесь Ψ_{aq} и Ψ_{ad} — потоки реакции якоря в продольной и поперечной осн. Поток, сцепляющийся с обмоткой возбуждения при нагрузке, равен:

$$\Psi_n' = \Psi_d - \Psi_{ad} + \tau_p \Psi_d. \quad (309)$$

Если на зажимах машины, нагруженной током I_n , происходит внезапное короткое замыкание, то для начального момента короткого замыкания можно считать, что потоки сцепления всех замкнутых обмоток остаются постоянными за счет индуктированных в них уравнительных токов (§ 177). Поток, сцепляющийся с успокоительной обмоткой в продольной оси, равен теперь (рассеянием успокоительной обмотки пренебрежем, вследствие его малости) величине:

$$\Psi_d - \Psi_{ad} - \Psi_{ad}' + \Psi_d' + \Psi_{ad}'', \quad (310)$$

вместо первоначального значения $\Psi_d - \Psi_{ad}$; здесь Ψ_{ad}' — добавочный поток реакции якоря, вызванный разностью токов $I_{ad} - I_d$, где I_{ad} — продольная составляющая тока короткого замыкания, I_d — продольная составляющая тока нагрузки до появления короткого замыкания; Ψ_{ad}'' и Ψ_d' — добавочные потоки, созданные уравнительными токами соответственно в успокоительной обмотке и в обмотке возбуждения. Вследствие инерции магнитный поток, сцепляющийся с успокоительной обмоткой в начальный момент короткого замыкания, остается равным прежней величине, т. е.

$$\Psi_d - \Psi_{ad} - \Psi_{ad}' + \Psi_d' + \Psi_{ad}'' = \Psi_d - \Psi_{ad}, \quad (311)$$

откуда

$$\Psi_d' + \Psi_{ad}'' - \Psi_{ad}' = 0. \quad (312)$$

Подобным образом можем написать для поперечной оси:

$$\Psi_{aq} + \Psi_{aq}' - \Psi_{aq}'' = \Psi_{aq} \quad (313)$$

(в поперечной оси на роторе имеем только успокоительную обмотку, а потому появляется только поток Ψ_{aq}''); отсюда

$$\Psi_{aq} \rightarrow \Psi_{aq}'' = 0. \quad (314)$$

Поток, сцепляющийся с одной фазой статора, равен геометрической сумме продольного и поперечного потоков; для обозначения геометрической суммы двух находящихся в квадратуре потоков воспользуемся символическим методом: $A = a + jb$, где $j^2 = -1$ (рис. 10). Располагая ось мнимых составляющих по продольной оси полюсов, получим для потока, сцепляющегося с одной фазой статора, следующее выражение:

$$j(\Psi_d + \Psi_d' + \Psi_{ad}'' - \Psi_{ad} - \Psi_{ad}' - \Psi_{ad}'') + (\Psi_{aq} + \Psi_{aq}' + \Psi_{aq}'' - \Psi_{aq}'') \cos \omega t; \quad (315)$$

здесь Ψ_{ad}'' — поток рассеяния обмотки статора в продольной оси, Ψ_{aq}' — в поперечной; остальные обозначения те же, что и выше. Так как полюса, а вместе с ними и система координат, движутся в пространстве со скоростью ω , потоки в статоре изменяются по синусоидальному закону, что условно указано умножением величины потока на $\cos \omega t$.

а) Начальное значение составляющей переменного тока короткого замыкания. Оно соответствует короткому замыканию в момент времени, когда полный поток (продольный и поперечный), сцепляющийся с обмоткой данной фазы, равен нулю ($\cos \omega t = 0$); в этот момент времени, очевидно, э. д. с. в данной фазе имеет максимум. В начальный момент короткого замыкания ($\cos \omega t = 0$) имеем:

$$[j(\Psi_d + \Psi_d' + \Psi_d'' - \Psi_{ad} - \Psi_{ad}' - \Psi_{sd}') + (\Psi_{aq} + \Psi_{aq}' + \Psi_{sq}' - \Psi_q'')] \cos \omega t = 0. \quad (316)$$

Так как полюса движутся относительно рассматриваемой фазной обмотки со скоростью ω , то спустя четверть периода после начала короткого замыкания ($\cos \omega t = 1$) при разомкнутой обмотке статора получили бы максимальный поток, проходящий через ось фазы. При замкнутой на коротко обмотке имеем, в силу инерции потока (§ 177), попрежнему значение полного потока, равное нулю; следовательно, подставляя $\cos \omega t = 1$ и приравнявая значение потока нулю, получаем следующее выражение для потока через четверть периода после начала короткого замыкания:

$$[j(\Psi_d + \Psi_d' + \Psi_d'' - \Psi_{ad} - \Psi_{ad}' - \Psi_{sd}') + (\Psi_{aq} + \Psi_{aq}' + \Psi_{sq}' - \Psi_q'')] = 0. \quad (317)$$

Принимая во внимание уравнения (312) и (314), получаем

$$j(\Psi_d - \Psi_{ad} - \Psi_{sd}') + (\Psi_{aq} + \Psi_{sq}') = 0. \quad (318)$$

Необходимо отметить, что здесь потоки реакции Ψ_{ad} и Ψ_{aq} обусловлены только токами предшествовавшей короткому замыканию нагрузки, потоки рассеяния Ψ_{sd}' и Ψ_{sq}' — токами короткого замыкания. Заменяя в уравнении (318) потоки через э. д. с. и падения напряжения (для чего достаточно умножить их на $j\omega 10^{-8}/\sqrt{2}$, ср. § 178), получаем

$$(E_0 - I_d x_{ad} - I_{vd} x_s) - j(I_{vq} x_s + I_q x_{aq}) = 0; \quad (319)$$

здесь величина $\Psi_d \omega 10^{-8} = f_{\omega} \Phi_d \omega 10^{-8}$ численно равна э. д. с. холостого хода $\sqrt{2} E_0$ (§178); I_d и I_q как и раньше, составляющие тока нагрузки, а I_{vd} и I_{vq} — составляющие тока короткого замыкания. Принимая во внимание, что $(j I_{vq} + I_{vd}) x_s = (I_{vq} - j I_{vd}) / x_s$, находим из уравнения (319) величину начального значения составляющей переменного тока короткого замыкания:

$$I_{v_0} = I_{vq} - j I_{vd} = \frac{E_0 - I_d x_{ad} - j I_q x_{aq}}{j x_s}; \quad (320)$$

здесь I_{v_0} — вектор действующего значения начальной составляющей переменного тока короткого замыкания, равный геометрической сумме продольной I_{vd} и поперечной I_{vq} составляющих. Для получения начальной амплитуды выражение (320) надо умножить на $\sqrt{2}$.

Выразим э. д. с. холостого хода E_0 через напряжение на зажимах U . При выбранном направлении оси мнимых составляющих (совпадающем с осью полюсов) получим, что вектор E_0 совпадает с осью вещественных составляющих (рис. 253). Направление U отстает на угол θ от э. д. с. E_0 , следовательно, можем для вектора U написать (§ 16):

$$\dot{U} = U e^{-j\theta} = U (\cos \theta - j \sin \theta); \quad (321)$$

тогда, по рис. 253:

$$E_0 = \dot{U} + I_d (x_s + x_{ad}) + j I_q (x_s + x_{aq}). \quad (322)$$

Последнее выражение в комплексной форме выражает геометрическую сумму отдельных векторов; необходимо иметь в виду, что вектор $\dot{U}$ тоже состоит из вещественной и мнимой составляющих (см. ур. 321). Подставляя в уравнение (320) величину E_0 из уравнения (322), получаем действующее начальное значение составляющей переменного тока короткого замыкания:

$$I_{v_0} = \frac{\dot{U} + I_d x_s + j I_q x_s}{j x_s}. \quad (323)$$

б) Ударный ток короткого замыкания. Ударный ток короткого замыкания соответствует короткому замыканию в момент времени, когда полный поток, сцепляющийся с данной фазой, равен максимальному значению ($\cos \omega t = 1$); очевидно э. д. с. в этот момент времени проходит через нуль. В начальный момент короткого замыкания ($\cos \omega t = 1$) имеем

$$[j(\Psi_d' + \Psi_d'' - \Psi_{ad} - \Psi_{ad}' - \Psi_{sd}') + (\Psi_{aq} + \Psi_{sq}' + \Psi_{aq}' - \Psi_q'')] \cos \omega t = \\ = (j\Psi_d' - j\Psi_{ad} + \Psi_{aq} - j\Psi_{sd} + \Psi_{sq}); \quad (324)$$

здесь Ψ_{sd}' и Ψ_{sq}' — потоки рассеяния, обусловленные полным током короткого замыкания, потоки Ψ_{sd} и Ψ_{sq} обусловлены током нагрузки. Выражение, стоящее в правой части, представляет собою магнитный поток, сцепляющийся с обмоткой статора в начальный момент короткого замыкания. Этот поток в дальнейшем поддерживается постоянным за счет уравнительных токов в статоре (§179). Так как последние с течением времени затухают по экспоненциальному закону (§177), то поток, сцепляющийся с обмоткой статора, не остается постоянным, а уменьшается по тому же закону. Поэтому предыдущее уравнение правильно писать в следующем виде:

$$[j(\Psi_d' + \Psi_d'' - \Psi_{ad} - \Psi_{ad}' - \Psi_{sd}') + (\Psi_{aq} + \Psi_{sq}' + \Psi_{aq}' - \Psi_q'')] \cos \omega t = \\ = (j\Psi_d' - j\Psi_{ad} + \Psi_{aq} - j\Psi_{sd} + \Psi_{sq}) e^{-t/T_a}. \quad (325)$$

Принимая во внимание уравнения (312) и (314), получаем

$$[(\Psi_{sq}' + \Psi_{aq}) + j(\Psi_d - \Psi_{ad} - \Psi_{sd}')] \cos \omega t = \\ = (j\Psi_d' - j\Psi_{ad} + \Psi_{aq} - j\Psi_{sd} + \Psi_{sq}) e^{-t/T_a}. \quad (326)$$

Спустя половину периода после начала короткого замыкания имеем максимальное значение потока рассеяния статора, равное:

$$j\Psi_{sd}' - \Psi_{sq}' = j(\Psi_d - \Psi_{ad}) + \Psi_{aq} + (j\Psi_d' - j\Psi_{ad} + \Psi_{aq} - j\Psi_{sd} + \Psi_{sq}) e^{-t/T_a}. \quad (327)$$

Это выражение получается из уравнения (326) путем подстановки в него $\cos \omega t = -1$. Заменяя по предыдущему потоки через э. д. с. (для чего умножаем уравнение на $j\omega 10^{-8}/\sqrt{2}$), получаем

$$(I_{vq} - jI_{vd}) jx_s = (E_0 - I_d x_{ad} - jI_q x_{aq}) (1 + e^{-t/T_a}) - (I_d x_s + jI_q x_s) e^{-t/T_a}. \quad (328)$$

Отсюда, обозначая амплитуду начального тока короткого замыкания (ударный ток) через I_s , получаем

$$I_s = \sqrt{2} (I_{vq} - jI_{vd}) = \frac{\sqrt{2} (E_0 - I_d x_{ad} - jI_q x_{aq})}{jx_s} (1 + e^{-t/T_a}) - \\ - \sqrt{2} (I_d - jI_q) e^{-t/T_a} \quad (329)$$

и заменяя, как выше, E_0 через U , получаем

$$I_s = \frac{\sqrt{2}(\dot{U} + I_d x_s + j I_q x_s)}{j x_s} (1 + e^{-t/T_a}) - \sqrt{2}(I_q - j I_d) e^{-t/T_a}. \quad (330)$$

Величина постоянной времени обмотки статора T_a равна, примерно, $T_a = 0,1$ сек. (§ 212); поэтому спустя половину периода после начала короткого замыкания ($\cos \omega t = 1$), т. е. для времени $t = 0,01$ сек., имеем $e^{-t/T_a} = 0,9$. В соответствии с опытами Рюденберга следует принять среднее значение $e^{-t/T_a} = 0,8$; этим значением и пользуются всегда при расчете токов короткого замыкания. Следовательно:

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{\sqrt{2}(1,8 \dot{U} + I_d x_s + j I_q x_s)}{j x_s} = \frac{\sqrt{2}(\dot{U} + I_d x_s + j I_q x_s)}{j x_s} \cdot \frac{0,8 \sqrt{2} \dot{U}}{j x_s} = \\ &= \sqrt{2} I_{\tau_0} + \frac{0,8 \sqrt{2} \dot{U}}{j x_s}; \end{aligned} \quad (331)$$

здесь I_{τ_0} — начальное (действующее) значение составляющей переменного тока короткого замыкания.

181*. Мгновенное переходное реактивное сопротивление обмотки статора.

Проводимость для потоков рассеяния, замыкающихся по воздуху вокруг лобовых соединений, можно считать одинаковой при всех режимах работы; проводимость для потоков рассеяния через впадину и головки зубцов различна при нормальной работе и в начальный момент внезапного короткого замыкания. При возрастании потоков рассеяния при внезапном коротком замыкании, в железе зубцов индуктируются токи Фуко, препятствующие возрастанию потока рассеяния, что равносильно уменьшению реактивного сопротивления. Такой же эффект уменьшения реактивного сопротивления (вследствие уменьшения магнитной проницаемости) оказывает и насыщение зубцов при больших потоках рассеяния, появляющихся при коротком замыкании. Рассеяние успокоительной обмотки (которое, несмотря на малую величину, все же оказывает свое влияние) дает обратный эффект, аналогичный увеличению реактивного сопротивления (влияние рассеяния успокоительной обмотки может быть учтено аналогично влиянию рассеяния обмотки возбуждения, см. § 182).

Вследствие этого реактивное сопротивление рассеяния статора в начальный момент внезапного короткого замыкания отличается от сопротивления рассеяния при нормальной работе x_s . Обозначим реактивное сопротивление в начальный момент короткого замыкания через x_d'' . Мы должны, следовательно, писать:

$$I_{\tau_0} = \frac{\dot{U} + I_d x_s + j I_q x_s}{j x_d''}; \quad I_s = \sqrt{2} I_{\tau_0} + \frac{0,8 \sqrt{2} \dot{U}}{j x_d''}. \quad (332)$$

Сопротивление x_d'' называется мгновенным переходным реактивным сопротивлением или, кратко, мгновенной реактивностью (по американской терминологии sub-transient reactance). О величине x_d'' см. § 207. Практически x_d'' обычно можно принять равным реактивности рассеяния статора x_s ; последнюю определяют как полную реактивность статора за вычетом реактивности, соответствующей потоку рассеяния через расточку статора (§ 203).

182*. Влияние рассеяния ротора на ток короткого замыкания синхронного генератора с успокоительной обмоткой.

Добавочные уравнильные токи, появляющиеся в обмотке возбуждения и в успокоительной обмотке, с течением времени затухают, вследствие чего и сцепляющиеся с этими обмотками потоки уменьшаются (§ 179). Составляющая постоянного тока в успокоительной обмотке затухает в течение $2 \div 3$ периодов (§ 214). В обмотке возбуждения вследствие ее высокого индуктивного сопротивления токи затухают гораздо медленнее, в течение $2 \div 3$ секунд. Поэтому по истечении $2 \div 3$ периодов от начала короткого замыкания поток междужелезного пространства уже не остается постоянным, в то время как поток, сцепляющийся с обмоткой возбуждения, еще можно считать постоянным. До начала короткого замыкания этот поток равен (§ 77):

$$\Psi_n = \Psi_d - \Psi_{ad} + \tau_r \Psi_d'; \quad (309a)$$

после короткого замыкания он равен:

$$\Psi_n = \Psi_d - \Psi_{ad} + \Psi_d' - \Psi_{ad}' + \tau_r (\Psi_d + \Psi_d'), \quad (333)$$

где $\tau_r (\Psi_d + \Psi_d')$ — поток рассеяния полюсов при коротком замыкании. Приравняв эти выражения, находим

$$\Psi_{ad}' - \Psi_d' = \tau_r \Psi_d',$$

откуда

$$\Psi_d' = \frac{\Psi_{ad}'}{1 + \tau_r}. \quad (334)$$

В машинах с явно выраженными полюсами уравнильные токи, поддерживающие неизменной величину потока в поперечной оси, по истечении $2 \div 3$ периодов после начала короткого замыкания совершенно затухают; в машине с цилиндрическим ротором некоторый уравнильный ток продолжает существовать, однако, затухание его все же велико (примерно, в 4 раза больше, чем затухание уравнильного тока в продольной оси); поэтому им можно пренебречь.¹⁾

Для случая короткого замыкания, происходящего в момент времени, когда $\cos \omega t = 0$, поток, сцепляющийся с обмоткой статора (§ 180), по затухании токов в успокоительной обмотке, равен:

$$j (\Psi_d - \Psi_{ad} + \Psi_d' - \Psi_{ad}' - \Psi_{sd}') + (\Psi_{aq} + \Psi_{aq}' + \Psi_{sq}') = 0; \quad (335)$$

принимая во внимание уравнение (334), получаем

$$j (\Psi_d - \Psi_{ad} + \frac{\Psi_{ad}'}{1 + \tau_r} - \Psi_{ad}' - \Psi_{sd}') + (\Psi_{aq} + \Psi_{aq}' + \Psi_{sq}') = 0. \quad (336)$$

Обозначим составляющую тока нагрузки в продольной оси через I_d , ток короткого замыкания — через I_{vd} , те же величины в поперечной оси — I_q и I_{vq} и, принимая во внимание, что

$$\Psi_{ad}' \frac{j\omega}{\sqrt{2}} 10^{-8} = (I_{vd} - I_d) j x_{ad}; \quad \Psi_{aq}' \frac{j\omega}{\sqrt{2}} 10^{-8} = (I_{vq} - I_q) j x_{aq} \quad (337)$$

получим, умножая уравнение (336) на $j\omega 10^{-8} \sqrt{2}$:

$$E_0 - I_d x_{ad} + \frac{(I_{vd} - I_d) x_{ad}}{1 + \tau_r} - (I_{vd} - I_d) x_{ad} - I_{vd} x_s - \\ - j I_q x_{aq} - j (I_{vq} - I_q) x_{aq} - j I_{vq} x_s = 0. \quad (338)$$

¹⁾ R. H. Park and E. H. Vanacker. System Stability as a Design Problem. Tr. A. I. E. E., январь 1929, стр. 170.

Отсюда находим, приравнявая нулю отдельно вещественные и мнимые части уравнения:

$$I_{v1} = -jI_{vd} = \frac{E_0 - I_d \frac{x_{ad}}{1 + \tau_r}}{j \left(x_s + \frac{\tau_r x_{ad}}{1 + \tau_r} \right)} = \frac{E_0 - I_d \frac{x_{ad}}{1 + \tau_r}}{j x_d'}; \quad (339)$$

$$I_{vq} = 0.$$

Здесь $I_{v1} = -jI_{vd}$ — действующее значение тока короткого замыкания спустя 2–3 периода после начала короткого замыкания; через x_d' обозначена величина

$$x_d' = x_s + \frac{\tau_r x_{ad}}{1 + \tau_r}. \quad (340)$$

Если подставить вместо э. д. с. E_0 ее выражение через напряжение U (§ 180), то получим

$$I_{v1} = \frac{\dot{U} + I_d \left(x_s + \frac{\tau_r x_{ad}}{1 + \tau_r} \right) + jI_d x_q}{j \left(x_s + \frac{\tau_r x_{ad}}{1 + \tau_r} \right)} = \frac{\dot{U} + I_d x_d' + jI_d x_q}{j x_d'}. \quad (341)$$

Если короткое замыкание происходит в момент времени, соответствующий максимальному потоку сцепления статорной обмотки, то для получения значения ударного тока выражение (341) необходимо умножить на коэффициент, равный, в среднем, 1,75, для учета составляющей постоянного тока в статоре.

183*. Переходное реактивное сопротивление обмотки статора.

Сопротивление x_d' (§ 182), равное:

$$x_d' = x_s + \frac{\tau_r x_{ad}}{1 + \tau_r}, \quad (340a)$$

представляет собою сопротивление, определяющее величину составляющей переменного тока короткого замыкания спустя 2–3 периода после начала короткого замыкания, когда составляющая постоянного тока в успокоительной обмотке исчезает. Сопротивление x_d' больше сопротивления рассеяния статора x_s на некоторую часть сопротивления реакции якоря $\frac{\tau_r}{1 + \tau_r} x_{ad}$, эквивалентной потоку реакции якоря $\frac{\tau_r}{1 + \tau_r} \Psi_{ad}'$. По уравнению

(334) эта величина равна добавочному потоку рассеяния полюсов $\tau_r \Psi_d'$, следовательно, поток междужелезного пространства становится меньше на величину добавочного потока рассеяния полюсов. Это явление и учитывается сопротивлением x_d' .

Сопротивление x_d' называется переходной реактивностью (transient reactance по американской терминологии). По величине x_d' близко к величине рассеяния статора, включая рассеяние через расточку статора (§ 208). Подставляя в выражение переходной реактивности величину $x_s = x_d - x_{ad}$, получаем

$$x_d' = x_d - \frac{x_{ad}}{1 + \tau_r}. \quad (342)$$

184*. Ударный ток машины, не снабженной успокоительной обмоткой.

Для подсчета начального тока внезапного короткого замыкания в этом случае можно пользоваться переходной реактивностью x_d' , т. е. писать:

$$I_{\phi 1} = \frac{\dot{U} + I_d x_d' + j I_q x_q}{j x_d'}; \quad (343)$$

$$I_{s1} = \sqrt{2} I_{v1} + \frac{0.8 \sqrt{2} \dot{U}}{x_{d1}}. \quad (344)$$

185*. Переходная электродвижущая сила.

Из выражения (342) получаем

$$\frac{x_{ad}}{1 + \tau_r} = x_d - x_d^I; \quad (345)$$

подставляя это выражение в числитель формул (339, 341), имеем

$$\dot{U} + I_d x_d' + j I_q x_q = E_0 - I_d \frac{x_{ad}}{1 + \frac{1}{\sigma}} = E_0 - I_d (x_d - x_d') = E'. \quad (346)$$

Величина E' называется переходной э. д. с. Принимая во внимание, что $x''_a \cong x_s$ (§ 181), таким же путем можно определить мгновенную переходную э. д. с.:

$$E'' = \dot{U} + I_d x_d'' + j I_q x_q'' = \\ = E_0 - I_d (x_d - x_d'') - \\ - j I_q (x_q - x_q''); \quad (347)$$

здесь через x''_q обозначено реактивное сопротивление рассеяния для поперечного тока I_q , аналогично тому, как x''_d есть реактивность рассеяния для продольного тока I_d (§ 207).

Вводя в расчет переходные э. д. с. и переходные реактивности, получаем для переходных режимов формулы, аналогичные формулам для установившихся режимов:

$$I_{v0} = \frac{E''}{x_d''}; I_{v1} = \frac{E'}{x_d'}; I_s = \frac{\sqrt{2}E''}{x_d''} + \frac{0.8\sqrt{2}U}{x_d''}. \quad (348)$$

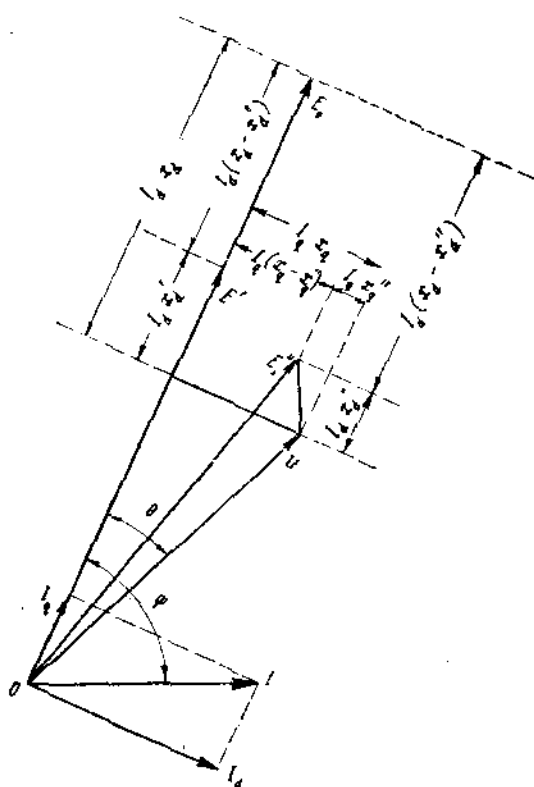


Рис. 254. Определение переходных э. д. с.

Полагая для обобщения $x_q' = x_q$, получим из уравнений (346) и (347):

$$\left. \begin{aligned} E' &= \dot{U} + I_a x_d' + j I_q x_q' \\ E'' &= \dot{U} + I_a x_d'' + j I_q x_q'' \end{aligned} \right\} \quad (349)$$

таким образом, переходные э. д. с. равны геометрической сумме напряжения на зажимах и падений напряжения, представляющих произведения продольной и поперечной составляющих тока нагрузки, существовавшей до короткого замыкания (вообще до изменения режима), умноженных на соответствующие переходные реактивности (рис. 254). Из анализа выражения для E' видно, что E' совпадает по направлению с э. д. с. холостого хода. В течение малых промежутков времени Δt э. д. с. E' можно считать постоянной, на чем основано применение к расчету переходных режимов метода последовательных интервалов.

186. Формулы для подсчета ударного тока короткого замыкания.

При подсчете токов короткого замыкания в сети обычно приходится учитывать влияние на генератор предшествовавшей нагрузки и подсчитывать токи по уравнениям §§ 180, 182. Нормы на электрические машины предписывают, чтобы для машин мощностью свыше 500 kW ударный ток короткого замыкания на зажимах машины при холостом ходе ее и возбуждении, соответствующем при холостом ходе номинальному напряжению на зажимах, не превосходил значения амплитуды номинального тока генератора больше, чем в 15 раз:

$$\frac{I_s}{\sqrt{2} I_N} < 15. \quad (350)$$

Для подсчета I_s в этих условиях можно пользоваться формулами:

1) для генераторов с успокоительными обмотками

$$I_s = \frac{1,8 \sqrt{2} E_0}{x_d''} \cong \frac{1,8 \sqrt{2} U_N}{x_s}; \quad (351)$$

2) для генераторов без успокоительных обмоток

$$I_{s1} = \frac{1,8 \sqrt{2} E_0}{x_d'} = \frac{1,8 \sqrt{2} U_N}{x_d'}; \quad (352)$$

здесь x_d' учитывает и рассеяние ротора (§ 179).

Выражая x_s и x_d' в процентах (§ 87):

$$x_s^{\%}/_{10} = \frac{I_N x_s}{U_N} 100 \text{ и } x_d'^{\%}/_{10} = \frac{I_N x_d'}{U_N} 100 \quad (353)$$

и подставляя в предыдущие уравнения вместо значений x_s и x_d' в омах их значения в процентах ($x_s^{\%}/_{10}$ и $x_d'^{\%}/_{10}$), получаем

$$I_s = \frac{1,8 \sqrt{2} U_N I_N}{U_N x_s^{\%}/_{10}} 100 = \frac{1,8 \sqrt{2} I_N}{x_s^{\%}/_{10}} 100; \quad (354)$$

и соответственно

$$I_{s1} = \frac{1,8 \sqrt{2} I_N}{x_d'^{\%}/_{10}} 100. \quad (355)$$

Отсюда кратность ударного тока короткого замыкания

$$\frac{I_s}{\sqrt{2} I_N} = \frac{1,8 \times 100}{x_s^{0/0}} \text{ или } \frac{I_{s1}}{\sqrt{2} I_N} = \frac{1,8 \times 100}{x_d^{0/0}}. \quad (356)$$

Из последних выражений следует, что если кратность ударного тока короткого замыкания не должна быть больше 15, то процентная реактивность $x_s^{0/0}$, соответственно $x_d^{0/0}$, должна быть больше 12%.

Коэффициент 1,8, входящий в эти формулы, принят на основании опытов Рюдсена (§ 179). Необходимо иметь в виду, что такую величину этого коэффициента можно принимать лишь в том случае, если x_s и x_d' определять при вынужденном вращении и подразумевать под x_s полную реактивность статора за вычетом рассеяния через расточку статора (§ 206), а под x_d' — реактивность статора, включая рассеяние через расточку (§ 208).

Если в формулы подставлять значения x_d'' и x_d' , определенные по осциллограммам, снятым при внезапном коротком замыкании, то вместо коэффициента 1,8 правильнее брать величину $1,9 \div 2,0$. Последнее значение (2,0) рекомендуется французскими нормами.

187*. Уравнение для тока короткого замыкания.

Для определения промежуточных значений тока короткого замыкания необходимо знать либо уравнение тока в функции времени, либо кривые изменения составляющих тока короткого замыкания в течение неустановившегося режима (так называемые декрементные кривые, § 188). При этом по уравнению можно найти мгновенные значения тока, по декрементным кривым — только действующие значения. Вычисление промежуточных значений тока производят обычно без учета составляющей постоянного тока в успокоительной обмотке, так как в противном случае вычисления слишком усложняются; такие допущения не вносят ошибок, так как влияние уравнительного тока успокоительной обмотки значительно только в первый момент короткого замыкания, в дальнейшем этот ток быстро (в течение $2 \div 3$ периодов) затухает до нуля (§ 179). Составим уравнение для генератора без успокоительной обмотки, причем для общности возьмем генератор с явно выраженными полюсами, в котором реактивности в продольной и поперечной оси неодинаковы. Как указывалось в § 179, ток короткого замыкания состоит из: 1) составляющей постоянного тока i_c и 2) составляющей переменного тока i_p . Рассмотрим для простоты случай короткого замыкания при холостом ходе машины. Составляющая постоянного тока изменяется по закону $i_c = I_{c\max} e^{-H/a}$, причем максимальное значение $I_{c\max}$ зависит от момента времени включения, так как ток $I_{c\max}$ должен создать поток Ψ_c , равный потоку, сцепляющемуся с рассматриваемой фазой A в начальный момент короткого замыкания. Будем считать, как в § 179, что поток, сцепляющийся с обмоткой фазы A , изменяется по синусоидальному закону; тогда при коротком замыкании, происходящем при холостом ходе в момент времени, соответствующий $\cos \omega t = \cos \alpha$, поток, сцепляющийся с фазой A , равен $\Psi_d \cos \alpha = \Psi_c = I_{c\max} S 10^8$, откуда

$$I_{c\max} = \frac{\Psi_d \cos \alpha 10^{-8}}{S}; \quad (357)$$

здесь Ψ_d — продольный поток между железного пространства, α — угол между осью фазы A и осью полюсов в начальный момент короткого замыкания, S — коэффициент самонадукции от потоков рассеяния (поток Ψ_c в начальный момент короткого замыкания является потоком рассеяния).

В машине с явно выраженными полюсами без успокоительной обмотки проводимость для потока самоиндукции при движении ротора изменяется, вследствие чего изменяется и требующийся для создания потока Ψ_c ток i_c (§ 179). Этот ток имеет наибольшее значение, когда против оси фазы стоит середина полюсов ($I_c' = \frac{\Psi_a \cos \alpha 10^{-8}}{S_d} = \frac{\sqrt{2} E_0 \cos \alpha}{x_d'}$), и наименьшее, когда против оси фазы находится промежуток между полюсами:

$$(I_c'' = \frac{\Psi_a \cos \alpha 10^{-8}}{S_q} = \frac{\sqrt{2} E_0 \cos \alpha}{x_q'});$$

здесь S_d и S_q — коэффициенты самоиндукции от потоков рассеяния для продольной и поперечной оси, x_d' и x_q' — соответствующие им переходные реактивности. Таким образом, составляющая постоянного тока пульсирует с двойной частотой (§ 179). Среднее значение составляющей постоянного тока равно:

$$\frac{I_c' + I_c''}{2} = \frac{x_d' + x_q'}{2x_d'x_q'} \sqrt{2} E_0 \cos \alpha. \quad (358)$$

На это значение накладывается вторая гармоника (рис. 252), равная

$$\frac{I_c' - I_c''}{2} = -\frac{x_d' - x_q'}{2x_d'x_q'} \sqrt{2} E_0 \cos \alpha \cos (2\omega t + \alpha). \quad (359)$$

Принимая во внимание затухание составляющей постоянного тока, имеем

$$-i_c = \frac{x_d' + x_q'}{2x_d'x_q'} \sqrt{2} E_0 e^{-\eta T_a} \cos \alpha - \frac{x_d' - x_q'}{2x_d'x_q'} \sqrt{2} E_0 e^{-\eta T_a} \cos \alpha \cos (2\omega t + \alpha) \quad (360)$$

Составляющая переменного тока затухает с постоянной времени обмотки возбуждения от значения

$$i_v'' = \sqrt{2} I_{v0} \cos (\omega t + \alpha) = \frac{\sqrt{2} E_0}{x_d'} \cos (\omega t + \alpha) \quad (361)$$

до значения установившегося тока короткого замыкания

$$i_v' = \sqrt{2} I_k \cos (\omega t + \alpha) = \frac{\sqrt{2} E_0}{x_d} \cos (\omega t + \alpha). \quad (362)$$

Поэтому переменный ток короткого замыкания можно рассматривать как сумму двух токов: не изменяющегося по величине тока установившегося короткого замыкания i_v' и затухающего до нуля с постоянной времени обмотки возбуждения тока $i_v'' - i_v'$. Следовательно, переменный ток короткого замыкания можно представить в виде

$$i_v = (i_v'' - i_v') e^{-\eta T_n} + i_v' = \frac{x_d - x_d'}{x_d x_d'} \sqrt{2} E_0 e^{-\eta T_n} \cos (\omega t + \alpha) + \frac{\sqrt{2} E_0}{x_d} \cos (\omega t + \alpha); \quad (363)$$

здесь x_d' и x_d — соответственно переходная и синхронная реактивности в продольной оси.

Переходный ток короткого замыкания представляет собою сумму всех составляющих и, следовательно, может быть выражен уравнением (для фазы A):

$$i_a = \frac{\sqrt{2} E_0}{x_d} \cos (\omega t + \alpha) + \frac{x_d - x_d'}{x_d x_d'} \sqrt{2} E_0 e^{-\eta T_n} \cos (\omega t + \alpha) - \frac{x_d' + x_q'}{2x_d'x_q'} \sqrt{2} E_0 e^{-\eta T_a} \cos \alpha + \frac{x_d' - x_q'}{2x_d'x_q'} \sqrt{2} E_0 e^{-\eta T_a} \cos \alpha \cos (2\omega t + \alpha). \quad (364)$$

Для токов в фазах B и C уравнения имеют тот же вид, но вместо угла α надо подставить соответственно $\alpha - \frac{2\pi}{3}$ и $\alpha - \frac{4\pi}{3}$. В машине с совершенной успокоительной обмоткой на роторе реактивности x_d' и x_q' равны друг другу (§ 208), а поэтому составляющая постоянного тока двойной частоты исчезает.

Выведенные таким сравнительно элементарным путем уравнения, однако, дают совершенно точный результат, при условии, конечно, что реактивности x_d , x_d' и x_q' и постоянные времени T_a и T_q' определены точно. На рис. 255 даны для сравнения вычисленные по приведенным уравнениям кривые (рис. 255, а) и осциллограммы, снятые при опыте (рис. 255, б). Как видно из рисунка, кривые абсолютно совпадают.¹⁾ Значение реактивностей и постоянных времени приведены в §§ 205—214.

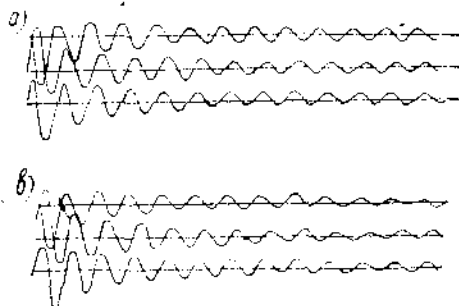


Рис. 255. Кривые тока короткого замыкания: а) вычисленные по уравнению (364), б) снятые осциллографом при опыте.

Уравнения для тока короткого замыкания с учетом активного сопротивления (короткое замыкание в сети) и уравнения для случая короткого замыкания при нагрузке можно найти в статье R. E. Doherty и C. A. Nickle.

188*. Декрементные кривые.

Для расчета механических усилий в генераторе надо знать ударный ток короткого замыкания; для выбора масляных выключателей и реле надо знать промежуточные значения тока короткого замыкания. Подсчет промежуточных значений по уравнению (§ 187) кропотлив и требует определения постоянных машины. Для ускорения расчетов пользуются обычно декрементными кривыми, дающими кратность промежуточного значения тока короткого замыкания к номинальному в функции времени, протекшего от начала короткого замыкания, и реактивности системы от генератора до точки короткого замыкания.

На рис. 256 и 257 приведены стандартные декрементные кривые, одобренные американской National Electric Manufacturers Association.²⁾ На рис. 256 по оси ординат отложена кратность действующего значения тока короткого замыкания к действующему значению номинального тока. На оси абсцисс отложена реактивность системы от генератора до точки короткого замыкания (включая реактивность генератора), выраженная в процентах и отнесенная к базисной мощности, равной мощности системы в kVA. Кривые построены для разных значений времени t , протекшего от начала короткого замыкания; время t указано на кривых. На рис. 257 приведены те же кривые, но на оси абсцисс отложены не реактивности, а время t , реактивности же указаны на кривых.

Кривые дают действующие значения полного тока короткого замыкания (составляющих постоянного i_c и переменного i_p тока) при трехполюсном

¹⁾ Кривые взяты из статьи R. E. Doherty and C. A. Nickle. Three-Phase Short-Circuit Synchronous Machines. Tr. A. I. E. E. апрель 1930, стр. 700.

²⁾ W. C. Hahn and C. F. Wagner. Standard Decrement Curves. Tr. A. I. E. E. 1932, стр. 353; C. F. Wagner. Decrement of Short-Circuit Currents. El. J. 1933, стр. 113, 151.

коротком замыкании генератора с успокоительной обмоткой на роторе, происходящем в момент прохождения э. д. с. через нуль. При определении реактивности системы за реактивность генератора необходимо во всех случаях брать мгновенную переходную реактивность x_d'' (§ 207). Для получения

тока короткого замыкания при двухполюсном коротком замыкании необходимо за реактивность системы брать сумму $x_1 + x_2$, где x_1 — реактивность системы для токов положительной последовательности фаз; x_2 — для отрицательной (приблизительно $x_1 + x_2 = 2x_1$); получаемую на оси ординат кратность тока необходимо умножать на $\sqrt{3}$. Для получения тока при однополюсном коротком замыкании необходимо за реактивность системы брать сумму $x_1 + x_2 + x_0$, где x_0 — реактивность системы для токов нулевой последовательности фаз (приблизительно $x_1 + x_2 + x_0 = 2x_1 + x_0$); получаемую на оси ординат кратность тока надо умножать на 3. При пользовании декрементными кривыми необходимо иметь в виду следующее: 1) принято, что генераторы работают до короткого замыкания при номинальных напряжениях и нагрузке в kVA и при $\cos \varphi = 0,8$; 2) автоматические регуляторы напряжения отсутствуют; 3) реактивности до 15% сосредоточены в самом генераторе, что свыше 15% — в сети; 4) короткое замыкание происходит на ненагруженном фидере; 5) всеми активными сопротивлениями, в том числе и активным сопротивлением в точке короткого замыкания, пренебрежено; 6) э. д. с. всех генераторов системы совпадают по фазе и все генераторы заменены одним эквивалентным; 7) постоянная времени обмотки воз-

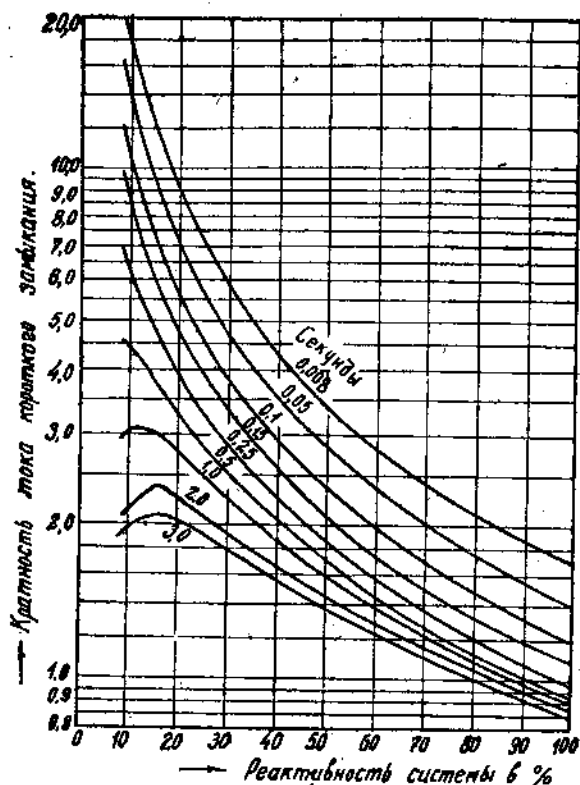


Рис. 256. Декрементные кривые для разных значений времени t в функции от реактивности.

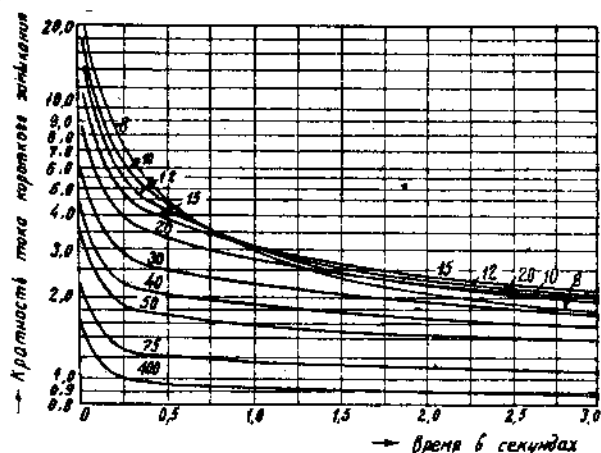


Рис. 257. Декрементные кривые для разных значений реактивности системы в функции от времени.

буждения при холостом ходе принята $T_{no} = 5,0$ сек. При другом значении постоянной времени T_{no}' необходимо действительное время t , протекшее от начала короткого замыкания, для которого ищем ток короткого замыкания, заменять величиной $t' = t \frac{5}{T_{no}'}$ и находить кратность тока для времени t по значению t' .

Для генераторов без успокоительной обмотки стандартные декрементные кривые (рис. 257) дают правильный результат только по истечении 0,2 сек. после начала короткого замыкания; при этом при подсчете реактивности системы надо вместо действительной реактивности генератора брать мгновенную реактивность x_d'' эквивалентного генератора с успокоительной обмоткой, равного по мощности данному; значения тока для времени $< 0,2$ сек. можно брать по тем же кривым и умножать получаемый результат на 0,75. Для более точного определения необходимо найти ударный ток короткого замыкания по действительной мгновенной реактивности и отложить его на оси ординат рис. 257. Соединяем прямой линией эту точку с точкой кривой, соответствующей времени 0,2 сек. для мгновенной реактивности эквивалентного генератора с успокоительной обмоткой. Эта прямая тогда представляет часть кривой для времени $< 0,2$ сек. Мгновенную реактивность генератора без успокоительной обмотки можно брать равной $x_d'' = 0,85 x_d'$ (§ 207).

Если система работает не при полной нагрузке, то декрементные кривые рис. 256 и 257 дают неточный результат.

189*. Ток в обмотке возбуждения при коротком замыкании на зажимах статора.

До короткого замыкания по обмотке возбуждения проходит ток i_n . При коротком замыкании в обмотке возбуждения появляются уравнительные токи (§ 179): постоянного направления i_{nc} , индуктированный вращающимся полем статора Ψ_v , и переменного направления i_{nv} , имеющий нормальную частоту ω ; он индуктирован неподвижным потоком статора Ψ_d . В начальный момент короткого замыкания оба эти тока равны, в дальнейшем они затухают: ток i_{nc} с постоянной времени обмотки возбуждения, ток i_{nv} — с постоянной времени обмотки статора (§ 179). Величину тока i_{nc} можно определить, исходя из следующих соображений.

Пренебрежем явлениями в успокоительной обмотке. Полный поток статора в продольной оси, вызываемый током короткого замыкания, равен $\sqrt{2}I_v L 10^8 = \sqrt{2}I_v \frac{x_d}{\omega} 10^8$; часть этого потока представляет собою поток рассеяния $\sqrt{2}I_v S_d 10^8 = \sqrt{2}I_v \frac{x_d'}{\omega} 10^8$. Разность этих потоков $\sqrt{2}I_v \frac{x_d - x_d'}{\omega} 10^8$, следовательно, стремится проникнуть в обмотку возбуждения. Уравнительный ток в обмотке возбуждения должен создать поток Ψ_{nc} , компенсирующий этот поток статора:

$$\Psi_{nc}' = \sqrt{2}I_v \frac{x_d - x_d'}{\omega} 10^8 = \frac{\sqrt{2}E_v}{\omega} \cdot \frac{x_d - x_d'}{x_d'} 10^8 = \Psi_d \frac{x_d - x_d'}{x_d'}; \quad (365)$$

здесь $I_v = E_v/x_d'$; $\Psi_d = \sqrt{2}E_v 10^8/\omega$ — продольный поток полюсов. Поток Ψ_d создается при нормальной работе током возбуждения i_n . Пренебрегая влиянием насыщения, можем сказать, что при коротком замыкании уравнительный ток i_{nc} будет во столько раз больше тока i_n , во сколько раз поток Ψ_{nc} больше потока Ψ_d ; таким образом:

$$i_{nc} = i_n \frac{x_d - x_d'}{x_d'}. \quad (366)$$

Постоянным потоком статора Ψ_c создается в обмотке возбуждения такой же величины ток, но изменяющийся с частотой $\gamma = \omega 2\pi$:

$$i_{nv} = i_n \frac{x_d - x_d'}{x_d'} \cos \omega t. \quad (367)$$

Эти два тока накладываются на нормальный ток возбуждения i_n . Принимая во внимание, что ток i_{nc} затухает с постоянной времени обмотки возбуждения T_n , а ток i_{nv} — с постоянной времени обмотки статора T_a , получаем следующее уравнение для тока в обмотке возбуждения:

$$i = i_n \frac{x_d - x_d'}{x_d'} e^{-t/T_n} - i_n \frac{x_d - x_d'}{x_d'} e^{-t/T_a} \cos \omega t + i_n. \quad (368)$$

Максимальное значение тока в обмотке возбуждения равно, примерно:

$$i_{n\max} = i_n + 1,8 i_n \frac{x_d - x_d'}{x_d'} = i_n \frac{1,8 x_d - 0,8 x_d'}{x_d'}. \quad (369)$$

При трехполюсном коротком замыкании величина $i_{n\max}$ не зависит от момента замыкания.

190. Последствия токов короткого замыкания.

Проходящий по машине ток короткого замыкания оказывает два действия: 1) механическое, обусловленное появлением электромагнитных сил между различными проводниками с током и между проводниками и железом; 2) тепловое, обусловленное выделением при прохождении тока джоулева тепла. Механические усилия пропорциональны величине тока, поэтому наибольшие усилия наблюдаются в начальный момент короткого замыкания; механические усилия необходимо, таким образом, рассчитывать по ударному току (§ 192). Количество выделяющегося тепла пропорционально времени и квадрату тока; так как ток короткого замыкания очень быстро затухает, то расчет теплового действия в синхронных машинах можно вести по установившемуся току короткого замыкания (§ 193). При этом обычно опасный нагрев получается только при коротком замыкании внутри генератора; при коротком замыкании в сети нагрев получается незначительный.

191. Вращающий момент при коротком замыкании.

Механические силы, вызванные током короткого замыкания, действуют между обмотками ротора и статора и между различными проводниками обмотки статора. Силы, действующие между активными частями обмоток статора и обмоткой ротора, направлены по касательной к окружности ротора и проявляются в изменении вращающего момента. Силы, действующие на лобовые части обмоток, проявляются в изгибе или смещении лобовых частей (§ 192).

В синхронной машине при внезапном коротком замыкании магнитный поток полюсов в начальный период остается постоянным. Ток короткого замыкания статора в несколько раз превышает номинальный ток, вследствие чего и сила взаимодействия этого тока с магнитным потоком полюсов в несколько раз больше, чем при нормальной работе. Ток короткого замыкания в статоре состоит из двух составляющих: постоянной i_c и переменной i_p (§ 179). Постоянная составляющая тока i_c направлена все время в одну сторону, напр., в проводниках одного полюсного деления — от нас. Когда под ними находится северный полюс ротора, то

создаваемый током i_c вращающий момент будет затормаживающим; когда под проводниками окажется южный полюс ротора, то вращающий момент будет ускоряющим; таким образом, ток i_c создает вращающий момент, пульсирующий во времени с нормальной частотой $\gamma = \frac{p\pi}{60}$. Если бы ток i_c

и магнитный поток полюсов оставались неизменными по величине, то пульсирующий вращающий момент сохранял бы постоянную свою амплитуду. В действительности ток i_c затухает с постоянной времени статора T_a , а магнитный поток — с постоянной времени ротора T_n . Поэтому амплитуда пульсирующего момента затухает с постоянной времени $T_m = \frac{T_a T_n}{T_a + T_n}$

(рис. 258); в положительную сторону на рисунке отложен затормаживающий момент. Переменная составляющая тока i_v всех трех фаз статора создает вращающийся поток с постоянной амплитудой. Если пренебречь активным сопротивлением статора, то ток i_v является реактивным, поток, создаваемый им, направлен навстречу потоку полюсов и неподвижен относительно полюсов. Поэтому вращающий момент, создаваемый переменным током i_v статора, равен нулю. Следовательно, вращающий момент при коротком замыкании равен вращающему моменту, создаваемому постоянным током i_c . Амплитуда этого момента во столько раз больше номинального вращающего момента $M_{\varphi N}$, во сколько раз ток i_c больше номинального тока I_N . Уравнение для вращающего момента имеет следующий вид:

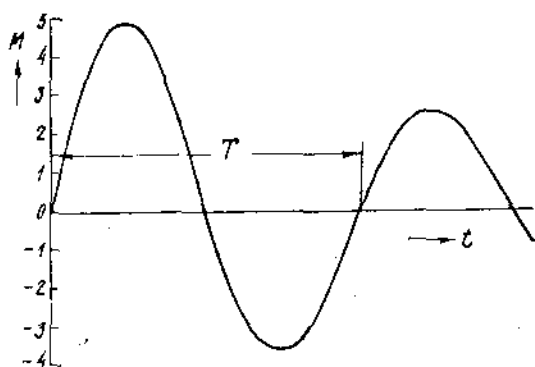


Рис. 258. Кривая вращающего момента при коротком замыкании.

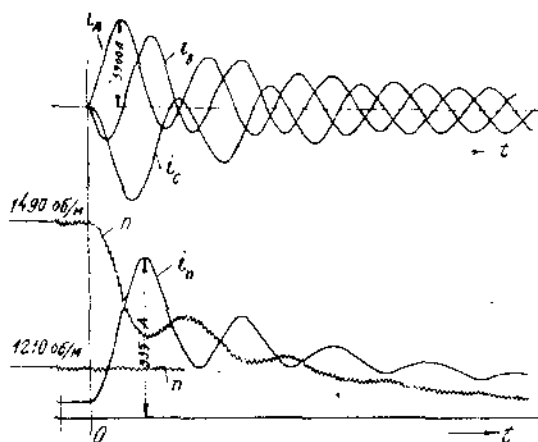


Рис. 259. Изменение скорости вращения n генератора при внезапном коротком замыкании; i_A, i_B, i_C — токи короткого замыкания в фазах A, B, C ; i_n — ток в обмотке возбуждения.

$$M = M_{\varphi N} \frac{E_0}{I_A x_d'} e^{-t/T_m} \sin \omega t; \quad (370)$$

здесь $M_{\varphi N}$ — номинальный вращающий момент (§ 112), E_0 — э. д. с. при холостом ходе, x_d' — переходная реактивность.

При отсутствии затухания токов в статорной и роторной обмотках среднее значение вращающего момента равно нулю; так как ротор обладает значительным моментом инерции, то скорость вращения остается постоянной. Вследствие наличия затухания токов среднее значение вращающего момента для предыдущей половины периода всегда больше, чем

для последующей; таким образом, на ротор действует всегда некоторый затормаживающий момент. Кроме того, так как активное сопротивление статора не равно нулю, то переменный ток i_v создает также затормаживающий момент. Полная величина затормаживающего момента пропорциональна потерям в статоре и в роторе и изменяется в зависимости от изменения токов в статоре и в роторе:

$$M_T = \frac{60}{2\pi n} (mr I_e^2 + r_n I_n^2); \quad (371)$$

здесь r и r_n — активные сопротивления обмоток статора и ротора, m — число фаз, $I_e = \sqrt{i_c^2 + i_v^2}$; $I_n = \sqrt{i_{nc}^2 + i_{nv}^2}$; i_c и i_v — действующие значения постоянной и переменной составляющих тока статора за рассматриваемый период тока, i_{nc} и i_{nv} — то же, в роторе; n — среднее число оборотов ротора в минуту за этот период тока. Затормаживающий момент тем больше, чем больше активное сопротивление, поэтому он увеличивается, если короткое замыкание происходит в сети с большим активным сопротивлением от генератора до точки короткого замыкания. В начальный период короткого замыкания затормаживающий момент получается очень значительным. Поэтому синхронная машина, работающая в одиночку, при внезапном коротком замыкании резко уменьшает свою скорость вращения (рис. 259). Если короткое замыкание происходит при нагрузке в сети с несколькими параллельно работающими машинами, то вращающий момент первичных двигателей оказывается больше затормаживающего момента, в особенности, если коротким замыканием нагрузка отключается; поэтому машина обычно увеличивает свою скорость вращения.

192. Механические усилия в лобовых частях обмоток.

По закону Био-Савара (§ 6) два параллельных проводника, по которым проходят токи i_1 и i_2 ампер, испытывают силу

$$F = 2i_1 i_2 \frac{l}{a} 10^{-2} \text{ дин}; \quad (372)$$

здесь l — длина каждого проводника в см, a — расстояние между ними в см. Для получения силы в кг указанное выражение необходимо умножить на $\frac{1}{9,81} 10^{-5} = 1,02 \times 10^{-6}$. При одинаковом направлении тока проводники притягиваются, при разном — отталкиваются. Приведенная формула справедлива, когда размеры проводников малы, а длина велика по сравнению с расстоянием между проводниками и когда магнитная проницаемость окружающей среды равна 1. В синхронных машинах эти условия можно считать выполненными.

Части обмотки синхронной машины, уложенные во впадинах, прочно укреплены, а потому могут выдерживать значительные усилия. Лобовые соединения расположены в воздухе и менее надежны в отношении сопротивления усилиям при коротком замыкании. В синхронных машинах необходимо рассчитывать усилия между следующими частями обмоток.

1) Усилия между лобовыми соединениями обмотки статора и обмотки возбуждения (рис. 260):

$$F_1 = - \frac{2,04 l_1 w_1 w_2 I_{n\max} I_s 10^{-8}}{a_1} \text{ кг}; \quad (373)$$

здесь l_1 — длина катушки обмотки возбуждения в направлении окружности статора в см, a_1 — расстояние между обмоткой возбуждения и обмоткой статора в см (рис. 260), w_1 — число витков в лобовом соединении, w_2 — число витков катушки одного полюса, $I_{\text{лmax}}$ — максимальный ток в обмотке возбуждения (§ 189), I_s — ударный ток (§ 186). Знак минус указывает, что обмотки отталкиваются.

2) Усилия между лобовыми соединениями и железом. Вследствие стремления магнитных линий, входящих в железо, сократить свою длину, лобовые соединения притягиваются к железу. Усилия можно подсчитать, если заменить железо проводником, представляющим зеркальное изображение действительного проводника (рис. 261). Таким образом, усилие равно:

$$F_2 = \frac{1,02 l_s w_1^2 I_s^2 10^{-8}}{a_1} \text{ кг;} \quad (374)$$

здесь l_s — длина лобовых соединений в направлении окружности статора в см, a_1 — расстояние от проводников до железа в см, остальные обозначения те же, что и выше.

3) Усилия между лобовыми соединениями отдельных фаз. Максимальное усилие наступает, когда токи в двух фазах равны, что соответствует значению тока $\sqrt{3}/2 = 0,866$ от амплитуды. Расстояние, на котором лобовые соединения разных фаз расположены параллельно друг другу, равно около $l_s/3$; таким образом, усилие равно:

$$F_3 = \frac{2,04 \times 0,866^2 l_s w_1^2 I_s^2 10^{-8}}{3a_3} = \frac{0,51 l_s w_1^2 I_s^2 10^{-8}}{a_3} \text{ кг;} \quad (375)$$

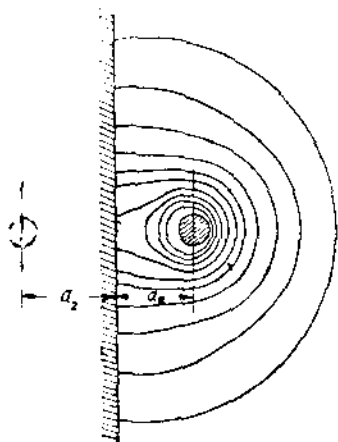


Рис. 261. К подсчету усилия между лобовыми частями обмотки и железом.

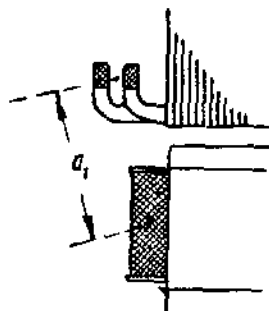


Рис. 260. К подсчету усилия между лобовыми частями обмотки статора и обмотки возбуждения.

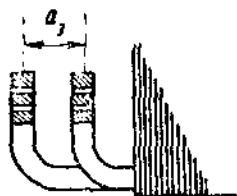


Рис. 262. К подсчету усилия между лобовыми соединениями отдельных фаз.

здесь a_3 — расстояние между проводниками разных фаз в см (рис. 262); остальные обозначения те же, что и выше. Знак минус указывает, что проводники отталкиваются.

Полная сила, действующая на лобовое соединение, равна геометрической сумме всех трех сил. Если ударный ток в 15 раз больше амплитуды номинального тока, то усилия при коротком замыкании в $15^2 = 225$ раз больше усилий, вызываемых током при нормальной работе. Особенно велики механические усилия в быстроходных машинах (в турбогенераторах), у которых число витков w_1 и длина l_s имеют большие значения;

в них силы при коротком замыкании достигают значений десятков тысяч килограммов. Еще опаснее усилия при несинхронном включении генераторов при совпадении их э. д. с. по фазе, когда ударный ток имеет двойную величину по сравнению с ударным током трехфазного короткого замыкания (§ 194).

Для того чтобы обмотки могли противостоять усилиям при коротком замыкании, применяют специальное крепление лобовых соединений (рис. 64, 70). Лобовые части при помощи болтов и бронзовых накладок укрепляют так, чтобы отсутствовала возможность их изгиба или смещения. Между соединениями одной и той же катушки укрепляют деревянные прокладки, препятствующие сближению проводников. В особенности тщательно необходимо укреплять обмотку при выходе из впадин, где изоляция имеет самое слабое место. При коротких замыканиях изоляционные миканитовые гильзы в этих местах изгибаются и растрескиваются, что в дальнейшем может повести к пробое изоляции.

В случае применения укрепляющих болтов и накладок в формулы для подсчета усилий надо подставлять вместо длины l_2 расстояние между болтами l_2 . Лобовые соединения рассчитывают в этом случае как балку, лежащую на двух опорах с заделанными концами. Необходимое расстояние между болтами находят по формуле:

$$l_2 = \sqrt{\frac{12R_b W}{f}}; \quad (376)$$

здесь W — момент сопротивления проводников обмотки, R_b — допускаемое напряжение для проводников при изгибе, f — результирующая сила на 1 см длины. Допускаемое напряжение при изгибе для меди можно брать равным $R_b = 250 \div 500 \text{ кг/см}^2$.

193. Тепловые действия токов короткого замыкания.

Вследствие изначальной обычно продолжительности короткого замыкания все выделяющееся тепло идет на повышение температуры; теплом, рассеивающимся в окружающее пространство, можно пренебрегать. В синхронных машинах повышение температуры, вызванное ударным током короткого замыкания, очень незначительно, поэтому его можно не учитывать. Нагрев установившимся током короткого замыкания может превзойти допустимый только в том случае, если установившийся ток больше номинального и короткое замыкание долго не отключается. Последнее обстоятельство обычно не имеет места; к тому же установившийся ток часто бывает меньше номинального. Таким образом, с повышением температуры в синхронной машине при коротком замыкании можно не считаться. В случае необходимости подсчет повышения температуры можно произвести по формулам, даваемым Рюденбергом или Бирмансом.¹⁾

194. Ударный ток при несинхронном включении машины на параллельную работу.

Для избежания толчка тока включение синхронной машины на параллельную работу должно производиться при противоположном направлении векторов э. д. с. (§ 110). Если вследствие неправильной синхронизации

¹⁾ R. Rüdénberg. Kurzschlussströme beim Betrieb von Grosskraftwerken. Berlin, 1925; J. Biermann's. Ueberströme in Hochspannungsanlagen. Berlin, 1926.

включение произведено при совпадении по фазе э. д. с. машин, то в цепи, образованной обмотками статоров включаемых параллельно машин и соединительными проводами, действует двойное значение э. д. с. Если включены параллельно только две машины, то сопротивление этой цепи равно сумме сопротивлений машин. При равенстве сопротивлений машин такое включение равносильно внезапному короткому замыканию на зажимах машины. Если машина приключается параллельно к системе с большим числом работающих уже генераторов, то последовательно с обмоткой статора включаемой машины оказываются включенными обмотки остальных машин, соединенные между собою параллельно; при достаточном числе машин общее сопротивление их можно принять равным нулю. Тогда сопротивление цепи, образованной обмоткой приключаемой машины и обмотками остальных машин, можно принять равным сопротивлению только одной приключаемой машины; э. д. с. же, действующая в этой цепи, равна двойному значению э. д. с. одной машины. Поэтому толчок тока при таком неправильном включении получается равным двойному значению ударного тока при коротком замыкании на зажимах машины. Такой ток может весьма губительно отразиться на машине, поэтому включение машины без синхронизации производят при пониженном напряжении и через реактивную катушку (§ 127).

195*. Влияние параметров машины и конструкции ее на ток короткого замыкания.

а) Влияние насыщения железа. Учет насыщения железа необходимо производить, главным образом, при расчете установившихся коротких замыканий в сети (§§ 174—175). При установившемся коротком замыкании на зажимах машину можно считать ненасыщенной и считать характеристику короткого замыкания прямой линией (§ 173). На величине ударного тока короткого замыкания насыщение сказывается, в общем, незначительно; влияние его проявляется в уменьшении переходных реактивных сопротивлений, а следовательно, в увеличении начальных значений тока короткого замыкания. На рис. 263 представлена зависимость начальной амплитуды составляющей переменного тока короткого замыкания от э. д. с. холостого хода, подсчитанная в пренебрежении насыщением машины (кривая 1) и снятая на опыте с учетом насыщения (кривая 2). Из кривых видно, что с увеличением э. д. с., т. е. с увеличением насыщения, начальная амплитуда растет быстрее, чем по прямой линии, что обусловлено уменьшением реактивности. По данным L. A. Kilgore и S. H. Wright¹⁾ реактивность рассеяния вследствие насыщения уменьшается до 0,88 от значения ее в ненасыщенной машине, что соответствует увеличению начального тока вследствие влияния насыщения по сравнению с током в ненасыщенной машине, примерно, на 15%; по J. Biermanns²⁾ увеличение тока, в среднем, $10 \div 20\%$.

Постоянные времени обмотки статора и успокоительной обмотки невелики, поэтому их можно считать зависящими только от начальных значений переходных реактивных сопротивлений и влиянием изменения насыщения пренебрегать. Постоянная времени обмотки возбуждения в течение переходного процесса короткого замыкания изменяется соответственно изменению насыщения (на последнюю влияет, главным

¹⁾ L. A. Kilgore. Calculation of Synchronous Machine Constants. Tr. A. I. E. E., декабрь 1931, стр. 1201; S. H. Wright. Determination of Synchronous Machine Constants by Test. Tr. A. I. E. E., декабрь 1931, стр. 1331.

²⁾ J. Biermanns. Ueberströme in Hochspannungsanlagen. Berlin, 1926.

образом, насыщение полюсных наконечников). В начальный период короткого замыкания ток затухает быстрее, в последующий медленнее. Так как, однако, наибольшее затухание тока приходится на начальный период короткого замыкания, можно с достаточной точностью пользоваться постоянным значением постоянной времени обмотки возбуждения, определенным для насыщенных условий. На рис. 264 приведено изменение постоянной времени обмотки возбуждения в зависимости от времени, протекшего от начала короткого замыкания. Из рис. 264 видно, что

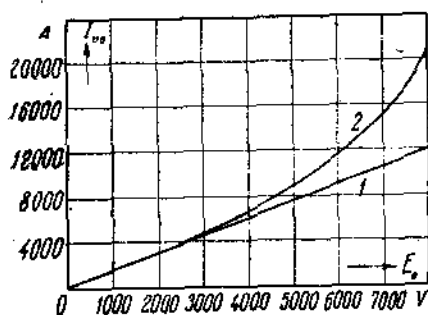


Рис. 263. Влияние насыщения машины на начальное значение тока короткого замыкания.

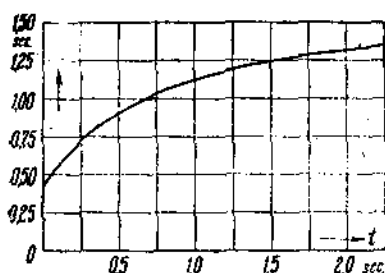


Рис. 264. Изменение постоянной времени обмотки возбуждения в насыщенной машине в зависимости от времени, протекшего от начала короткого замыкания.

в начальный период, когда машина сильно насыщена, а потому реактивное сопротивление невелико, постоянная времени очень мала. Постоянную времени, определенную для ненасыщенных условий, следует умножать на коэффициент 0,88 для получения постоянной для насыщенной машины.

б) Влияние омического сопротивления. Омическое сопротивление обмотки статора r_g обычно не оказывает почти никакого влияния на величину начального и установившегося тока короткого замыкания, что позволило нам пренебречь им. Влияние омического сопротивления сказывается лишь на характере изменения промежуточных значений тока короткого замыкания, т. е. на величине постоянных времени обмоток, которые с увеличением омического сопротивления обмотки уменьшаются. Точный анализ переходного процесса короткого замыкания показывает, что при неравных нулю омических сопротивлениях обмотки статора и обмотки возбуждения составляющая постоянного тока приближается к нулю не асимптотически, а с сильно затухающими колебаниями (рис. 265), а переменная составляющая имеет частоту, несколько меньшую синхронной; это равносильно тому, что постоянный поток статора Ψ_s движется в пространстве в ту же

сторону, что и ротор с некоторой скоростью, а переменный поток Ψ_r движется со скольжением относительно ротора; сумма скоростей потоков Ψ_s и Ψ_r равна синхронной скорости ротора.¹⁾ Практически, однако, этими явлениями пренебрегают.

с) Влияние успокоительной обмотки. Оно сказывается в увеличении сопротивления для потоков статора Ψ_s и Ψ_r вследствие появления уравнивающих токов в успокоительной обмотке, оттягивающих эти потоки в воздушный зазор. Поэтому для создания определенной величины потоков Ψ_s и Ψ_r требуется большее значение токов i_s и i_r статора, что равносильно уменьшению реактивного сопротивления статора (учитываемого введением мгновенных реактивностей x_d'' и x_q''). Вследствие этого первый всплеск тока короткого замыкания в машине с успокоительной обмоткой всегда

¹⁾ J. Biermanns. Ueberströme in Hochspannungsanlagen. Berlin, 1926.

выше, чем в машине без успокоительной обмотки (§ 179). Рассеяние успокоительной обмотки играет такую же положительную роль, как и рассеяние обмотки возбуждения, уменьшая начальное значение тока короткого замыкания, но в машинах с неявно выраженными полюсами рассеяние успокоительной обмотки незначительно. Для машин с явно выраженными полюсами, снабженных успокоительными обмотками, опыты Рюденберга¹⁾ показали, что, если принять за реактивность при коротком замыкании только реактивность рассеяния статора x_s , то формула для ударного тока получает вид:

$$I_s = \frac{1,64 \sqrt{2} E_0}{x_s}, \quad (377)$$

т. е. вместо коэффициента 1,8 (§ 186) входит коэффициент, меньший на 12%. Это указывает, по видимому, что в машинах с явно выраженными полюсами успокоительная обмотка обладает большим рассеянием.

в) Влияние рассеяния обмотки возбуждения. Из анализа выражения для тока короткого замыкания (§ 187) следует, что величина ударного тока короткого замыкания зависит от реактивности рассеяния генератора, к которой добавляется, если короткое замыкание происходит в сети, реактивность участка сети до точки аварии. Естественным средством для ограничения ударного тока короткого замыкания является поэтому увеличение реактивности рассеяния генератора. Одно время с целью увеличения проводи-

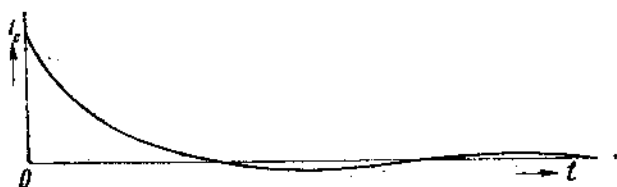


Рис. 265. Влияние омического сопротивления на затухание составляющей постоянного тока.

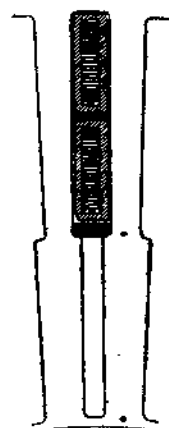


Рис. 266. Впадина рассеяния.

мости для потоков рассеяния конструировали генераторы со специальной впадиной рассеяния (рис. 266), которая создает добавочные пути для потока рассеяния впадины. Однако, вследствие насыщения зубцов при внезапном коротком замыкании эффект, даваемый впадиной рассеяния, очень незначителен. В настоящее время такая конструкция оставлена. В одном из турбогенераторов на 2300 kVA, 3000 об./мин., 50 пер./сек. без успокоительной обмотки реактивность рассеяния при внезапном коротком замыкании, принятая за 100%, распределялась следующим образом между отдельными составляющими:²⁾

Статор: рассеяние впадин	12%
рассеяние через головки зубцов	3%
рассеяние вокруг лобовых частей	53%
Полное рассеяние статора	68%
Рассеяние ротора (приведенное к статору)	32%

¹⁾ R. Rüdenberg. Stosskurzschlussströme von Schenkelpolgeneratoren mit Dämpferwicklung. E. u. M. 1930, стр. 609.

²⁾ L. Roebel. Le court-circuit brusque des grosses génératrices. Доклад на Международном электротехническом конгрессе, Paris, 1932 г.

Из этой таблицы видно, насколько малое влияние оказывает рассеяние впадины и, в особенности, рассеяние через головки зубцов при внезапном коротком замыкании, что объясняется насыщением железа. Из той же таблицы видно, что рассеяние ротора, уменьшающее ударный ток короткого замыкания (§ 182), оказывает существенное влияние, вследствие чего желательно, по возможности, увеличивать его. Увеличение рассеяния обмотки возбуждения путем включения в цепь ее реактивной катушки представляет еще то преимущество, что не ухудшает характеристик машины при нормальной работе, чего не получается при увеличении рассеяния статора. Однако, применение успокоительной обмотки уничтожает эффект, даваемый рассеянием потока обмотки возбуждения. Применение же успокоительной обмотки диктуется необходимостью избежать перенапряжений в разомкнутой фазе при несимметричных коротких замыканиях (§ 204); в гидрогенераторах, кроме того, успокоительная обмотка увеличивает устойчивость параллельной работы.

ГЛАВА XII.

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН.

196*. Статистика коротких замыканий в системах.

Рассмотренное в главе XI симметричное (трехполюсное) короткое замыкание в эксплуатации электрических систем встречается сравнительно редко. Гораздо чаще происходят однополюсные и двухполюсные короткие замыкания. Так, по данным комиссии по заземлениям (Committee on Grounding A. I. E. E.) короткие замыкания распределяются следующим образом¹⁾:

	Однополюсное замыкание на землю	Двухполюсное замыкание на землю	Двухполюсное короткое замыкание	Трехполюсное короткое за- мыкание
Максимальное количество	97	45	54	36
Среднее количество	69	14	11	6
Минимальное количество	30	0	0	0

При этом трехполюсные короткие замыкания в большинстве случаев являются результатом предшествовавших несимметричных коротких замыканий. Отсюда следует, что необходимо принимать меры к предупреждению, главным образом, несимметричных коротких замыканий и ограничению вызываемых ими сверхтоков. Ударный ток при несимметричных коротких замыканиях практически имеет ту же величину, что и при симметричном, но установившийся ток короткого замыкания при несимметричных замыканиях значительно больше, чем при симметричном.

197*. Метод симметричных составляющих.

При несимметричных коротких замыканиях (а также при несимметричной нагрузке трехфазной системы) векторы напряжений и токов в отдельных фазах не равны по величине и сдвинуты по фазе друг от друга на углы, отличающиеся от 120° . Потому система векторов трех фаз не представляет собою правильной звезды (рис. 267). Несимметричную трехфазную систему векторов, как показал С. Л. Fortescue²⁾, можно разложить на три независимые симметричные трехфазные системы, получившие в дальнейшем название симметричных составляющих: 1) система

¹⁾ Present Day Practice in Grounding of Transmission Systems. Tr. A. I. E. E. 1931, сентябрь стр. 892.

²⁾ С. Л. Fortescue. Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Poly-phase Networks. Tr. A. I. E. E. 1918, стр. 1027. См. также S. Boku. Calculation of Short-Circuit Ground Currents on Three Phase Power Networks. G. E. R. 1925, стр. 472; C. F. Wagner and R. D. Evans. Symmetrical Components. El. J. 1923, № 3, 4, 6, 7, 1929, № 9, 12.

положительной последовательности фаз; она состоит из трех равных по величине векторов, сдвинутых друг от друга на 120° и следующих друг за другом во времени в порядке A, B, C (рис. 267, б); 2) система отрицательной последовательности фаз; она также состоит из трех равных по величине векторов, сдвинутых друг от друга на 120° , но следующих во времени друг за другом в порядке A, C, B (рис. 267, в); 3) система нулевой последовательности фаз; она состоит из трех равных по величине векторов, совпадающих по фазе (рис. 267, д). Сумма этих трех систем и образует данную несимметричную систему (рис. 267, а). В дальнейшем все величины, относящиеся к системе положительной последовательности фаз, будем снабжать индексом 1, к системе отрицательной последовательности — индексом 2, к системе нулевой последовательности — индексом 0.

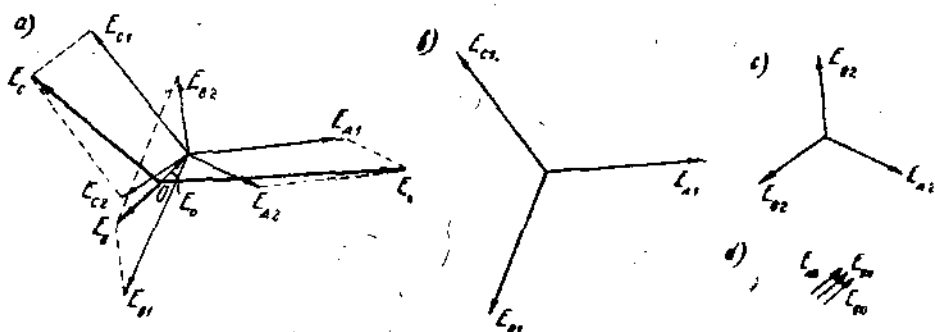


Рис. 267. Разложение несимметричной системы векторов.

Каждую из симметричных систем можно рассматривать совершенно независимо от других. Благодаря этому, разложив несимметричную систему на симметричные составляющие, можно применить к последним все формулы и уравнения, выведенные для обычных симметричных режимов, чем значительно облегчается изучение вопросов, связанных с несимметричной нагрузкой и с несимметричными короткими замыканиями. Этот метод рассмотрения несимметричных режимов, носящий название метода симметричных составляющих, имеет очень важное практическое значение, так как позволяет уяснить протекание процессов в машине и найти средства для уменьшения и предупреждения вредных последствий, вызываемых несимметричными короткими замыканиями.

Сопротивление синхронной машины для токов различной последовательности фаз неодинаково, вследствие наличия вращающегося в определенном направлении ротора и пространственного сдвига обмоток отдельных фаз на 120° эл. градусов друг от друга.

198*. Сопротивление синхронной машины для тока положительной последовательности фаз.

Если приложить к статору трехфазной машины напряжение положительной последовательности фаз U_1 , то по обмоткам будет проходить ток I_1 . Ток I_1 создает поток статора, состоящий из потока рассеяния статора Ψ_s и потока реакции якоря Ψ_a ; поток Ψ_a вращается синхронно с полюсами (относительно полюсов он, следовательно, неподвижен). Отношение $U_1/I_1 = z_1$ представляет собою полное сопротивление для тока

положительной последовательности фаз; так как активным сопротивлением обмотки статора в большинстве случаев можно пренебречь, то в дальнейшем будем говорить о реактивном сопротивлении для токов положительной последовательности фаз x_1 . При установившемся режиме это сопротивление представляет собою нормальное синхронное сопротивление, состоящее, как было выяснено в предыдущих главах, из сопротивления рассеяния x_s и сопротивления, эквивалентного реакции якоря x_a ; последнее не одинаково для продольной и поперечной оси машины, поэтому имеем соответственно для продольной и для поперечной оси:

$$x_{d1} = x_s + x_{ad}; \quad x_{q1} = x_s + x_{aq}; \quad (378)$$

для машины с цилиндрическим ротором:

$$x_1 = x_s + x_a. \quad (378a)$$

При переходных режимах сопротивление x_{d1} (соответственно x_{q1}) равно переходным сопротивлениям x_d' (x_q') или x_d'' (x_q''), в зависимости от рода генератора и времени, протекшего от начала изменения режима. Так как сопротивление для тока положительной последовательности фаз подробно рассматривалось выше (§§ 171, 181, 183), здесь на этом останавливаться не будем. Для дальнейшего, однако, полезно разложить сопротивление x_s на его составляющие.

Поток рассеяния статора Ψ_s , сцепляющийся с данной фазой A , создается как током данной фазы (поток самоиндукции Ψ_{s1A}), так и токами фаз B и C (потoki взаимной индукции Ψ_{smB} и Ψ_{smC}); считая положительным направление потоков внутри контура, охватываемого катушкой фазы, создающей данный поток, имеем

$$\Psi_s 10^{-8} = (\Psi_{s1A} - \Psi_{smB} - \Psi_{smC}) 10^{-8} = i_A L_s - i_B M_s - i_C M_s;$$

здесь L_s — коэффициент самоиндукции для потоков рассеяния, M_s — коэффициент взаимной индукции для потоков рассеяния. В то время как в фазе A ток имеет максимум, токи в фазах B и C равны половине максимального значения и направлены в обратную сторону; следовательно

$$\Psi_s 10^{-8} = \sqrt{2} i L_s + 0,5 \sqrt{2} i M_s + 0,5 \sqrt{2} i M_s = \sqrt{2} i (L_s + M_s) = \sqrt{2} i S;$$

здесь $S = L_s + M_s$ — эквивалентный коэффициент самоиндукции для потоков рассеяния (§ 76). Отсюда можем получить

$$x_s = \omega S = \omega (L_s + M_s) = x_{s1} + x_{sm};$$

здесь x_{s1} — сопротивление рассеяния, обусловленное потоком самоиндукции, а x_{sm} — потоком взаимной индукции. Таким образом, синхронное сопротивление для тока положительной последовательности фаз равно:

$$x_{d1} = x_s + x_{ad} = x_{s1} + x_{sm} + x_{ad}; \quad (379)$$

$$x_{q1} = x_{s1} + x_{sm} + x_{aq}.$$

199*. Сопротивление синхронной машины для токов отрицательной последовательности фаз.

В системе отрицательной последовательности фаз напряжение в фазе В отстает на 240° , а в фазе С — на 120° от напряжения в фазе А. Если приложить такую систему напряжений U_2 к статору вращающейся трехфазной синхронной машины, то токи отрицательной последовательности фаз I_2 , вызванные этими напряжениями, создадут в машине магнитный поток, вращающийся с синхронной скоростью против направления вращения ротора и пересекающий обмотки ротора, следовательно, с двойной скоростью. Отношение $U_2/I_2 = z_2$ называется полным сопротивлением для тока отрицательной последовательности фаз. Если предварительно пренебречь активным сопротивлением, то сопротивление z_2 сведется к реактивному сопротивлению x_2 . Сопротивление x_2 можно найти из общей формулы

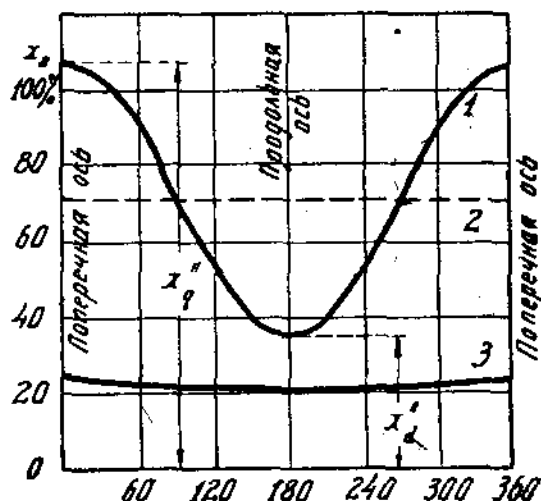


Рис. 268. Зависимость x_2 от положения потока относительно оси полюсов.

$$j\omega\Psi_2 10^{-8} = \sqrt{2}I_2 jx_2; \quad (380)$$

здесь Ψ_2 — поток, создаваемый токами отрицательной последовательности фаз I_2 ; поток Ψ_2 , как указывалось выше, является обратно синхронным потоком. Так как поток Ψ_2 движется с двойной скоростью относительно ротора, то он индуцирует в обмотках ротора токи двойной частоты. Последние по закону Ленца препятствуют проникновению потока Ψ_2 в ротор; вследствие этого поток Ψ_2 является потоком рассеяния. По этой причине сопротивление x_2 всегда меньше сопротивления x_1 , так как в x_1 входит сопротивление реакции якоря, создаваемой токами положительной последовательности фаз, в то время как токи отрицательной последовательности потока реакции не создают. Так как в общем случае обмотки на роторе не симметричны в продольной и поперечной оси, то и величина x_2 не постоянна; она изменяется в зависимости от того, расположена ли ось потока Ψ_2 в данный момент времени по продольной оси машины или по поперечной (ср. § 179). Идя тем же путем, как в § 179, можно получить, что для момента времени, когда ось потока Ψ_2 совпадает с продольной осью, сопротивление x_2 равно:

$$x_{2d} = x_d'',$$

для момента времени, когда ось потока Ψ_2 совпадает с поперечной осью, сопротивление x_2 равно:

$$x_{2q} = x_q''.$$

Среднее значение сопротивления x_2 можно принять равным:

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}. \quad (381)$$

На рис. 268 приведены кривые изменения x_2 в зависимости от положения оси потока Ψ_2 относительно продольной оси машины. Кривая 1 дает x_2 для машины с явно выраженными полюсами без успокоительной обмотки; вследствие отсутствия в поперечной оси обмотки на роторе сопротивление x_2 для этой оси сильно увеличивается. Кривая 2 дает среднее значение x_2 . Кривая 3 дает сопротивление x_2 для машин с совершенной симметричной успокоительной обмоткой, обладающей малым активным сопротивлением. В этом случае $x_d'' = x_q''$, следовательно, $x_2 = x_d''$. Так как x_d'' можно принять равным x_s (§ 181), то для такой машины

$$x_2 = x_s = x_{st} + x_{sm}. \quad (382)$$

Так как величина x_2 изменяется от значения x_d'' до значения x_q'' два раза за один период изменения тока, то в расчетах всегда пользуются средним значением x_2 ; таким образом, x_2 не имеет продольной и поперечной составляющих. Величина x_2 не изменяется с течением времени: она одинакова как для установившихся, так и для неустойчивых режимов, так как уравнивающие токи двойной частоты в обмотках ротора с течением времени не затухают.

В том случае, когда обмотки ротора имеют большое активное сопротивление, сопротивление z_2 нельзя принимать равным реактивному сопротивлению x_2 . Большие джоулевы потери в обмотках ротора должны покрываться за счет тока отрицательной последовательности фаз, что равносильно увеличению активного сопротивления статора для тока отрицательной последовательности (§§ 105, 108). О величине x_2 см. § 209.

200*. Сопротивление синхронной машины для токов нулевой последовательности фаз.

Система напряжений нулевой последовательности фаз U_0 представляет собою три вектора, совпадающие по фазе. Токи нулевой последовательности фаз I_0 , вызванные приложенной к статору системой напряжений U_0 , пульсируют во времени и имеют одинаковую величину и направление в обмотках всех трех фаз машины. При диаметральной шаге обмотки токи нулевой последовательности не создают общего магнитного потока, так как результирующая м. д. с. всех трех фаз равна нулю (рис. 269). Вследствие этого сопротивление для токов нулевой последовательности обусловлено только потоками рассеяния (пунктир на рис. 269); потока реакции токи нулевой последовательности не образуют. Так как потоки рассеяния в зубцах, разграничивающих отдельные фазы, одинаковы по величине и направлены в одну сторону, зубцы насыщаются и поэтому общая величина потока рассеяния через зубцы получается меньше, чем для токов положительной последовательности фаз. В лобовых частях ка-

тушечной обмотки при двухэтажных соединениях имеем увеличение реактивности рассеяния вследствие взаимной индукции (рис. 270, а) по сравнению с реактивностью для токов положительной последовательности фаз. При трехэтажных соединениях (рис. 270, б) и в обмотках с распределенными

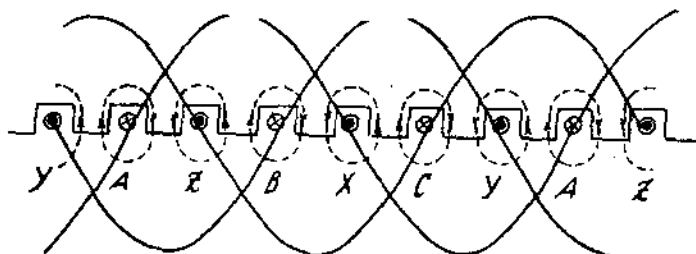


Рис. 269. Кривая $\mathcal{M}$ д. с., создаваемой токами нулевой последовательности фаз.

лобовыми соединениями американского типа (рис. 271а,) имеем, наоборот, уменьшение реактивности рассеяния. Если шаг у двухслойной обмотки укорочен до $\frac{2}{3} \tau$, то в проводниках верхнего и нижнего слоев текут разного направления токи нулевой последовательности фаз (рис. 271, б). Вследствие этого поток рассеяния через зубцы уменьшается почти до нуля, и сопротивление для тока нулевой последовательности фаз становится очень малым.

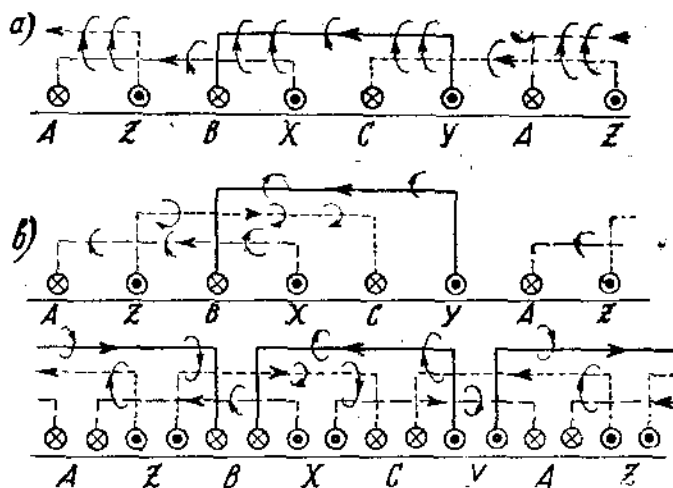


Рис. 270. Поток рассеяния в лобовых частях от токов нулевой последовательности фаз.

Сцепляющийся с фазой А поток, создаваемый токами нулевой последовательности фаз, равен:

$$\Psi_0 = \Psi_{IA} - \Psi_{mB} - \Psi_{mC}; \quad (383)$$

здесь Ψ_{IA} — поток самоиндукции, а Ψ_{mB} и Ψ_{mC} — потоки взаимной индукции (ср. § 198). Так как во всех фазах токи нулевой последовательности имеют одинаковое направление и одинаковую величину, то получаем

$$\Psi_0 10^{-8} = \sqrt{2} I_0 L_s - \sqrt{2} I_0 M_s - \sqrt{2} I_0 M_s = \sqrt{2} I_0 (L_s - 2 M_s); \quad (384)$$

следовательно:

$$x_0 = x_d - 2x_{\text{зм}}. \quad (385)$$

В зависимости от типа обмотки величина x_0 колеблется в пределах

$$x_0 = 0,15 \div 0,6x_d. \quad (386)$$

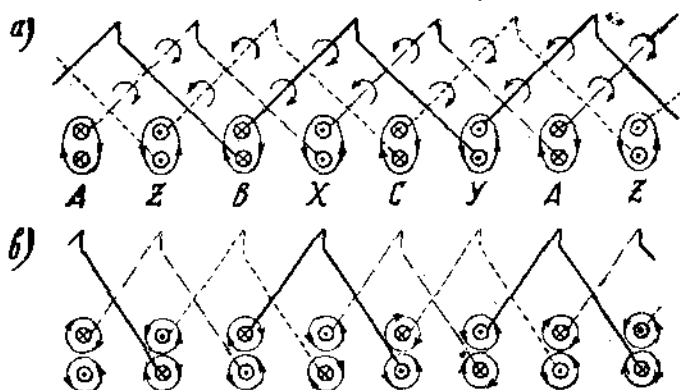


Рис. 271. Потоки рассеяния от токов нулевой последовательности фаз в лобовых частях американской обмотки.

Поскольку сопротивление x_0 представляет собою сопротивление рассеяния, то оно, подобно x_d , не имеет продольной и поперечной составляющих и не изменяется с течением времени. Подробнее о величине x_0 см. § 210.

201*. Двухполюсное короткое замыкание на зажимах синхронной машины.

Пользуясь методом симметричных составляющих, можно легко и быстро вывести формулу для величины тока при несимметричном коротком замыкании.¹⁾ Поскольку нас в данном случае интересует не быстрота расчета, а уяснение происходящих при таком замыкании физических процессов, то будем рассматривать несимметричное короткое замыкание на основании того же принципа инерции магнитного потока, который положен в основу изучения симметричного короткого замыкания, причем будем делать те же допущения, что были сделаны раньше (§§ 177—178). Полученные в результате такого рассмотрения формулы имеют тот же вид и то же значение, что и выведенные методом симметричных составляющих.

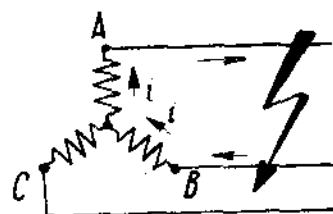


Рис. 272. Двухполюсное короткое замыкание.

Если на зажимах A и B синхронной машины происходит двухполюсное короткое замыкание (рис. 272), то ток короткого замыкания одинаков по величине и фазе в обмотках фаз A и B; в обмотке фазы C ток равен нулю. Вычислим сначала составляющую переменного тока короткого замыкания, т. е. примем, что короткое замыкание происходит в момент времени, когда поток полюсов, сцепляющийся с обоими замкнутыми накоротко

¹⁾ См. статьи, указанные в §§ 197 и 219.

фазами A и B , равен нулю; в этот момент времени э. д. с. между зажимами A и B имеет максимум. Для простоты будем рассматривать короткое замыкание при холостом ходе. На рис. 273, a показано положение полюсов относительно осей обмоток фаз A и B в начальный момент короткого замыкания, а на рис. 273, b — спустя четверть периода. Очевидно, что поток полюсов, сцепляющийся в последнем случае с каждой из обмоток A или B , равен $\Psi_d \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_d$, где Ψ_d — продольный поток полюсов (потoki приняты распределенными по синусоиде, см. § 178). Поток, сцепляющийся с обеими фазами A и B , равен

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_d + \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_d = \sqrt{3} \Psi_d. \quad (387)$$

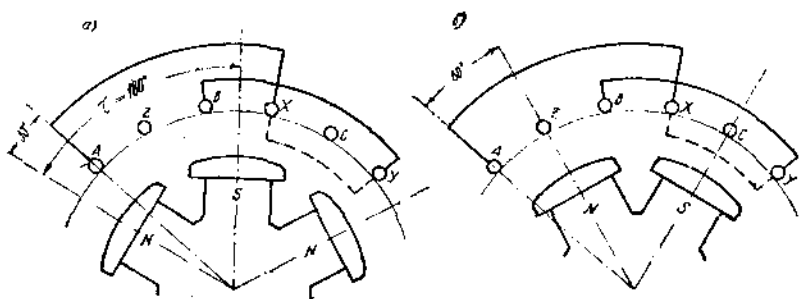


Рис. 273. Положение полюсов относительно осей обмоток.

Это представляет максимальное значение потока, сцепляющегося с замкнутыми накоротко фазами; при дальнейшем движении полюсов поток сцепления уменьшается. По принципу инерции магнитного потока (§ 177) ток в короткозамкнутых фазах A и B должен создать поток (поток самоиндукции), компенсирующий изменение потока полюсов, сцепляющегося с обмотками в начальный момент короткого замыкания. Максимальное значение потока самоиндукции равно $\sqrt{3} \Psi_d$. Так как в начальный период короткого замыкания поток самоиндукции статора является потоком рассеяния (§ 179), то, следовательно:

$$\sqrt{3} \Psi_d 10^{-8} = \sqrt{2} I_A L_s + \sqrt{2} I_B M_s + \sqrt{2} I_B L_s + \sqrt{2} I_A M_s; \quad (388)$$

здесь L_s — коэффициент самоиндукции для потоков рассеяния, одинаковый для обеих фаз A и B вследствие симметрии обмотки; M_s — коэффициент взаимной индукции между обмотками фаз A и B . Так как обмотки соединены последовательно (рис. 272), то ток одинаков в каждой фазе: $I_A = I_B = I$; следовательно:

$$\sqrt{3} \Psi_d 10^{-8} = 2\sqrt{2} I (L_s + M_s) = 2\sqrt{2} I S = 2\sqrt{2} I \frac{x_s}{\omega}. \quad (389)$$

Отсюда, аналогично уравнению (302), получаем начальную амплитуду составляющей переменного тока короткого замыкания:

$$I_v = \sqrt{2} I_o = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{2} E_0}{x_s}, \quad (390)$$

где E_0 — э. д. с. холостого хода. В генераторах с успокоительной обмоткой вместо x_s правильнее подставлять x_d'' ; для получения значения тока

спустя 2—3 периода после начала короткого замыкания вместо x_s надо подставлять x_d' (§ 180, 182). Составляющая переменного тока затухает с постоянной времени ротора (§ 213).

Если короткое замыкание происходит в момент времени, когда полный поток, сцепляющийся с замкнутыми накоротко фазами A и B , имеет максимальное значение, то в статоре появляется еще составляющая постоянного тока. Максимальное значение ее равно начальной амплитуде составляющей переменного тока (см. § 179), т. е. равно:

$$I_{\text{сmax}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2} E_0}{x_s}. \quad (391)$$

Эта составляющая затухает с постоянной времени статора (§ 212). Ударный ток короткого замыкания, т. е. величина тока, спустя половину периода после начала короткого замыкания, когда составляющая постоянного тока уменьшается до 0,8 максимального значения, равен:

$$I_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1,8 \sqrt{2} E_0}{x_s}. \quad (392)$$

Все процессы, связанные с появлением в статоре составляющей постоянного тока (затухание этого тока, создаваемый им поток и индуцируемые последним токи в обмотках ротора) проходят как в количественном, так и в качественном отношении точно так же, как и при трехполюсном коротком замыкании (§ 179). Поэтому в дальнейшем не будем на этом останавливаться и рассмотрим только явления, связанные с протеканием в статоре переменного тока короткого замыкания, величина и характер изменения которого неодинаковы при двухполюсном и трехполюсном коротком замыкании.

Так как по обмоткам фаз A и B проходит одинаковый ток короткого замыкания, а в фазе C ток равен нулю, то магнитный поток, создаваемый током короткого замыкания, является пульсирующим. Последний можно разложить на два вращающихся (§ 101): синхронный и обратно синхронный. Обратно синхронный поток движется с двойной скоростью относительно обмоток ротора; вследствие этого он индуцирует в них токи двойной частоты, которые препятствуют по закону Ленца проникновению в ротор обратно синхронного потока. Вследствие этого обратно синхронный поток не оказывает влияния на величину основного потока полюсов. Синхронный поток статора неподвижен относительно полюсов; его действие такое же, как и результирующего потока трех фаз Ψ_0 при трехполюсном коротком замыкании (§ 179). После того как затухнут уравнивающие токи в обмотке возбуждения, индуцированные синхронным потоком, последний проникает в ротор и уменьшает основной поток полюсов. Таким образом, реакция якоря создается только синхронным потоком. Обозначим через Ψ_{a1} пульсирующий поток одной фазы статора, создаваемый переменной составляющей тока статора; очевидно

$$\Psi_{a1} = \Psi_{a1} + \Psi_s; \quad (393)$$

здесь Ψ_{a1} — пульсирующий поток реакции одной фазы статора, а Ψ_s — поток рассеяния статора. На статоре замкнуты накоротко две фазы, причем сила тока в обеих фазах одинакова; поэтому потоки Ψ_{a1} , создаваемые каждой фазой, одинаковы по величине; в пространстве оси потоков Ψ_{a1} каждой фазы сдвинуты на 60° (рис. 274). Поэтому полная величина пульсирующего потока реакции равна геометрической сумме этих потоков, т. е. $\sqrt{3} \Psi_{a1}$. Синхронно вращающийся поток реакции равен половине амплитуды

пульсирующего, т. е. равен $\frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_{a1}$. Этот поток проникает в ротор; так как он направлен навстречу потоку полюсов (активным сопротивлением обмотки статора пренебрегаем), то после затухания уравнивающих токов в обмотках ротора имеем поток междужелезного пространства $\Psi_d - \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_{a1}$. Подставляя в формулу (389) вместо Ψ_d величину

$\Psi_d - \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_{a1}$, получаем

$$\sqrt{3} \left(\Psi_d - \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_{a1} \right) = 2\sqrt{2} \frac{x_s}{\omega} I_{\omega} 10^8 \quad (394)$$

или

$$\sqrt{3} \Psi_d = \frac{3}{2} \Psi_{a1} + 2\sqrt{2} \frac{x_s}{\omega} I_{\omega} 10^8. \quad (395)$$

Поток Ψ_{a1} создается м. д. с. одной фазы AW_1 . Результирующая м. д. с. всех трех фаз машины равна $AW_a = \frac{3}{2} AW_1$ (§ 70), поэтому величина $\frac{3}{2} \Psi_{a1}$ представляет собою величину результирующего потока реакции трехфазной обмотки:

$$\frac{3}{2} \Psi_{a1} = \Psi_a = \sqrt{2} \frac{x_{ad}}{\omega} I_{\omega} 10^8; \quad (396)$$

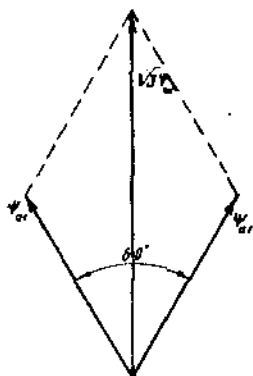
здесь x_{ad} — реактивное сопротивление, эквивалентное реакции якоря. Таким образом, уравнение (395) можно написать в виде:

$$\sqrt{3} \Psi_d \omega 10^{-8} = \sqrt{2} I_{\omega} x_{ad} + 2\sqrt{2} I_{\omega} x_s; \quad (397)$$

отсюда установившийся ток двухполюсного короткого замыкания I , который мы обозначим через I_{kII} , равен:

$$I_{kII} = \frac{\sqrt{3} E_0}{x_{ad} + 2x_s}. \quad (398)$$

Рис. 274. Сложение потоков реакции отдельных фаз при двухполюсном коротком замыкании.



Так как $x_{ad} + x_s = x_1$ (§ 198), а величину x_s можно принять равной x_2 (§ 199), то получаем формулу, даваемую методом симметричных составляющих:

$$I_{kII} = \frac{\sqrt{3} E_0}{x_1 + x_2}. \quad (399)$$

Если вместо x_1 в формулу (399) подставить значение x_d'' , то получим начальное значение (действующее) переменной составляющей I_{ω} ; если подставить x_d' , то получим значение тока спустя 0,04 ÷ 0,06 сек. после начала короткого замыкания; значение $x_1 = x_d$ дает установившийся ток. Величина x_2 постоянна для любого момента времени. Промежуточные значения тока короткого замыкания можно брать по декрементным кривым (§ 188).

Теоретически из формул (305) и (392) следует, что ударный ток короткого замыкания при двухполюсном коротком замыкании в $1: \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,15$ раза меньше, чем при трехполюсном коротком замыкании.

Практически, во многих случаях ударный ток получается одинаковым,¹⁾ что объясняется тем, что сопротивление рассеяния при двухполюсном коротком замыкании несколько меньше, чем при трехполюсном. Проме-

¹⁾ J. Biermanns. Ueberströme in Hochspannungsanlagen. Berlin, 1926.

жущие значения и установившийся ток короткого замыкания при двухполюсном коротком замыкании больше, чем при трехполюсном, так как размагничивающее влияние реакции якоря при двухполюсном коротком замыкании обусловлено только синхронно вращающимся потоком, а следовательно, имеет меньшее значение, чем при трехполюсном замыкании. На рис. 275 приведены характеристики трехполюсного, двухполюсного и однополюсного короткого замыкания.

В разомкнутой при двухполюсном коротком замыкании обмотке фазы С обратный синхронный поток индуцирует э. д. с. третьей гармоники (§ 104), величина которой получается иногда больше номинального напряжения.

202*. Однополюсное короткое замыкание на зажимах синхронной машины.

При однополюсном коротком замыкании процесс протекает так же, как и при двухполюсном, отличаясь от него лишь количественно. Максимальное значение составляющей переменного тока короткого замыкания находим из уравнения:

$$j\omega\Psi_a 10^{-8} = \sqrt{2} I jx_{st}; \quad (400)$$

здесь Ψ_a — поток полюсов, сцепляющийся с замкнутой накоротко фазой; x_{st} — сопротивление, эквивалентное потокам самоиндукции рассеяния замкнутой накоротко фазы (§ 198); так как по другим фазам ток не проходит, то потоков взаимной индукции рассеяния нет. Током I создается пульсирующий поток статора, состоящий из синхронного и обратного синхронного потоков. После затухания уравнивающих токов в обмотках ротора синхронно вращающийся поток реакции, равный половине амплитуды пульсирующего потока реакции $\frac{1}{2} \Psi_{a1}$, проникает в ротор и уменьшает поток между железного пространства. Поэтому с замкнутой накоротко фазой сцепляется поток $\Psi_a - \frac{1}{2} \Psi_{a1}$. Так как $\frac{1}{2} \Psi_{a1} = \frac{\Psi_a}{3} = \sqrt{2} I \frac{x_{ad}}{3} 10^8$, где Ψ_a — результирующий поток реакции всех трех фаз статора, а x_{ad} — сопротивление, эквивалентное результирующему потоку реакции (ср. § 201), то получаем

$$\Psi_a 10^{-8} = \sqrt{2} I \frac{x_{ad}}{3} + \sqrt{2} I x_{st} \quad (401)$$

откуда

$$I = \frac{3E_0}{x_{ad} + 3x_{st}}. \quad (402)$$

Величину $3x_{st}$ можно заменить (см. § 200) через

$$3x_{st} = 3x_{st} + 2x_{sm} - 2x_{sm} = 2(x_{st} + x_{sm}) + x_{st} - 2x_{sm} = 2x_s + x_0 = x_s + x_2 + x_0, \quad (403)$$

где x_s — сопротивление для токов отрицательной последовательности фаз, x_0 — для токов нулевой последовательности. Обозначая установившийся ток при однополюсном коротком замыкании через I_{k1} , имеем

$$I_{k1} = \frac{3E_0}{x_{ad} + x_s + x_2 + x_0} = \frac{3E_0}{x_1 + x_2 + x_0}. \quad (404)$$

Эту формулу можно вывести непосредственно, воспользовавшись методом симметричных составляющих.

Подставляя вместо x_1 величину $x_d'' \cong x_s$, получим величину начальной амплитуды при однополюсном коротком замыкании

$$I_{v0} = \sqrt{2} I_v = \frac{3\sqrt{2} E_0}{2x_s + x_0} \quad (405)$$

и величину ударного тока короткого замыкания

$$I_s = \frac{3\sqrt{2} 1,8 E_0}{2x_s + x_0} \quad (406)$$

Как следует из этих формул, при $x_0 \cong 0$ ударный ток при однополюсном коротком замыкании в 1,5 раз больше, чем при трехполюсном. Практически $x_0 \neq 0$, поэтому ударный ток получается почти равным ударному току при трехполюсном коротком замыкании.¹⁾

Промежуточные значения тока короткого замыкания можно брать по декрементным кривым (§ 188). На рис. 275 приведена характеристика установившегося тока при однополюсном коротком замыкании. Как следует из вышеприведенных рассуждений, затухание тока при однополюсном коротком замыкании зависит лишь от синхронно вращающегося потока реакции статора.

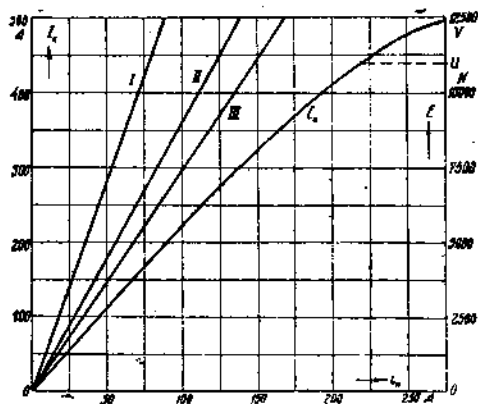


Рис. 275. Характеристики трехполюсного (III), двухполюсного (II) и однополюсного (I) короткого замыкания и характеристика холостого хода (E_0).

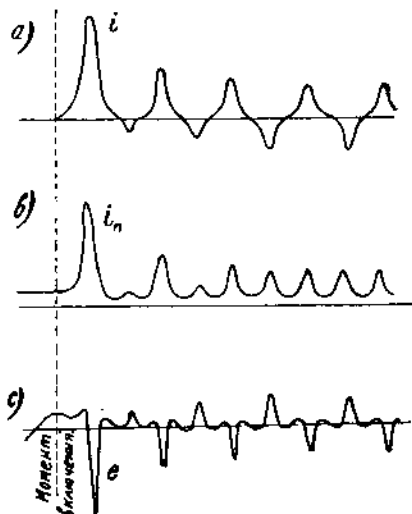


Рис. 276. Осциллограммы тока в статоре (а), тока в обмотке возбуждения (б) и в д. с. в разомкнутой фазе (с) при двухполюсном коротком замыкании.

203*. Вычисление токов при несимметричных коротких замыканиях.

Вычисление токов при несимметричных коротких замыканиях производится обычно по методу симметричных составляющих и сводится при этом к нахождению лишь тока положительной последовательности фаз, так как остальные составляющие тока выражаются через ток положительной последовательности.²⁾ Затухание тока при несимметричном коротком

¹⁾ J. Biermann's. Ueberströme in Hochspannungsanlagen. Berlin, 1926.

²⁾ 1) Н. Н. Щедрин. Короткие замыкания в электрических системах сильного тока. СЭТ, т. II, отд. 10; 2) А. Довжиков. Применение метода симметричных составляющих в электротехнике. Отдельный оттиск из журн. „Амер. техн. и пром.“ 1931/32 гг.; 3) G. Oberdorfer. Das Rechnen mit Symmetrischen Komponenten. Leipzig, 1929; 4) См. статьи, указанные в § 197.

замыкании зависит только от затухания тока положительной последовательности фаз (§§ 201—202), что и позволяет пользоваться для всех видов короткого замыкания одними и теми же декрементными кривыми (§ 188), меняя в последних лишь масштабы.

204*. Ток в обмотке возбуждения при несимметричных коротких замыканиях.

Как было рассмотрено в §§ 201—202, при несимметричном коротком замыкании, кроме потока рассеяния и синхронно вращающегося потока, действие которых такое же, как и при трехполюсном коротком замыкании обмотка статора создает еще обратно синхронный поток. Этот поток оказывает такое же действие, как и в однофазных машинах (§ 104): он индуктирует в обмотке возбуждения ток двойной частоты и в обмотке статора третью гармонику э. д. с. На рис. 276 приведены осциллограммы токов в статоре и в роторе и э. д. с. в разомкнутой фазе статора при двухполюсном коротком замыкании. Ток в статоре имеет очень остроконечную форму, что происходит вследствие присутствия сильно выраженной третьей гармоники. В обмотке возбуждения ясно видна вторая гармоника. Для уменьшения тока двойной частоты в обмотке возбуждения и э. д. с. третьей гармоники в разомкнутой фазе статора в турбогенераторах на роторе укладывают обычно успокоительную обмотку, уничтожающую обратно синхронный поток.

ГЛАВА XIII.

ПАРАМЕТРЫ СИНХРОННЫХ МАШИН.

205. Синхронная реактивность.

Синхронная реактивность учитывает потоки рассеяния и реакции статора. В машине с цилиндрическим ротором, в которой величина потока реакции не зависит от положения ротора относительно обмотки статора (§ 73), имеем

$$x = x_a + x_s. \quad (407)$$

В машинах с явно выраженными полюсами необходимо различать синхронную реактивность для продольной оси (§ 74)

$$x_g = x_{ag} + x_s \quad (408)$$

и для поперечной

$$x_q = x_{aq} + x_s. \quad (409)$$

Величина синхронной реактивности не является постоянной для данной машины, так как поток реакции (а следовательно, и x_a) зависит от насыщения. Вследствие этого при разных режимах работы получаем разное значение синхронной реактивности. Между тем, величина синхронной реактивности оказывает очень существенное влияние на работу машины, так как она определяет, во-первых, величину установившегося тока короткого замыкания (§ 171), во-вторых, величину напряжения на зажимах машины при данном токе возбуждения (§ 82). Для целей расчета токов короткого замыкания, когда можно считать машину мало насыщенную, синхронную реактивность для продольной оси определяют по способу Бен-Эшенбурга (§ 82) по характеристикам холостого хода и короткого замыкания (рис. 277); для возбуждения i_1 , соответствующего номинальному напряжению при полной нагрузке, находим

$$x_g = \frac{E_0}{I_{k1}}. \quad (410)$$

Эту величину в дальнейшем принимают постоянной. Если характеристику холостого хода спрямляют по Foerster'у (§ 175), то определение x_g производят указанным способом, пользуясь спрямленной характеристикой холостого хода вместо действительной. Для определения изменения напряжения величину x_g определяют по способу А. И. Е. Е. по характеристикам холостого хода и нагрузочной, снятой при $\cos \varphi = 0$ (§ 90).

В американской литературе иногда пользуются синхронной реактивностью в продольной оси для ненасыщенной машины (§ 92):

$$x_d = x_{ad} + x_s, \quad (411)$$

(синхронная реактивность в поперечной оси x_d одинакова как для насыщенной, так и для ненасыщенной машины). Величина x_d постоянна для данной машины при всех режимах работы. Определение ее производится по прямолинейной части характеристики холостого хода и по характеристике короткого замыкания (рис. 277): откладывают на протяжении прямой части характеристики холостого хода номинальное напряжение U_N и при соответствующем ему возбуждении i_2 находят установившийся ток короткого замыкания I_{k2} ; тогда

$$x_d = \frac{U_N}{I_{k2}}. \quad (412)$$

При пользовании величиной x_d надо за характеристику холостого хода принимать прямую; и для всех других параметров брать значения их, соответствующие ненасыщенной машине. При пользовании величиной x_d для определения повышения напряжения получаем значение э. д. с. E_d , соответствующее прямой части характеристики холостого хода; для определения действительной э. д. с. необходимо иметь характеристику холостого хода (§ 92).

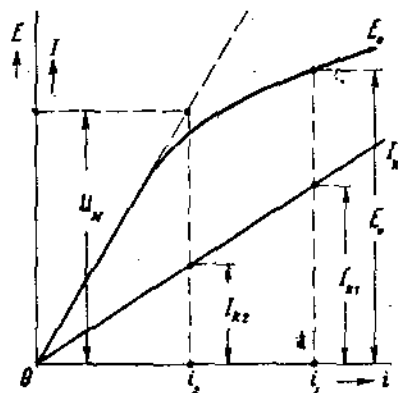


Рис. 277. Определение синхронной реактивности.

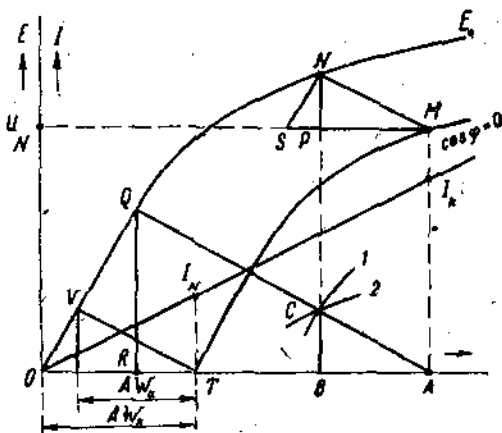


Рис. 278. Определение x_d по методу Blondel-Потье.

Значения x_d и x_q приведены в табл. IX—XI для нормальных синхронных машин. Значение x_d не постоянно для данной машины, а потому данных для него привести нельзя. Значение x_q можно определить по значению x_d по формулам: для генераторов с цилиндрическим ротором $x_q = x_d$; для генераторов и двигателей с явно выраженными полюсами, как имеющих успокоительную обмотку, так и без нее $x_q = 0,6x_d$.

206. Реактивность рассеяния.

Под реактивностью рассеяния x_s мы понимаем реактивность, обусловленную потоками рассеяния статора при нормальном установившемся режиме. Действительная величина x_s очень мало отличается от мгновенной переходной реактивности x''_d (§ 181). Разница между ними обусловлена тем, что при внезапном коротком замыкании зубцы статора сильно насыщаются, и проводимость для потока рассеяния уменьшается (§ 195); таким же образом влияют и токи Фуко, индуцируемые в зубцах. С другой стороны, в x''_d входит и рассеяние успокоительной обмотки, действующее

в сторону увеличения сопротивления (§ 207). Расчетные данные дают для x_s обычно значение его в пренебрежении насыщением, что соответствует нормальному режиму работы; для учета насыщения следует умножать расчетное значение x_s на эмпирический коэффициент 0,88 (§ 195).

Точное опытное определение x_s невозможно, что необходимо иметь в виду при пользовании опытными данными о x_s для расчета токов коротких замыканий; опытные данные обычно дают преувеличенное значение x_s .

По нормам Германского союза электротехников (V. D. E.) реактивность рассеяния генераторов при трехполюсном коротком замыкании равна:

для турбогенераторов	$x_s = 12\%$
„ генераторов с явно выраженными полюсами	$x_s = 24\%$

Последняя величина включает в себя и реактивность рассеяния ротора, т. е. представляет по существу величину x'_d (§ 183). По данным фирмы В. В. С. значения x_s в зависимости от скорости вращения генератора n равны:

$n = 3000$	1500	1000	750	500	250	125 об./мин.
$x_s = 9 \div 18$	$10 \div 15$	$15 \div 22$	$15 \div 22$	$18 \div 22$	$20 \div 26$	$22 \div 30\%$

По данным фирмы А. Е. Г:

для турбогенераторов	$x_s = 12 \div 15\%$
„ тихоходных генераторов с явно выраженными полюсами	$x_s = 15 \div 20\%$
„ генераторов старой конструкции	$x_s = 8 \div 12\%$
„ генераторов очень старой конструкции	$x_s = 5 \div 8\%$

Для опытного определения x_s был предложен ряд методов, из которых ниже приводятся лишь наиболее употребительные (см. также § 208).

а) Метод Блонделя — Потье. На рис. 278 изображены характеристики: 1) холостого хода, 2) нагрузочная при $\cos \varphi = 0$ и 3) короткого замыкания. Точка M соответствует номинальному напряжению U_N при номинальном токе I_N и $\cos \varphi = 0$. У точки M построен треугольник Потье (§ 172), соответствующий номинальному току I_N ($\overline{MP} = AW_a$, $\overline{PN} = I_N x_s$). Для определения x_s необходимо знать сторону $\overline{PN}$ треугольника Потье. При возбуждении, соответствующем точке M , имеем ток короткого замыкания I_k и соответствующий ему треугольник Потье AQR . Треугольник Потье при токе I_N подобен треугольнику AQR , поэтому если построить относительно точки A кривую 1, подобную характеристике холостого хода с отношением подобия I_N/I_k , то вершина треугольника Потье при токе I_N должна лежать на кривой 1. Для определения ее проводим кривую 2, параллельную характеристике холостого хода и лежащую ниже последней на расстоянии U_N . Точка пересечения C кривых 1 и 2 дает вершину треугольника Потье при токе I_N . Очевидно, треугольник ABC равен треугольнику MNP .

Для более быстрого нахождения вершины треугольника Потье откладывают от точки M ампер-витки короткого замыкания AW_k , соответствующие номинальному току $I_k = I_N$, и из конца $AW_k = \overline{MS}$ проводят линию SN , параллельную прямолинейной части характеристики холостого хода, пересечение которой с характеристикой холостого хода в точке N дает вершину треугольника. Очевидно, треугольник TVO равен треугольнику MNS . Этот способ менее точен, чем предыдущий.

Отрезок $\overline{NP}$ представляет собою в действительности не только падение напряжения $I_N x_s$, но и падение, обусловленное рассеянием между полюсами при нагрузке; поэтому величина x_s , определенная по методу Блонделя—Потье, больше действительной. Как указывает С. F. Wagner,¹⁾ это значение $x_s = 1,3 x''_d$.

При пользовании методом Блонделя—Потье затруднения заключаются в опытном снятии точки M нагрузочной характеристики, так как не всегда возможно создать нагрузку при $\cos \varphi = 0$ (§ 96).

б) Определение x_s по характеристикам короткого замыкания. Существует три способа (Fallou, Карр'а и Толвинского-Ефремова), предложенных первоначально для определения x_s ; однако, в действительности метод Fallou дает значение x_s , метод Толвинского-Ефремова— x_0 , а метод Карр'а— $0,5(x_s + x_0)$. Так как в машинах с совершенной успокоительной обмоткой $x_2 = x''_d \cong x_s$, то для таких машин методом Fallou можно пользоваться и для определения x_s . О методе Fallou см. § 209, о методах Толвинского-Ефремова и Карр'а см. § 210.

в) Метод с вынутым ротором. Этот метод следует признать самым точным, однако, необходимость вынимать ротор делает этот метод практически неудобным. При опыте вынимают ротор из машины и подводят к статору трехфазный ток. Создаваемый этим током поток состоит из четырех частей: 1) поток рассеяния вокруг лобовых частей обмотки, 2) поток рассеяния через впадины, 3) поток рассеяния через головки зубцов, 4) поток рассеяния от головок зубцов одного полюса статора к двум другим соседним полюсам через пространство, в котором помещается ротор (поток рассеяния через расточку статора). Первые три потока представляют собою обычный поток рассеяния статора и в нормальных синхронных машинах не зависят от того, имеется ли ротор в машине или нет. Поток через расточку статора Φ_B существует лишь когда ротор вынут. Величину его и величину индуктированной им в статоре э. д. с. $E_B = x_B I$ легко подсчитать. Тогда, если к статору подведено напряжение U , а сила тока в статоре I , то сопротивление статора (в пренебрежении активным сопротивлением статора r) равно:

$$z = \frac{U}{I} = x_s + x_B, \quad (413)$$

откуда

$$x_s = z - x_B = \frac{U}{I} - x_B. \quad (414)$$

Если измерить подведенную при опыте к статору мощность P , то $U = P/I$; тогда

$$x_s + x_B = \sqrt{z^2 - r^2};$$

здесь

$$z = \frac{U}{I}. \quad (415)$$

Индукцию во всех точках внутри статора можно считать, с достаточной точностью, постоянной, поэтому поток рассеяния через расточку статора не зависит от диаметра статора; для трехфазной машины он равен:

$$\Phi_B = 1,125 \frac{m}{p} \omega f_w l_1 I. \quad (416)$$

Отсюда индуктивное сопротивление, соответствующее потоку рассеяния через расточку статора:

$$x_B = \omega \omega f_w \frac{\Phi_B}{\sqrt{2} I} 10^{-8} = 15 \sqrt{\frac{(\omega f_w)^2}{p}} l_1 10^{-8} \text{ омов}; \quad (417)$$

¹⁾ Список литературы к главе XIII, см. § 219.

здесь m — число фаз, p — число пар полюсов, w — число витков в фазе, f_w — коэффициент обмотки, l_1 — полная длина статора в см, I — сила тока в А, $\omega = 2\pi\nu$ — угловая частота тока, ν — частота в пер./сек.

207. Мгновенная переходная реактивность.

Величина мгновенной переходной реактивности в продольной оси x_d'' наряду с синхронной реактивностью x_d , является наиболее существенной для расчета неустановившихся режимов, так как остальные реактивности могут быть вычислены по этим двум. Правильное значение x_d'' может быть найдено расчетом, а из опыта лишь по осциллограммам, снятым при внезапном коротком замыкании машины. Как следует из определения x_d'' , эта реактивность близка к реактивности рассеяния x_s ; при коротком замыкании токи Фуко в зубцах статора и влияние насыщения уменьшают значение x_s до величины x_s' ; рассеяние успокоительной обмотки x_{ds} влияет в сторону увеличения сопротивления:

$$x_d'' = x_s' + x_{ds} \cong x_s \quad (418)$$

Необходимо иметь в виду, что здесь под x_s подразумевается сопротивление исключительно от потоков рассеяния статора. Значения x_d'' по данным разных авторов приведены в табл. IX—XI. Для машин без успокоительных обмоток можно принять $x_d'' = 0,85 x_s'$. Для поперечной оси имеем: для генераторов с цилиндрическим ротором $x_q'' = x_q'$; для генераторов с явно выраженными полюсами с успокоительной обмоткой $x_q'' = 1,3 x_q'$; для генераторов с явно выраженными полюсами без успокоительной обмотки $x_q'' = x_q'$; для синхронных компенсаторов $x_q'' = 1,3 x_q'$; для синхронных двигателей и небольших генераторов с явно выраженными полюсами $x_q'' = 1,1 x_q'$. Опытное определение x_d'' и x_q'' см. § 208.

208. Переходная реактивность.

Переходная реактивность x_d' включает в себя как рассеяние статора, так и рассеяние ротора:

$$x_d' = x_s + x_{ds} + x_{rs}; \quad (419)$$

здесь x_s — рассеяние статора, x_{ds} — рассеяние успокоительной обмотки, x_{rs} — рассеяние обмотки возбуждения. Как показывают опыты, величину x_d' можно принять равной рассеянию статора, включая рассеяние через расточку статора:

$$x_d' = x_s + x_B, \quad (420)$$

поэтому величину x_d' можно определить при вынутом роторе (§ 206). Величина x_d' для генераторов с успокоительной обмоткой равна:

$$x_d' = 2,0 + 1,4 x_q''; \quad (421)$$

здесь x_d' и x_q'' выражены в процентах. Значения x_d' приведены в табл. IX—XI.

Для поперечной оси имеем: для генераторов с цилиндрическим ротором $x_q' = x_q'$; для генераторов с явно выраженными полюсами как с успокоительной обмоткой, так и без нее, $x_q' = x_q'$; для синхронных компенсаторов и синхронных двигателей $x_q' = x_q'$.

Определение переходных реактивностей опытным путем наиболее точно производится по осциллограммам, снятым при внезапном коротком замыкании на зажимах машины. На рис. 279 приведены осциллограммы токов

в трех фазах при трехполюсном коротком замыкании. На каждой осциллограмме проведены пунктирные огибающие кривые и средние, делящие расстояние между огибающими пополам. Начальное значение составляющей постоянного тока равно отрезку, отсекаемому средней кривой на

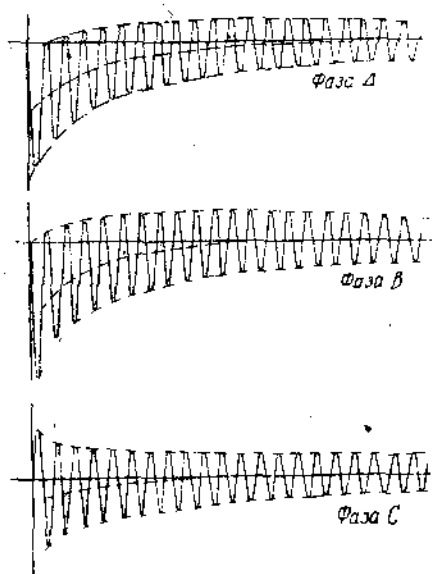


Рис. 279. Осциллограммы тока короткого замыкания.

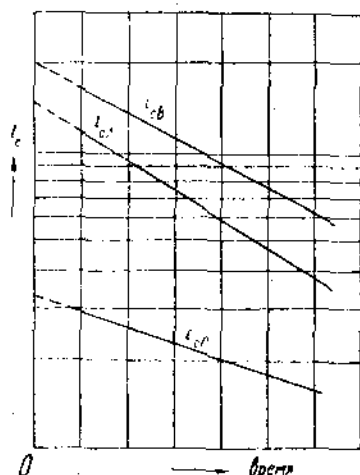


Рис. 280. К определению составляющей постоянного тока.

оси ординат. Для точного определения этого отрезка (средние кривые и огибающие на осциллограммах не доходят до оси ординат) следует нанести средние кривые в логарифмическом масштабе по оси ординат и в линейном по оси абсцисс (рис. 280). При таком масштабе кривые становятся прямыми, вследствие чего их легко продолжить до оси ординат. Для

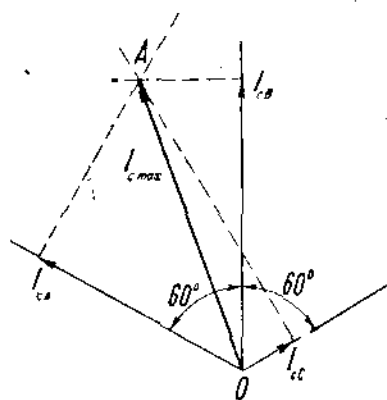


Рис. 281. К определению наибольшего значения составляющей постоянного тока.

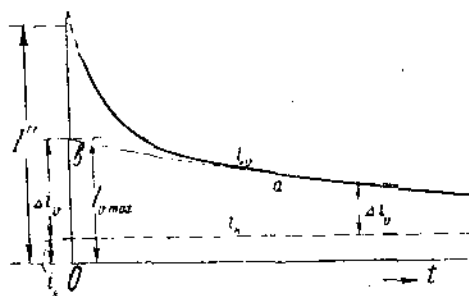


Рис. 282. К определению переходной реактивности.

получения наибольшего значения составляющей постоянного тока, которое получается в той фазе, с которой сцепляется максимальный магнитный поток в начальный момент короткого замыкания, можно воспользоваться построением рис. 281: откладываем начальные значения составляющей постоянного тока в отдельных фазах I_{cA} , I_{cB} , I_{cC} на лучах, сдвину-

тых друг от друга на 60° , причем наибольшее из этих трех значений откладываем на среднем луче. Восстанавливаем перпендикуляры из конца каждого вектора до пересечений их в точке A , тогда вектор OA дает максимальное значение тока $I_{c\max}$. Мгновенная реактивность равна $x_d'' =$

$$= \frac{\sqrt{2} E_0}{I_{c\max}}. \text{ Переходная реактивность } x_d' \text{ определяется по составляющей}$$

переменного тока. Половина расстояния между огибающими кривыми нанесена на рис. 282, причем для большей точности здесь взято среднее значение из всех трех осциллограмм (рис. 279). Проводя прямую ab , продолжающую последнюю часть кривой (начальная, быстро затухающая часть обусловлена уравнивающим током в успокоительной обмотке), по-

лучаем в пересечении с осью ординат ток $I_{v\max}$, откуда $x_d' = \frac{\sqrt{2} E_0}{I_{v\max}}$. По

этой же кривой можно определить и x_d'' , если продолжить кривую до пересечения с осью ординат; отрезок I'' должен равняться отрезку OA (рис. 281). Для более точного определения $I_{v\max}$ следует, подобно предыдущему, построить в логарифмическом масштабе разность Δi_v между установившимся током i_h и i_v и найти пересечение полученной кривой с осью ординат.

Так как опыт внезапного короткого замыкания не всегда осуществим, то для определения переходных реактивностей прибегают иногда к более простым способам, хотя и дающим меньшую точность. Для определения

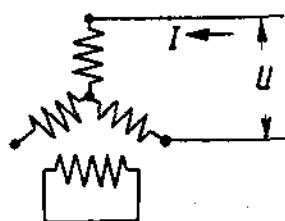


Рис. 283. Схема для определения переходных реактивностей.

x_d'' и x_q'' подводят переменный ток нормальной частоты к двум фазам статора от постороннего источника (рис. 283). Обмотка возбуждения замкнута накоротко и ротор неподвижен. Величина тока в статоре устанавливается около $1/4$ номинального. Поворачивая ротор, находят два положения, соответствующие максимальному и минимальному значениям тока в статоре. Половина частного от деления приложенного напряжения на ток статора дает x_d'' и x_q'' (соответственно максимуму и минимуму тока). Для машин с цилиндрическим ротором эти значения необходимо умножить на эмпирический коэффициент 0,88 для учета насыщения; в машинах с явно выраженными полюсами с успокоительной обмоткой значения x_d'' и x_q'' получаются близкими к значениям в насыщенной машине. При опыте необходимо следить за температурой в роторе.

Этот же опыт в машинах без успокоительной обмотки дает значения x_d' и x_q' (без учета насыщения).

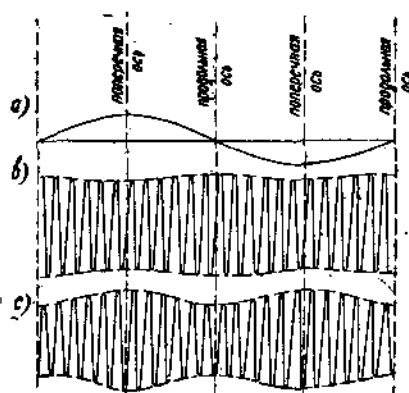


Рис. 284. К определению синхронной реактивности: а) напряжение в обмотке возбуждения; б) напряжение, приложенное к обмотке статора; в) ток в обмотке статора.

Для определения синхронных реактивностей x_d и x_q следует обмотку возбуждения разомкнуть, а ротор вращать с небольшим скольжением. Если подвести ко всем трем фазам статора напряжение нормальной частоты от постороннего источника, равное по величине около $1/4$ номинального, то по статору будет проходить переменный ток, испытывающий пульсации (рис. 284), а в обмотке возбуждения будет индуцироваться э. д. с. скольжения. Тогда x_d и x_q равны частному от деления приложенного к статору напряжения на ток статора для моментов времени, соответствующих прохождению э. д. с. в обмотке возбуждения через нуль (продольная ось) и через максимум (поперечная ось). Значения x_d и x_q соответствуют ненасыщенной машине.

209. Реактивность для токов отрицательной последовательности фаз.

Реактивность x_2 для всех машин может быть определена по формуле:

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}. \quad (422)$$

Значения x_2 приведены в табл. IX—XI. Из опыта x_2 можно определить по методу Фаллу (Fallou), в котором используются характеристики трехполюсного и двухполюсного короткого замыкания. Как указано в § 171, при установившемся трехполюсном коротком замыкании ток равен:

$$I_k = \frac{E_p}{x_d} = \frac{E_p}{x_1}; \quad (423)$$

здесь $x_1 = x_d$ — реактивность в продольной оси для токов положительной последовательности фаз. Обозначим фазную э. д. с. холостого хода, соответствующую току короткого замыкания, равному номинальному $I_k = I_N$, через E_p (рис. 285), тогда

$$I_N x_1 = E_p. \quad (424)$$

При установившемся двухполюсном коротком замыкании ток равен (§ 201):

$$I_{kII} = \frac{\sqrt{3} E_D}{x_1 + x_2}. \quad (425)$$

Обозначим э. д. с. холостого хода в одной фазе, соответствующую току $I_{kII} = I_N$, через E_D , тогда

$$I_N (x_1 + x_2) = \sqrt{3} E_D, \quad (426)$$

отсюда

$$I_N x_2 = \sqrt{3} E_D - E_p = E_{s2}, \quad (427)$$

или

$$x_2 = \frac{E_{s2}}{I_N}. \quad (428)$$

При токе короткого замыкания, равном номинальному I_N , э. д. с. E_D и E_p можно считать прямо пропорциональными току возбуждения, соответственно i_D и i_p (в противном случае следует пользоваться прямолинейной частью характеристики холостого хода). Тогда величина E_{s2} находится из характеристики холостого хода (рис. 285) по току возбужде-

ния $i_{s2} = \sqrt{3} i_D - i_P$, причем токи i_D и i_P определяются из характеристик короткого замыкания, как указано на рис. 285. Если пользуются характеристикой холостого хода, снятой для линейного напряжения, то величину взятой по ней э. д. с. E_{s2} для получения x_2 надо делить на $\sqrt{3} I_N$.

210. Реактивность для токов нулевой последовательности фаз.

Реактивность x_0 для синхронных машин в сильной степени зависит от конструкции обмотки и от укорочения шага (§ 200), причем она может изменяться в пределах $x_0 = 0,15 \div 0,6 x_d''$. Так как в расчетах токов коротких замыканий x_0 всегда входит в комбинации с другими реактивностями, имеющими гораздо большее значение, то ошибка в определении x_0 для синхронных машин мало сказывается на результате. Поэтому можно принимать в расчетах следующие обычно встречающиеся на практике значе-

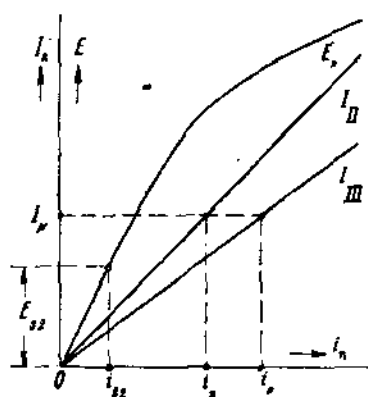


Рис. 285. К определению x_2 по методу Fallou.

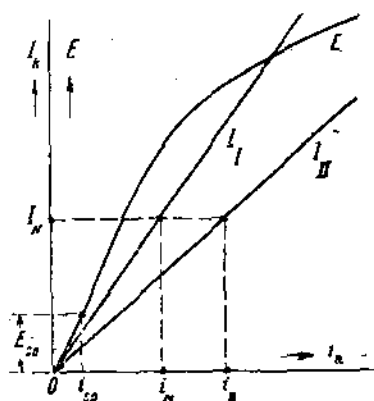


Рис. 286. К определению x_0 по методу Толвинского-Ефремова.

ния x_0 : для генераторов с цилиндрическим ротором $x_0 = 0,5 x_d''$; для генераторов с явно выраженными полюсами с успокоительной обмоткой $x_0 = 0,6 x_d''$; для генераторов с явно выраженными полюсами без успокоительной обмотки $x_0 = 0,5 x_d''$; для синхронных компенсаторов и синхронных двигателей $x_0 = 0,6 x_d''$. Значения x_0 приведены в табл. IX—XI. Опытное определение x_0 можно произвести по методу Толвинского-Ефремова, используя характеристики двухполюсного и однополюсного короткого замыкания. При двухполюсном коротком замыкании имеем (§ 201):

$$I_{KI} = \frac{\sqrt{3} E_0}{x_1 + x_2}, \quad (429)$$

а при однополюсном (§ 202):

$$I_{KI} = \frac{3 E_0}{x_1 + x_2 + x_0}. \quad (430)$$

Обозначая э. д. с., соответствующие номинальному току при двухполюсном и однополюсном коротком замыкании, через E_D и E_M (рис. 286), получаем из уравнений (429) и (430):

$$I_N(x_1 + x_2) = \sqrt{3} E_D; \quad I_N(x_1 + x_2 + x_0) = 3 E_M, \quad (431)$$

отсюда

$$I_N x_0 = 3E_M - \sqrt{3}E_D = E_{s0} \quad (432)$$

или

$$x_0 = \frac{E_{s0}}{I_N} \quad (433)$$

Считая, как в § 209, э. д. с. E_M и E_D пропорциональными току возбуждения i_M и i_D (рис. 286), находим E_{s0} по току $i_{s0} = 3i_M - \sqrt{3}i_D$. Если пользуются характеристикой холостого хода, снятой для линейного напряжения, то величину взятой по ней э. д. с. E_{s0} для получения x_0 надо делить на $\sqrt{3}I_N$.¹⁾

Таблица IX.

Реактивности синхронных машин, выраженные в относительных единицах (по данным S. H. Wright'a).

Тип машины		x_d	x_q	x_d'	x_d''	x_2	x_0
1. Двухполюсные турбогенераторы .	Среднее	1,10	1,07	0,15	0,09	—	—
	Пределы	0,95—1,45	0,92—1,42	0,12—0,21	0,07—0,14	$\approx x_d''$	0,01—0,08
2. Четырехполюсные турбогенераторы .	Среднее	1,10	1,08	0,23	0,14	—	—
	Пределы	1,00—1,45	0,97—1,42	0,20—0,28	0,12—0,17	$\approx x_d''$	0,01—0,14
3. Генераторы и двигатели с явно выраженными полюсами и с успок. обм.	Среднее	1,15	0,75	0,37	0,24	0,24	—
	Пределы	0,60—1,45	0,40—1,00	0,20—0,50	0,13—0,35	0,13—0,35	0,02—0,20
4. Генераторы с явно выраженными полюсами без успок. обм.	Среднее	1,15	0,75	0,35	—	0,55	—
	Пределы	0,60—1,45	0,40—0,95	0,20—0,45	$\approx x_d'$	0,30—0,70	0,04—0,25
5. Синхронные компенсаторы	Среднее	1,80	1,15	0,40	0,25	0,24	—
	Пределы	1,50—2,20	0,95—1,40	0,30—0,60	0,18—0,38	0,17—0,37	0,02—0,15

Примечания: 1. x_0 изменяется настолько сильно в зависимости от укорочения шага, что среднее значение дать затруднительно. Значения x_0 лежат в пределах $0,1 \div 0,7x_d''$. По данным W. C. Nahl'a и C. F. Wagner'a средние значения x_0 : для турбогенераторов — 0,03; для машин с явно выраженными полюсами с успокоительными обмотками — 0,06; для гидрогенераторов без успокоительной обмотки — 0,07; для компенсаторов — 0,08.

2. По W. C. Nahl'u и C. F. Wagner'u для гидрогенераторов без успокоительной обмотки $x_d'' \approx 0,85x_d'$ (с учетом насыщения).

3. По W. C. Nahl'u и C. F. Wagner'u для турбогенераторов и машин с явно выраженными полюсами с успокоительной обмоткой $x_d' \approx 0,02 + 0,014x_d''$ (с учетом насыщения).

¹⁾ Для определения x_s Капп (Карр) предложил использовать характеристики трехполюсного и однополюсного короткого замыкания, причем x_s определяется по э. д. с. $E_s = \frac{1}{2}(3E_M - E_P)$, которая соответствует току возбуждения $i_s = \frac{1}{2}(3i_M - i_P)$; здесь E_P и i_P — э. д. с. и ток возбуждения при трехполюсном коротком замыкании (§ 209). Сравнивая величину E_s с уравнениями (427) и (432) не трудно видеть, что в действительности по методу Каппа определяется величина $\frac{x_2 + x_0}{2}$.

Таблица X.

Реактивности синхронных машин, выраженные в относительных единицах
(по данным R. H. Park'a и B. L. Robertson'a).

Тип машины		x_d	x_q	x_d'	x_q'	x_d''	x_q''	x_2	x_0
1. Турбогенераторы с сплошным ротором	Среднее	1,15	1,0	—	—	—	—	—	—
	Пределы	—	—	0,15—0,25	0,15—0,25	0,08—0,15	0,10—0,20	0,08—0,13	0,01—0,08
2. Турбогенераторы с пластинчатым ротором	Среднее	1,15	1,0	—	1,0	—	—	—	—
	Пределы	—	—	0,15—0,25	—	0,08—0,12	0,20—0,30	0,11—0,21	0,01—0,08
3. Гидрогенераторы	Среднее	1,0	0,65	0,35	0,65	0,22	0,65	0,45	—
	Пределы	0,60—1,25	0,40—0,80	0,20—0,45	0,40—0,80	0,15—0,35	0,40—0,80	0,25—0,60	0,02—0,21
4. Быстроходные синхронные двигатели	Среднее	0,80	0,65	0,25	0,65	0,18	0,20	0,19	—
	Пределы	0,65—0,90	0,50—0,70	0,15—0,35	0,50—0,70	0,10—0,25	0,12—0,30	0,11—0,25	0,02—0,15
5. Тяжелоходные синхронные двигатели	Среднее	1,10	0,80	0,50	0,80	0,35	0,40	0,35	—
	Пределы	0,80—1,50	0,60—1,10	0,40—0,70	0,60—1,10	0,25—0,45	0,30—0,50	0,25—0,50	0,04—0,27
6. Синхронные компенсаторы	Среднее	1,60	1,00	—	1,00	—	—	—	—
	Пределы	—	—	0,40—0,50	—	0,25—0,30	0,25—0,35	0,25—0,32	0,04—0,10

Примечание. x_0 изменяется в пределах 0,15 ÷ 0,60 x_d'' в зависимости от укорочения шага.

Таблица XI.

Расчетные значения реактивности турбогенераторов новой серии 1933 г. завода „Электросила“, выраженные в относительных единицах.

Мощность кВА	Напряжение В	x_d	x_d'	x_d''	x_2	x_0	$f_{\text{кз}}$
7500	6300	1,81	0,20	0,12	0,15	0,042	0,69
15000	6300	1,84	0,21	0,12	0,15	0,051	0,64
15000	10500	2,05	0,23	0,14	0,17	0,044	0,60
31250	6300	1,83	0,22	0,12	0,16	0,056	0,64
31250	10500	1,69	0,20	0,12	0,15	0,042	0,68
58900	10500	1,68	0,20	0,11	0,14	0,056	0,65
55500	10500	1,41	0,23	0,13	0,16	0,069	0,76

Примечание. $f_{\text{кз}}$ — кратность тока короткого замыкания при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению при холостом ходе (§ 217).

211. Активное сопротивление обмотки статора.

В машинах переменного тока необходимо различать:

1. Омическое сопротивление обмотки r_g , т. е. сопротивление ее постоянному току:

$$r_g = \rho \frac{l}{s} = \frac{Q_{\text{суг}}}{I_g^2} \text{ ом;} \quad (434)$$

здесь ρ — удельное сопротивление в $\Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, l — длина обмотки в м, s — поперечное сечение проводников в мм^2 , $Q_{\text{суг}}$ — потери в ваттах на джоулев эффект в обмотке при прохождении по ней постоянного тока, I_g — сила тока в амперах; подставляя вместо l его значение, получаем

$$r_g = \rho \frac{wl_s}{cs}, \quad (435)$$

где w — число последовательно соединенных витков в одной фазе, l_s — длина витка, c — число параллельных ветвей.

2. Активное сопротивление обмотки r , т. е. сопротивление ее переменному току:

$$r = \frac{Q_{Cu}}{I^2} = kr_g \text{ омов,} \quad (436)$$

где Q_{Cu} — потери в ваттах в обмотке при прохождении по ней переменного тока, I — действующее значение переменного тока в амперах; вследствие появления в обмотке при переменном токе добавочных потерь от токов Фуко при одинаковых действующих значениях $I = I_g$ всегда $Q_{Cu} > Q_{Cu_g}$ а следовательно, $r > r_g$, $k > 1$.

3. Действующее сопротивление обмотки r_e ; токи Фуко в действительности появляются не только в проводниках обмотки, но и в окружающих ее металлических частях (нажимные плиты, крепления лобовых соединений и т. д.); учитывая потери, создаваемые ими, получаем полные потери Q_w , вызываемые переменным током, чему соответствует сопротивление

$$r_e = \frac{Q_w}{I^2}, \quad (437)$$

так как $Q_w > Q_{Cu}$, то имеем $r_e > r > r_g$.

Появление токов Фуко в проводниках вызывается потоком рассеяния, проходящим поперек впадины и пересекающим проводник. Величина индукции, создаваемой током, проходящим по проводнику, равна:

$$B_x = 0,4 \pi \frac{bx}{a} j; \quad (438)$$

здесь B_x — индукция на высоте x , от основания проводника, b — общая ширина меди во впадине, a — ширина впадины, j — плотность тока. Таким образом, если ток распределен по сечению проводника равномерно, то индукция потока рассеяния изменяется по высоте впадины по прямой линии (рис. 287, а). Э.д.с., индуцированная в каком-либо элементарном сечении ds проводника, пропорциональна потоку, сцепляющемуся с этим сечением, т. е. пропорциональна площади кривой индукции, расположенной над элементом ds . Если индукция по высоте проводника изменяется по прямой линии, то величина э.д.с., индуцированной в разных слоях по высоте проводника, изменяется по параболе (рис. 287, б). Из последнего рисунка видно, что э.д.с., вызываемая потоком рассеяния в элементах проводника сверху впадины и внизу, направлена в одну сторону, но не одинакова по величине. Разность э.д.с. ΔE между сечениями ds_1 и ds_2 создает между ними ток, идущий вверх проводника (по сечению ds_1) в том же направлении, что и рабочий ток, и возвращающийся по сечению ds_2 внизу проводника. Вследствие этого общая плотность тока по сечению проводника распределена неравномерно (рис. 287, в). Если во впадину уложен ряд проводников один над другим, то токи Фуко в верхних проводниках больше, чем в нижних, так как разность э.д.с. ΔE в верхних проводниках больше, чем в нижних (рис. 287, б). Из той же кривой видно, что разность э.д.с. тем меньше, чем меньше высота отдельного проводника. Кроме токов Фуко в активных частях обмотки, вызываемых потоком рассеяния впадин, имеются токи Фуко в лобовых соединениях, создаваемые потоком рассеяния лобовых частей обмотки.

Вследствие вызванного токами Фуко неравномерного распределения тока по сечению проводника потери в нем и нагревание его увеличиваются, что эквивалентно увеличению сопротивления проводника при переменном токе по сравнению с сопротивлением его при постоянном токе. Так как нагревание окружающих обмотку металлических частей,

в которых тоже появляются токи Фуко, вследствие значительного удаления этих частей от обмотки, не влияет на нагревание самой обмотки, то обычно при расчете потерь в обмотке пользуются активным сопротивлением r . Потери от токов Фуко в окружающих обмотку частях учитывают отдельно в форме добавочных потерь, так как подсчет эффективного сопротивления r_e затруднителен.

Активное сопротивление подсчитывают по приведенной выше формуле:

$$r = k r_g; \quad (436a)$$

здесь r_g — омическое сопротивление, а k — коэффициент Фильда, названный так вследствие того, что впервые формулы для подсчета его были даны А. В. Field'ом. Величина k в среднем по Е. Arnold'у равна для машин с цилиндрическим ротором: однофазных $1,4 \div 2,0$, трехфазных $1,2 \div 1,5$; для машин с явно выраженными полюсами: однофазных $1,5 \div 2,5$, трехфазных $1,3 \div 2,0$. Эти значения коэффициента k частично учитывают и добавочные потери. О подсчете коэффициента Фильда см. литературу, приведенную

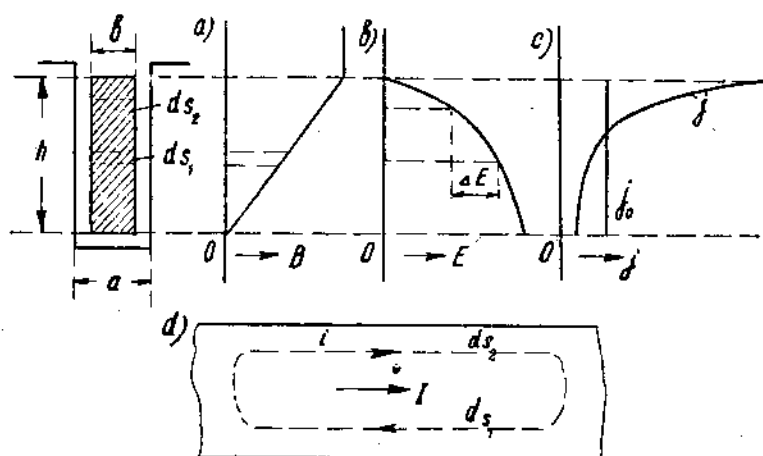


Рис. 287. Распределение индукции потока рассеяния (а), э. д. с. (б), плотности тока (с) по высоте впадины и протекание токов Фуко i по проводнику (д).

в § 219 под номерами 4, 5, 8, 14, 15. Коэффициент Фильда тем больше, чем больше сечение проводника, поэтому принимать в расчет его необходимо, главным образом, в машинах большой мощности. При этом если высота проводника больше так называемой критической высоты h_k , то возрастание коэффициента k происходит быстрее, чем возрастание площади сечения проводника при увеличении высоты h . Поэтому при высоте проводника $h > h_k$ нельзя добиться уменьшения активного сопротивления r увеличением сечения проводника посредством увеличения h ; наоборот, r при этом будет увеличиваться. Для уменьшения коэффициента Фильда применяют специальные конструкции проводников.

Как видно из рис. 287, появление токов Фуко в проводниках обусловлено разностью э. д. с. ΔE , индуктированных потоком рассеяния в верхнем и нижнем слоях проводника. Поэтому наиболее простым средством для уменьшения токов Фуко является расслоение сплошного проводника по высоте впадины на ряд невысоких проводников, изолированных друг от друга; однако, в местах прикрепления лобовых соединений отдельные проводники необходимо спаивать вместе, вследствие чего токи Фуко

замыкаются через места спаев. Хотя сопротивление токам Фуко при этой конструкции и увеличивается, но окончательно избавиться от них нельзя. Более действительным средством является так называемая транспозиция проводников. Расслоенные и изолированные друг от друга по всей длине обмотки проводники соединяются друг с другом последовательно или параллельно так, чтобы суммарная э.д.с., вызванная потоком рассеяния по всей длине обмотки, была бы равна нулю. Для этого каждый проводник должен занимать последовательно все положения по высоте впадины, что достигается транспозицией (переставлением) проводников. На рис. 288 представлена обмотка с 4 проводниками во впадине; вследствие транспозиции (последняя производится в лобовых частях) каждый проводник занимает последовательно четыре положения по высоте впадины. Благодаря этому токи Фуко могут замыкаться лишь по высоте отдельных проводников, причем вследствие малой высоты проводника величина их незначительна. Эти проводники можно по концам соединить параллельно (рис. 288) или последовательно. На рис. 289 представлен проводник (стержень) конструкции фирмы В.В.С. Здесь весь стержень разбит на большое число изолированных друг от друга проводничков, перевитых по длине стержня, лежащей во впадине, таким образом, что каждый проводничок занимает все места по высоте впадины. Эта конструкция более сложна, чем транспозиция в лобовых частях, но технически гораздо совершеннее и уничтожает токи Фуко почти до нуля. Коэффициент Фильда для таких проводников $< 1,1$.

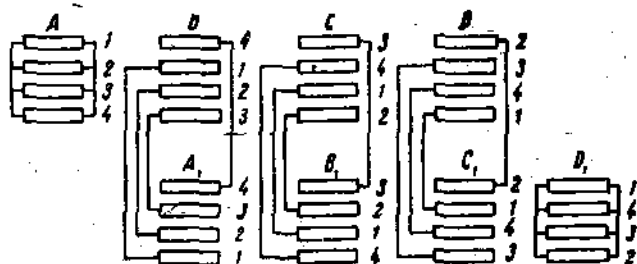


Рис. 288. Транспозиция проводников.

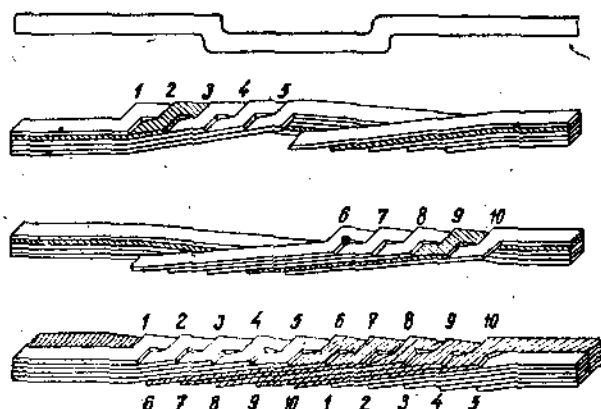


Рис. 289. Проводник конструкции фирмы Brown, Boveri Co.

соединить параллельно (рис. 288) или последовательно. На рис. 289 представлен проводник (стержень) конструкции фирмы В.В.С. Здесь весь стержень разбит на большое число изолированных друг от друга проводничков, перевитых по длине стержня, лежащей во впадине, таким образом, что каждый проводничок занимает все места по высоте впадины. Эта конструкция более сложна, чем транспозиция в лобовых частях, но технически гораздо совершеннее и уничтожает токи Фуко почти до нуля. Коэффициент Фильда для таких проводников $< 1,1$.

Процентные значения омического сопротивления, приведенного к 75°C , турбогенераторов завода „Электросила“, равны:

Мощность	0,75	1	1,5	2,5	4	6	12	24	50	MW
Сопротивление . . .	1,02	0,63	0,68	0,45	0,37	0,29	0,19	0,19	0,20	%

212. Постоянная времени обмотки статора.

Постоянная времени обмотки статора T_a характеризует затухание неподвижного в пространстве потока статора Ψ_c , создаваемого постоянной составляющей тока короткого замыкания i_c . Величина T_a представляет

собой время в секундах, за которое ток i_c достигает величины $\frac{1}{e} = 0,368$ своего начального значения, что следует из формулы $i_c = I_{\text{сmax}} e^{-t/T_a}$, полагая $t = T_a$, получаем $i_c = I_{\text{сmax}}/e = 0,368 I_{\text{сmax}}$. Выше (§ 179) уже было указано, что при коротком замыкании на зажимах машины $T_a = L/r_g$. Заменяя L через $x_s/\omega = x_s/2\pi\nu$, получаем

$$T_a = \frac{1}{2\pi\nu} \frac{x_s}{r_g}. \quad (439)$$

Это выражение точно лишь для машин с совершенной успокоительной обмоткой. В машинах с несимметричной успокоительной обмоткой или совсем без нее для поддержания неподвижного в пространстве потока Ψ_c требуется разная величина тока: большая, когда ось полюсов стоит против оси фазной обмотки, и меньшая, когда ось полюсов перпенди-

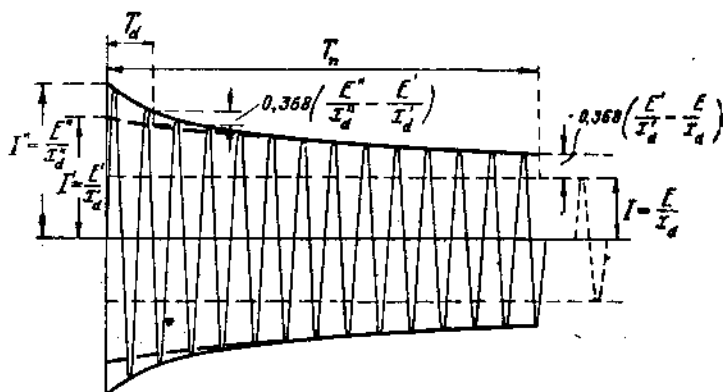


Рис. 290. Определение постоянных времени.

кулярна к оси обмотки (§ 179). Такое изменение составляющей постоянного тока равносильно изменению сопротивления рассеяния x_s от величины x_d'' до x_q'' , соответственно чему должна изменяться, очевидно, и постоянная времени T_a , так как r_g остается постоянным. Среднее значение T_a при трехполюсном коротком замыкании равно:

$$T_a = \frac{1}{2\pi\nu} \frac{x_2}{r_g}, \quad (440)$$

где $x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}$ — реактивность для тока отрицательной последовательности фаз. То же самое выражение имеем и при двухполюсном коротком замыкании. При однополюсном коротком замыкании вместо x_s следует брать x_{sl} . Последнее по уравнению (385) равно:

$$x_{sl} = \frac{2x_s + x_0}{3} = \frac{2x_1 + x_0}{3}; \quad (441)$$

отсюда, при однополюсном коротком замыкании

$$T_a = \frac{1}{2\pi\nu} \frac{2x_1 + x_0}{3r_g}. \quad (442)$$

Значения T_a при трехполюсном коротком замыкании на зажимах машины могут изменяться в пределах 0,04 ÷ 0,5 (см. табл. XII — XIII). При вычислении декрементных кривых (§ 188) принято $T_a = 0,15$ сек. Нормы V.D.E.

принимают $T_a \approx 0,10$ сек. При коротком замыкании в сети к сопротивлениям обмотки машины x_s и r_s надо прибавлять сопротивления от генератора до точки короткого замыкания. Опытное определение T_a можно произвести по осциллограммам, снятым при внезапном коротком замыкании на зажимах машины, путем измерения времени, соответствующего уменьшению составляющей постоянного тока до 0,368 от начального значения (рис. 290). О других методах определения T_a см. указанную в § 219 статью S. H. Wright'a.

213. Постоянная времени обмотки возбуждения.

Постоянная времени обмотки возбуждения T_a характеризует затухание составляющей постоянного тока в обмотке возбуждения, а следовательно, и составляющей переменного тока короткого замыкания в статоре i_s (§ 179; T_a представляет собою время в секундах, за которое амплитуда тока i_s уменьшается до 0,368 своего начального значения (ср. § 212). По общей формуле T_a равно:

$$T_a = \frac{L_a}{r_a}, \quad (443)$$

где L_a — коэффициент самоиндукции, а r_a — омическое сопротивление обмотки возбуждения. Величина L_a зависит от магнитного сопротивления для потока обмотки возбуждения. При холостом ходе машины, когда обмотка статора разомкнута и по обмотке возбуждения проходит ток i_n , поток обмотки возбуждения проходит почти исключительно по железу, вследствие чего имеем большое значение L_{n0} и соответствующее ему

$$T_{n0} = \frac{L_{n0}}{r_n}, \quad (444)$$

величина T_{n0} , очевидно, зависит от насыщения, но при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению, есть величина постоянная для данной машины; значения ее приведены в табл. XII — XIII. При коротком замыкании уравнительные токи статора оттесняют поток обмотки возбуждения в междужелезное пространство, вследствие чего L_a значительно уменьшается, а вместе с ним уменьшается и T_a . Пренебрегая составляющей переменного тока в обмотке возбуждения, получаем наибольшее значение тока в обмотке возбуждения при коротком замыкании (§ 189):

$$i_n = \frac{x_d}{x_d'} \frac{x_d'}{x_d} i_n + i_n = \frac{x_d}{x_d'} i_n; \quad (445)$$

этот ток в отношении x_d/x_d' больше тока нормального режима i_n . Можно считать, что в этом же отношении изменяется и сопротивление для магнитного потока обмотки возбуждения, а следовательно:

$$\frac{L_{a0}}{L_a} = \frac{x_d}{x_d'}, \quad (446)$$

откуда постоянная времени обмотки возбуждения при трехполюсном коротком замыкании на зажимах машины равна:

$$T_a = \frac{L_a}{r_n} = \frac{L_{a0}}{r_n} \frac{x_d'}{x_d} = \frac{x_d'}{x_d} T_{n0}. \quad (447)$$

По этой формуле и вычисляют T_a , пользуясь для T_{n0} данными табл. XII — XIII или определяя T_{n0} из опыта. Значения T_a приведены в табл. XII. Если короткое замыкание происходит в сети с сопротивлением x_c от генератора до точки аварии, то

$$T_a = \frac{x_d' + x_c}{x_d + x_c} T_{n0}. \quad (448)$$

При двухполюсном коротком замыкании на зажимах машины имеем:

$$T_n = \frac{x_d' + x_2}{x_d + x_2} T_{n0}; \quad (447a)$$

при однополюсном:

$$T_n = \frac{x_d' + x_2 + x_0}{x_d + x_2 + x_0} T_{n0}. \quad (447b)$$

214. Постоянная времени успокоительной обмотки.

Постоянная времени успокоительной обмотки T_d очень невелика, поэтому в большинстве случаев переходными явлениями в успокоительной обмотке пренебрегают, учитывая их влияние лишь при вычислении ударного тока. При вычислении декрементных кривых (§ 188) принято $T_d = 0,05$ сек. Значения T_d см. табл. XII.

Таблица XII.

Постоянные времени обмоток в секундах
(по данным S. H. Wright'a).

Тип машины		T_{n0}	T_n	T_d	T_a
Двухполюсные турбогенераторы . .	Среднее	4,4	0,6	0,035	0,09
	Пределы	2,8 — 6,2	0,35 — 0,90	0,02 — 0,05	0,04 — 0,15
Четырехполюсные турбогенераторы.	Среднее	6,2	1,3	0,035	0,2
	Пределы	4,0 — 9,2	0,8 — 1,8	0,02 — 0,05	0,15 — 0,35
Генераторы и двигатели с явно выраж. полюсами и с успокоит. обмоткой	Среднее	5,6	1,8	0,035	0,15
	Пределы	1,5 — 9,5	0,5 — 3,3	0,01 — 0,05	0,03 — 0,25
Генераторы с явно выраж. полюсами без успокоит. обмотки . .	Среднее	6,6	2,0	—	0,30
	Пределы	3,0 — 10,5	1,0 — 3,3	—	0,1 — 0,5
Синхронные компенсаторы	Среднее	9,0	2,0	0,035	0,17
	Пределы	6,0 — 11,5	1,2 — 2,8	0,02 — 0,05	0,1 — 0,3

Примечания: 1. T_{n0} — постоянная времени обмотки возбуждения при холостом ходе (п. и разомкнутой обмотке статора); T_n — то же, при внезапном коротком замыкании на зажимах обмотки статора.

2. Для однофазных машин (или для трехфазных, работающих в качестве однофазных) T_d может иметь гораздо большие значения, чем указано.

3. По данным R. H. Park'a и B. L. Robertson'a T_{n0} равно для турбогенераторов 4 — 7, для гидрогенераторов 3 — 6, для двигателей 2 — 4, для компенсаторов 5 — 7.

Таблица XIII.

Расчетные значения постоянных времени обмоток в секундах
турбогенераторов новой серии 1933 г. завода „Электросила“.

Мощность kVA	Напряжение V	T_{n0}	T_n	T_{n1}	T_{n1}	T_d	T_a	T_{a1}
7500	6300	6,45	0,71	1,16	1,98	0,089	0,076	0,054
15000	6300	7,7	0,88	1,42	1,56	0,11	0,11	0,075
15000	10500	7,9	0,88	1,13	1,96	0,11	0,095	0,07
31250	6300	9,3	1,11	1,77	2,12	0,14	0,13	0,10
31250	10500	9,75	1,15	1,85	2,08	0,14	0,12	0,09
58900	10500	10,5	1,28	2,00	2,25	0,16	0,11	0,091
55500	10500	7,45	1,24	1,89	2,22	0,16	0,12	0,099

Примечание. T_{n2} и T_{n1} — постоянные времени обмотки возбуждения при двухполюсном и однополюсном коротком замыкании на зажимах.

215. Ампер-витки реакции якоря.

Ампер-витки реакции якоря AW_a определяют опытным путем по характеристике холостого хода и нагрузочной при $\cos \varphi = 0$ при помощи построения треугольника Потье (§ 205): сторона MP треугольника (рис. 278) представляет собою ампер-витки AW_a . Можно определить AW_a по характеристике короткого замыкания (рис. 278). Ампер-витки AW_k соответствующие току короткого замыкания, равному $I_k = I_N$, равны:

$$AW_k = AW_k + AW_a, \quad (449)$$

где AW_k — ампер-витки, соответствующие э. д. с. рассеяния E_s , находят из характеристики холостого хода по величине $E_s = I_N x_s$ (если характеристика холостого хода снята для линейного напряжения, то по величине $\sqrt{3} I_N x_s$). Величина x_{ad} соответствующая прямолинейной части характеристики холостого хода, включает в себя сопротивление x_{ad} которое прямо пропорционально AW_a (§ 92): $x_d = x_{ad} + x_s$.

216. Нормальная характеристика холостого хода.

В тех случаях, когда неизвестна характеристика холостого хода генератора, пользуются обычно нормальной характеристикой холостого хода, построенной в относительных единицах. Как показала практика, действительные характеристики холостого хода, построенные в относительных единицах, для всех машин почти совпадают, что и позволяет пользоваться в расчетах средней нормальной характеристикой.

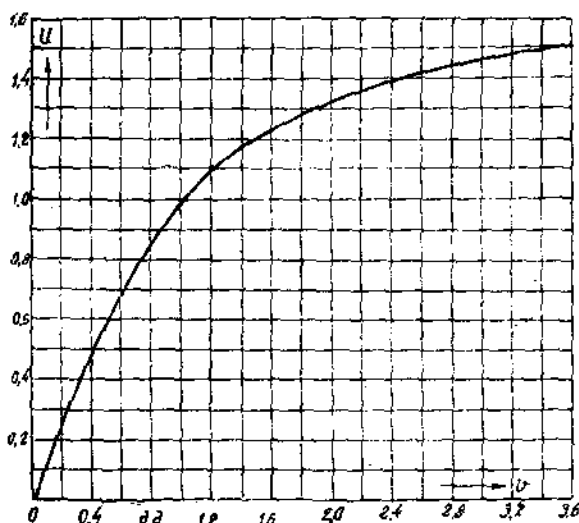


Рис. 291. Нормальная характеристика холостого хода, даваемая нормами V. D. E.

На рис. 291 приведена нормальная характеристика, даваемая нормами V. D. E. По оси абсцисс отложено относительное возбуждение u — отношение данного тока возбуждения к возбуждению, соответствующему при холостом ходе номинальному напряжению на зажимах. На оси ординат отложено относительное напряжение u — отношение данного напряжения

к номинальному. На рис. 292 приведена характеристика холостого хода, принятая при вычислении американских стандартных декрементных кривых (§ 188). Так как в американской практике обычно пользуются прямолинейной частью характеристики холостого хода, то относительное воз-

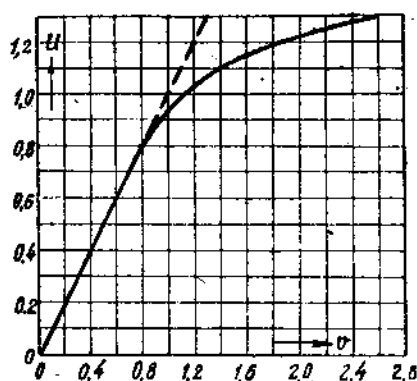


Рис. 292. Стандартная характеристика холостого хода, принятая при вычислении американских декрементных кривых.

буждение $v=1$ соответствует относительному напряжению $u=1$, отложенному на прямолинейной части характеристики (пунктирная линия). Для генераторов, изготовленных в СССР, можно пользоваться характеристикой V.D.E.¹⁾

217. Кратность тока короткого замыкания.

Кратность тока короткого замыкания, т. е. отношение установившегося тока трехполюсного короткого замыкания I_{k0} при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению при холостом ходе машины, к номинальному току I_N :

$$f_{k0} = \frac{I_{k0}}{I_N} \quad (450)$$

лежит для всех машин в узких пределах. В среднем для турбогенераторов большой мощности $f_{k0} = 0,7 \div 1,0$, для генераторов с явно выраженными полюсами и для турбогенераторов средней мощности $f_{k0} = 0,8 \div 1,2$. В машинах старой конструкции f_{k0} значительно больше. В нормах V.D.E. принято для современных турбогенераторов $f_{k0} = 0,7$; для машин с явно выраженными полюсами $f_{k0} = 0,8$. Значения f_{k0} см. табл. V (§ 79) и XI (§ 210).

218. Момент инерции вращающихся частей и маховой момент.

Момент инерции вращающегося тела равен:

$$J = \int r^2 dm, \quad (451)$$

¹⁾ А. Е. Алексеев и Р. А. Лютер. Синхронные машины для мощных районных систем. Э. 1931, стр. 664.

где dm — масса в $\text{кг} \times \text{сек.}^2/\text{м}$ элементарного объема тела, а r — расстояние в м этого объема от оси вращения;¹⁾ таким образом, J выражается в $\text{кгм} \times \text{сек.}^2$. Так как масса равна:

$$dm = \frac{dG}{g}, \quad (452)$$

где dG — вес в кг элементарного объема тела, а $g = 9,81 \text{ м/сек.}^2$ — ускорение силы тяжести, то

$$J = \int r^2 \frac{dG}{g} = \frac{GR^2}{g} = \frac{GD^2}{4g}, \quad (453)$$

где R — так называемый радиус инерции в м , D — диаметр инерции в м , а G — вес всего вращающегося тела в кг . Момент инерции J определяет собою приращение скорости ротора, вызванное приращением вращающего момента M :

$$M = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (454)$$

откуда

$$\Delta\Omega = \frac{1}{J} \int M dt. \quad (455)$$

При расчетах устойчивости параллельной работы систем обычно выражают все величины в относительных единицах, т. е. в долях от номинальных; в этом случае нет необходимости знать абсолютные значения сопротивлений, скоростей, вращающих моментов и пр., которые установить для генераторов в проектируемой установке затруднительно; значения же этих параметров, выраженные в относительных единицах, в среднем, одинаковы для всех машин. Обозначим относительное приращение скорости и вращающего момента через

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_N}; \quad m = \frac{M}{M_N}; \quad (456)$$

тогда уравнение (455) можно написать в виде:

$$\Delta\omega \Omega_N = \frac{1}{J} \int m M_N dt \quad (457)$$

или

$$\Delta\omega = \frac{M_N}{J\Omega_N} \int m dt = \frac{1}{J_0} \int m dt; \quad (458)$$

здесь J_0 — момент инерции в относительных единицах, называемый в американской литературе постоянной инерции (per unit inertia constant).

Величина J_0 равна:

$$J_0 = \frac{J\Omega_N}{M_N} = \frac{9,81 J\Omega_N}{P_N} 10^{-3} = \frac{2,73 GD^2 \pi^2}{P_N} 10^{-6}; \quad (459)$$

здесь P_N — номинальная мощность генератора в kW , n — синхронная скорость вращения в об./мин. Величина J_0 выражается в секундах. Так как кинетическая энергия вращающегося тела равна:

$$A = \frac{1}{2} J\Omega_N^2 = 9,81 \times 10^{-3} \text{ kW} \times \text{сек.}, \quad (460)$$

то

$$J_0 = \frac{2A}{P_N}. \quad (461)$$

Постоянная инерции J_0 равна времени t , которое требуется, чтобы довести ротор от покоя до номинальной скорости под действием номинального вращающего момента M_N . Действительно (по уравнению 454),

имеем

$$M dt = J d\Omega; \quad (462)$$

¹⁾ И. В. Мещерский. Курс теоретической механики, ч. 2. Ленинград, 1924.

подставляя вместо M величину M_N и интегрируя в пределах от $\Omega = 0$ до $\Omega = \Omega_N$, получаем

$$M_N \int dt = J \int_0^{\Omega_N} d\Omega; \quad M_N t = J \Omega_N, \quad (463)$$

отсюда

$$t = \frac{J \Omega_N}{M_N} = J_0. \quad (464)$$

Значения постоянной инерции приведены в табл. XIV и XV.

Маховой момент для гидрогенераторов по данным американской практики¹⁾ можно вычислить по формуле:

$$GD^2 = k \left(\frac{60}{n} \right)^2 P_{kVA} \text{ тонн} \times \text{метр}^2; \quad (465)$$

здесь n — число оборотов в минуту, P_{kVA} — мощность в kVA, $k = 0,5$ для быстроходных машин ($n > 214$ об./мин.), $k = 0,75$ для тихоходных машин.

Для турбогенераторов модернизированной серии завода „Электросила“ имеем

$P = 0,75$	1	1,5	2,5	4	6	12	24	50 MW
$GD^2 = 0,15$	0,21	0,31	0,72	0,84	1,8	4,0	7,68	46,5 т.м ²

Таблица XIV.

Постоянная инерции J_0 в секундах.

Тип машины	Постоян. инерции по данным:	
	R. H. Park'a и E. H. Bunker'a	R. D. Evans'a и C. P. Wagner'a.
Турбогенераторы	16,0	21,9*
Гидрогенераторы	6,0	4,8**
Синхронные двигатели	4,5	—
Синхронные компенсаторы	3,0	2,95

Примечания: * Из полного значения постоянной инерции на генератор приходится 10,6, на турбину — 11,3.

** Момент инерции турбины составляет 10% — 20% от момента инерции генератора.

Таблица XV.

Постоянная инерции J_0 (в секундах) для турбогенераторов
(по данным К. Kuhn'a).

а) Скорость вращения 3000 об./мин.

Мощность	32,0	30,6	29,6	27,5	27,5	MVA
Cos φ	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	
Пост. инерции	12,1	14,5	14,8	15,6	16,2	сек.

б) Скорость вращения 1500 об./мин.

Мощность	50,0	50,0	50,0	25,0	25,0	25,0 MVA
Cos φ	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Пост. инерции	24,0	28,3	37,5	12,6	25,9	23,0 сек.

¹⁾ А. Е. Алексеев и Р. А. Лютер. Синхронные машины для мощных районных систем. Э. 1931, стр. 604 и Сборник „Вопросы электропередач больших мощностей на большие расстояния“. Ленинград, 1932, стр. 156.

219. Указатель литературы к главе XIII.

1. Alger P. L. The Calculation of the Armature Reactance of Synchronous Machines. Tr. A. I. E. E., апрель 1928, стр. 493.
2. Evans R. D. and Wagner C. F. Studies of Transmission Stability. Tr. A. I. E. E. 1926, стр. 51.
3. Fallou J. A propos de la mesure de réactance de dispersion des alternateurs triphasés. R. G. E. 8 октября 1927, стр. 543.
4. Field A. B. Eddy-Currents in Large Slot-Wound Conductors. Pr. A. I. E. E., 1905, стр. 659.
5. Frontal Leakage Field and Additional Losses in the Ends of Coils of Turbo-Generators. Bull. Oerlikon, январь-февраль 1928, № 79/80.
6. Hahn W. C. and Wagner C. F. Standard Decrement Curves. Tr. A. I. E. E., июнь 1932, стр. 353.
7. Hanna W. M. Uses of Synchronous Machine Quantities in System Studies. G. E. R. 1933, стр. 116.
8. H. C. Sur les pertes supplémentaires dans le cuivre des machines à courant alternatif. R. G. E. 3 ноября 1917, стр. 687.
9. Kilgore L. A. Calculation of Synchronous Machine Constants—Reactances and Time Constants Affecting Transient Characteristics. Tr. A. I. E. E., декабрь 1931, стр. 1201.
10. Kühn K. Versuche über Maschinenregelung und Parallelbetrieb in den Grosskraftwerken Hirschfelde und Böhlen. E. T. Z., 1931, стр. 1185.
11. Park R. H. and Bancker E. H. System Stability as a Design Problem. Tr. A. I. E. E., январь 1929, стр. 170.
12. Park R. H. and Robertson B. L. The Reactances of Synchronous Machines. Tr. A. I. E. E., апрель 1928, стр. 514.
13. Pohl R. Vorgänge beim Kurzschluss eines Synchrongenerators. E. T. Z., 1933, стр. 127.
14. Richter R. Elektrische Maschinen, Berlin, т. I, 1924 г.; т. II, 1930 г.
15. Roth E. Etude sur les pertes supplémentaires dans les barres cablées. R. G. E., 1917; т. II, стр. 323.
16. Shildneck L. P. Synchronous Machine Reactances. A Fundamental and Physical Viewpoint. G. E. R., 1932, стр. 560.
17. Wagner C. F. Decrement of Short-Circuit Currents. El. J. 1933, стр. 113, 169, 205.
18. Wright S. H. Determination of Synchronous Machine Constants by Test. Tr. A. I. E. E., декабрь 1931, стр. 1331.
19. Ломоносова Л. А. Метод симметричных координат в исследовании индуктивных сопротивлений трехфазной синхронной машины. Э. 1932, стр. 949.
20. Пиотровский Л. М. и Ефремов Д. В. Электродвижущая сила поля в расточке двухполюсного турбогенератора. Э. 1930, стр. 359.
21. Пиотровский Л. М. и Попов В. К. Испытание машин переменного тока. Вып. I. Ленинград, 1927.
22. Толвинский В. А. и Ефремов Д. В. Простейший метод опытного определения индуктивного сопротивления якорной обмотки трехфазного синхронного генератора. Э. 1927, стр. 93.
23. Турбогенераторы. Технический справочник. Составил Деметьев Ф. А. (завод „Электросила“) Ленинград, 1933.
24. Щедрин Н. Н. Короткие замыкания в электрических системах сильного тока. СЭТ, т. II, отд. 10. Ленинград, 1930.

ГЛАВА XIV.

КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН.

220. Общие замечания.

Изучение конструкций синхронных машин, конструктивного выполнения отдельных деталей и свойств материалов, применяемых в электромашиностроении, необходимо, главным образом, для специализирующихся в области динамостроения. Умение правильно конструировать машину достигается лишь производственным опытом и не может быть почерпнуто только из книг. Однако, основные характерные особенности конструкций разных типов машин необходимо знать каждому электротехнику, имеющему дело с эксплуатацией машин для того, чтобы иметь возможность оценить соответствие конструктивного выполнения машины предъявляемым к ней требованиям. Поэтому в задачу общего курса по синхронным машинам детальное изучение конструкций не входит, но ознакомлению с особенностями конструкции разных типов машин должно быть уделено внимание. Настоящая глава и преследует эту цель.

221. Турбогенераторы.

Турбогенератором называется синхронный генератор, соединяемый непосредственно с паровой турбиной (§ 27). Так как паровая турбина по своей природе является машиной быстроходной, то с нею сочленяются генераторы на наибольшие возможные скорости вращения — 3000 и 1500 об./мин. при 50 пер./сек. (СССР и Европа), 3600 и 1800 об./мин. при 60 пер./сек. (США), 1500 об./мин. при 25 пер./сек. (США). Вследствие больших скоростей вращения ротор турбогенератора выполняется с неявно выраженными полюсами, так как такая конструкция допускает более надежное крепление обмотки возбуждения.

Мощности отдельных устанавливаемых турбогенераторов непрерывно растут. Первоначально каждая электрическая система работала изолированно, вследствие чего мощность установленных генераторов определялась величиной приключенной к системе нагрузки, составляя некоторую часть последней. В настоящее время отдельные изолированные системы объединяются во все более и более крупные районные системы; в этих условиях мощности отдельных генераторов выбирают лишь с точки зрения наибольшей экономичности. Стоимость установки и эксплуатационные расходы с увеличением мощности отдельных генераторов уменьшаются, что обусловлено уменьшением занимаемого места, уменьшением количества аппаратуры, уменьшением расхода пара на киловатт-час, уменьшением количества обслуживающего персонала; эти обстоятельства являются стимулом к увеличению мощности отдельных агрегатов.

Так как размеры и вес паровой турбины и генератора с увеличением скорости вращения уменьшаются, вследствие чего уменьшается как их стоимость, так и стоимость монтажа, ремонта и пр., то в Европе предпочитают строить двухполюсные турбогенераторы (3000 об./мин.). Вследствие уменьшения веса турбогенератора требуется установка меньших подъемных кранов, что облегчает конструкцию и удешевляет стоимость здания электрической станции. На рис. 293 представлено повышение стоимости (в процентах) турбоагрегата на 1500 об./мин. по сравнению с турбоагрегатом на 3000 об./мин. по данным фирмы S. S. W. Кроме уменьшения стоимости, турбина на 3000 об./мин. имеет и несколько меньший расход пара на киловатт-час по сравнению с турбиной на 1500 об./мин. При мощностях, меньших 6000 kW, скорость вращения паровой турбины в 3000 об./мин. становится неэкономичной, поэтому при таких мощностях более выгодным оказывается применять турбину на 5000—7000 об./мин. и соединять ее с генератором на 1000—1500 об./мин. посредством зубчатой передачи.

Изготовление ротора турбогенератора на 3000 об./мин. очень большой мощности встречает ряд технологических затруднений, обусловленных большой окружной скоростью, что заставляет переходить на четырехполюсный тип турбогенератора (1500 об./мин.). Допускаемая окружная скорость турбогенераторов около 150 м/сек.; вследствие этого предельный диаметр ротора при

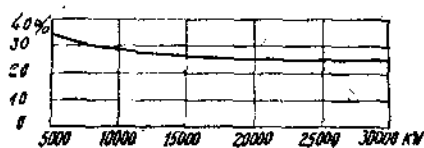


Рис. 293. Повышение стоимости турбоагрегата на 1500 об./мин. по сравнению с турбоагрегатом на 3000 об./мин.

3000 об./мин. $D_2 = 1$ м, при 1500 об./мин. $D_2 = 2$ м. Эти ограничения в величине диаметра ротора заставляют для увеличения мощности генератора удлинять ротор, что приводит к нежелательному явлению — возможности приближения так называемой критической скорости к номинальной. Критической скоростью называется скорость вращения, при которой прогиб ротора вследствие действия центробежных сил от несбалансированных масс стремится к бесконечности.¹⁾ Обычно в генераторах на 1500 об./мин. критическая скорость лежит выше номинальной; в генераторах на 3000 об./мин. критическая скорость приближается к номинальной, поэтому иногда выполняют генераторы, имеющие значение критической скорости, лежащее ниже номинальной. Ограничения, ставящиеся центробежной силой и критической скоростью, обуславливают некоторый предел возможной мощности турбогенератора на 3000 об./мин.; этот предел растет соответственно улучшению технологии применяемых материалов. До последнего времени наибольшей мощностью генератора на 3000 об./мин. было 50 000 kVA, затем был построен генератор на 71 500 kVA (Oerlikon). В настоящее время рекордным является турбогенератор на 80 000 kVA (S.S.W.).²⁾ Мощность турбогенераторов на 1500 об./мин. для настоящего времени не ограничена. Наибольший построенный турбогенератор на 50 пер./сек. 1500 об./мин. имеет мощность 100 000 kVA; расчеты показывают, что возможно выполнение турбогенератора на 250 000 kVA.

В США при стандартной частоте 60 пер./сек. двухполюсные генераторы на 3600 об./мин. имеют очень большие окружные скорости, вследствие чего наибольшая мощность генератора на 3600 об./мин. составляет

¹⁾ С. П. Тимошенко. Курс сопротивления материалов. Москва — Ленинград, 1928 г.

²⁾ L. Kropff. Eine Spitzenleistung im Elektro-Grossmaschinenbau 80 000 kVA-Turbogenerator mit 3000 U/min. S.-Z., 1934, стр. 65.

всего лишь 22 500 kVA. При частоте 60 пер./сек. в США предпочитают строить генераторы на 1800 об./мин. Наибольший турбогенератор на 1800 об./мин., 60 пер./сек. имеет мощность 200 000 kVA, $\cos \varphi = 0,8$, напряжение 16 500 V. Этот генератор является рекордным по мощности

из всех построенных. Наибольший генератор на 1500 об./мин., 25 пер./сек. имеет мощность 160 000 kVA.⁴⁾ С целью уменьшения занимаемой площади, в США в последнее время применяют иногда вертикально-компаундное расположение турбогенераторов. Паровая турбина имеет два цилиндра: высокого и низкого давления, соединенных каждый с отдельным генератором. Цилиндр высокого давления расположен на цилиндре низкого давления, а соответствующий ему генератор — на статоре генератора турбины низкого давления. Такая двухэтажная установка из двух генераторов, мощностью по 50 000 kW каждый, занимает столько же места, как установленный в 1901 г. генератор с паровой машиной на 6500 kW.

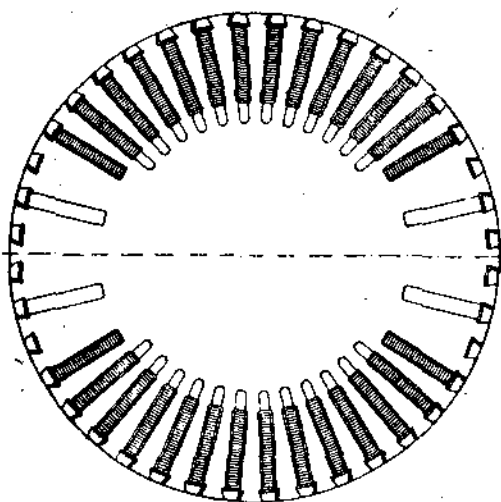


Рис. 294. Ротор турбогенератора с профрезованными впадинами.

Коэффициент полезного действия современных турбогенераторов доходит до 97,5%.

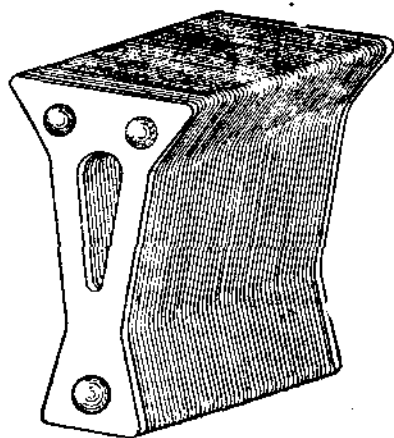


Рис. 295. Вставной зубец ротора А. Е. Г.

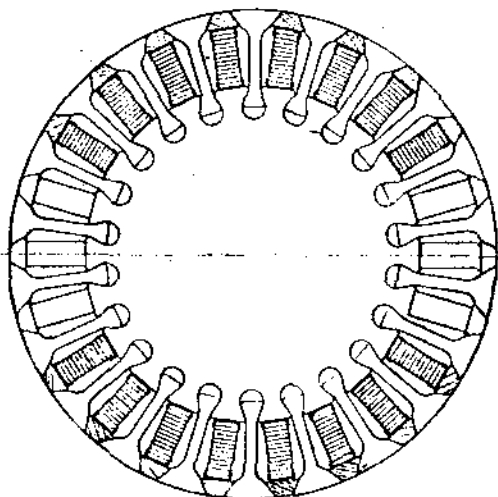


Рис. 296. Ротор турбогенератора со вставными зубцами.

⁴⁾ F. D. Newbury and P. L. Alger. The Development of Electrical Machinery in the United States. G. E. R. 1932, стр. 422, 435.

Роторы двухполюсных генераторов (3000 об./мин.) большей частью выполняют из ковanej стали с профрезованными на поверхности зубцами, в которые укладывается обмотка возбуждения (рис. 16). На необмотанной части ротора (на больших зубцах) профрезованы впадины небольшого размера, которые служат для улучшения формы кривой поля полюсов; если этих впадин не делать, то кривая поля получает форму, близкую к прямоугольнику, а если сделать впадины нормальной величины, то зубцы между ними сильно насыщаются и кривая поля получается приплюснутой. Иногда вместо небольших впадин на необмотанной части делают более редкие впадины (рис. 294). Впадины на роторе профрезовываются таким образом, чтобы внизу мог проходить воздух для охлаждения обмотки.

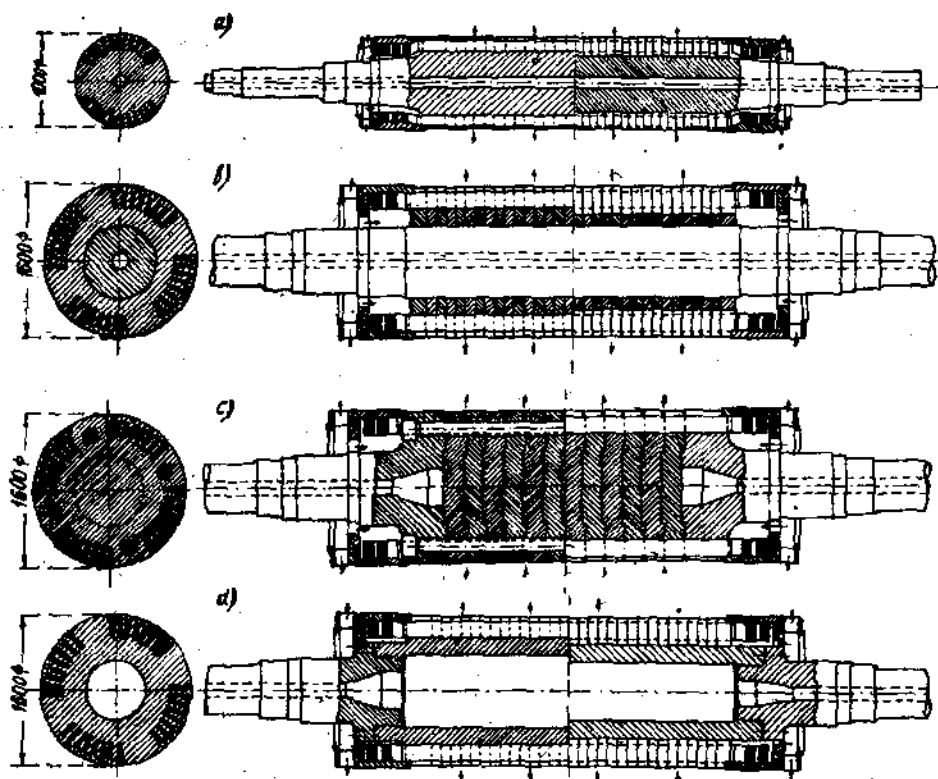


Рис. 297. Конструкции роторов турбогенераторов.

Фирмы А.Е.Г. и Thyssen делают роторы с вставными зубцами. Зубцы делают из листовой стали, собранной в пакеты длиной около 10 см (рис. 295), и укрепляют на роторе при помощи ласточкиных хвостов (рис. 296). При такой конструкции ротора упрощается укладка обмотки возбуждения. Зубцы устроены таким образом, чтобы между обмоткой и стенками зубца мог проходить охлаждающий воздух. Впадины в необмотанной части ротора заполняют железом для увеличения проводимости для магнитного потока. На рис. 297 изображены различные конструкции роторов турбогенераторов. На рис. 297, а изображен двухполюсный ротор: в левой части рисунка — сплошной из ковanej стали с профрезованными впадинами, в правой — с вставными зубцами. Роторы четырехполюсных генераторов (1500 об./мин.) выполняют по одной из следующих конструкций: 1) из стальных дисков, насаженных на сплошной вал (рис. 297, б; слева — с профрезованными впадинами, справа — с вставными зубцами); 2) из ди-

сков, стянутых болтами; этими же болтами диски скрепляют с концевыми фланцами вала (рис. 297, с); диски иногда делают с отверстием посередине (рис. 298); 3) ротор из полого цилиндра, к которому болтами прикреплены концевые фланцы вала (рис. 297, d; слева — с профрезованными впадинами, справа — с вставными зубцами). Массивные ротор и вал имеют всегда просверленное вдоль оси отверстие, назначение которого — проверка однородности состава внутренних частей поковки и уничтожение остаточных деформаций, образующихся в теле ротора при поковке.

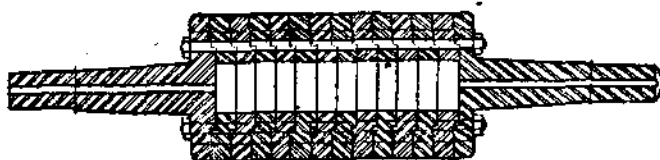


Рис. 298. Ротор турбогенератора, собранный из дисков.

Обмотка возбуждения выполняется из меди, иногда применяют алюминий (фирма Oerlikon), так как последний имеет меньший удельный вес, а потому центробежные силы уменьшаются. Впадины закрываются составными клиньями; половина клина выполняется из бронзы, другая половина — из стали (рис. 299). Бронзовая часть клиньев образует успокоительную обмотку, назначение которой уничтожать обратно синхронный поток реакции и тем самым уменьшать потери при несимметричной нагрузке и опасность перенапряжений в разомкнутой фазе при несимметричных коротких

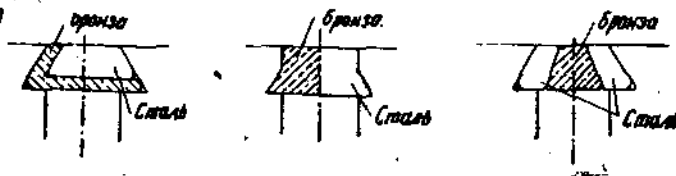


Рис. 299. Составные клинья ротора турбогенератора.

замыканиях. Стальная часть клина делает впадину полузакрытой, вследствие чего уменьшаются пульсации потока и добавочные потери. В лобовых частях обмотка возбуждения закрывается специальными бандажными крышками, имеющими форму стакана, предохраняющими лобовые части обмотки возбуждения от разрыва центробежной силой. Для уменьшения добавочных потерь эти крышки часто делают из антимагнитного материала. Фирма А. Е. Г. выполняет бандаж из специальной стальной проволоки, намотанной на лобовые части обмотки возбуждения.

Конструкция статора турбогенератора в сильной степени зависит от принятой системы вентиляции (§ 225). Общий вид турбогенератора дан на рис. 300; см. также рис 18.

222. Гидрогенераторы.

Гидрогенераторам называют генераторы, соединенные непосредственно с гидравлическими турбинами. Скорость гидравлических турбин зависит от напора и изменяется в очень широких пределах, в общем, однако, оставаясь невысокой (50—600 об./мин.). Гидрогенераторы выполняются поэтому всегда с явно выраженными полюсами. По конструкции гидрогенераторы делят на два типа: 1) генераторы с вертикальным валом

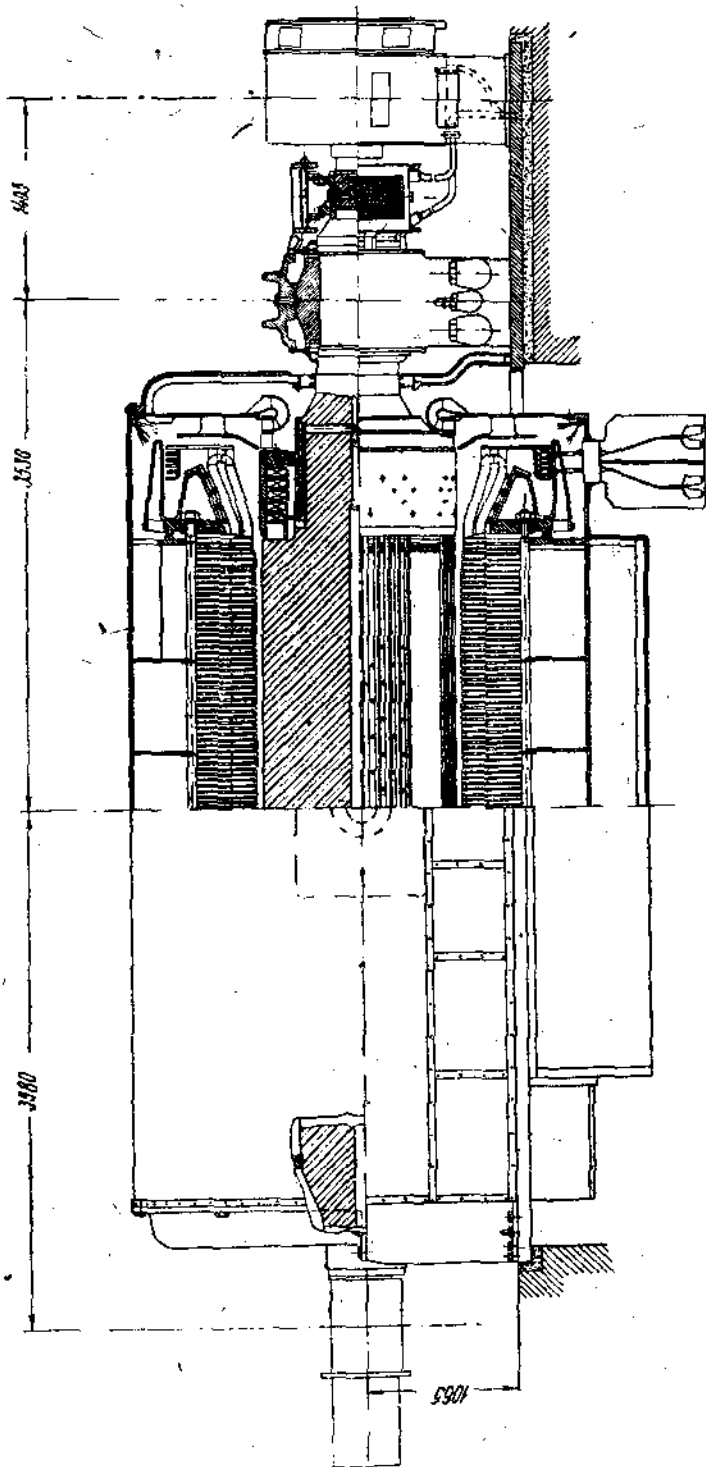


Рис. 300. Турбогенератор 35000 кВА, 1500 об./мин. (зав. „Электросила“).

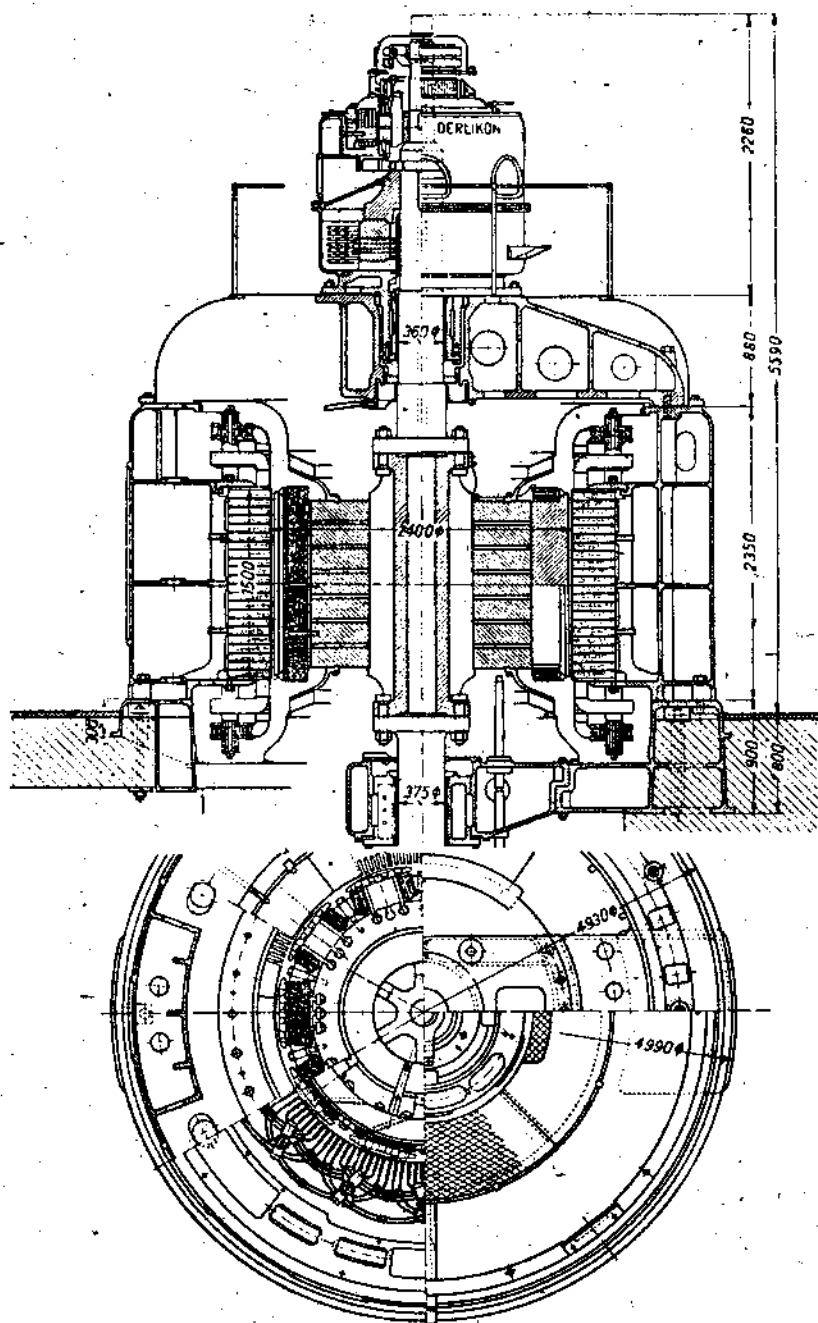


Рис. 301. Гидрогенератор с вертикальным валом 18350 кВА,
600 об./мин. (Оерликон).

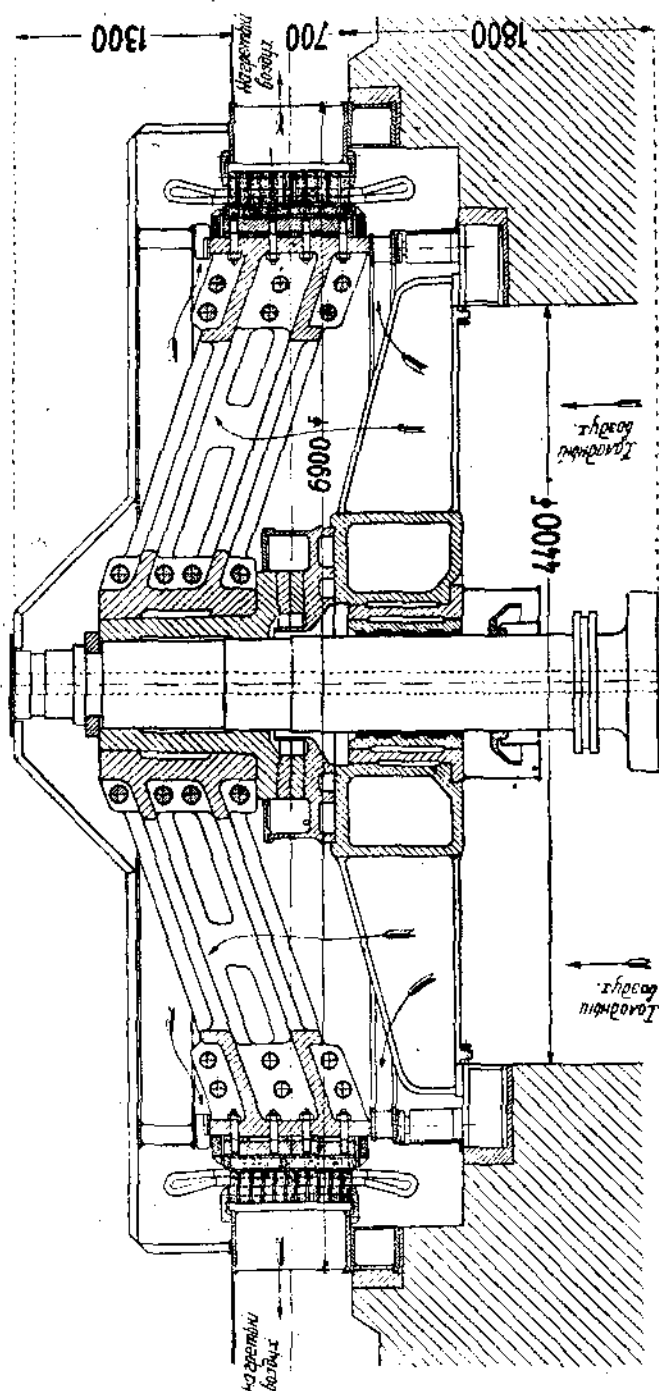


Рис. 302. Гидрогенератор с вертикальным валом (винтовой тип) 11200 kVA, 128 об./мин. (S. S. W.).

(рис. 301 и 302), выполняемые обычно при скоростях вращения до 200 об./мин.; такие скорости вращения получаются при низких напорах; для лучшего использования напора турбину необходимо помещать ближе к нижнему бьефу, что конструктивно удобнее выполнять при вертикальном вале; 2) генераторы с горизонтальным валом (рис. 15), выполняемые обычно при скоростях вращения, больших 200 об./мин., т. е. при турбинах, работающих с большим напором (обычно колеса Пельтона). Гидрогенераторы с верти-

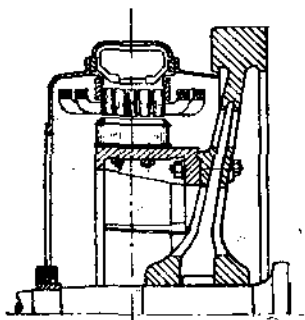


Рис. 303. Ротор с отдельным маховиком.

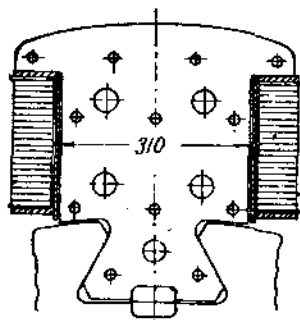
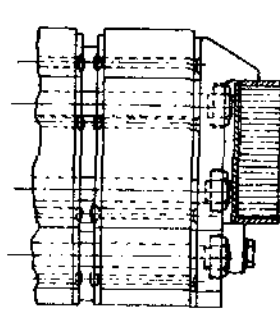


Рис. 304. Крепление полюса при помощи «двостороннего хвоста».



кальным валом большею частью имеют два подшипника (рис. 301): 1) опорный, на котором держатся роторы генератора и турбины; этот подшипник расположен над ободом ротора генератора; 2) направляющий подшипник, расположенный под ободом генератора; назначение этого подшипника препятствовать радиальным перемещениям ротора. С первых

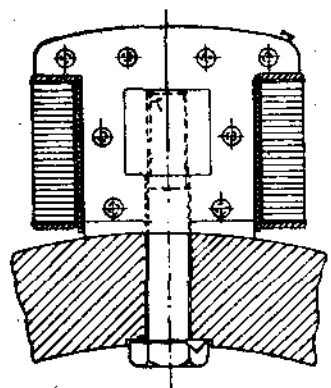
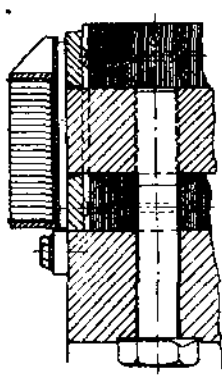


Рис. 305. Крепление полюса болтами.



лет применения генераторов с вертикальным валом существует также конструкция с одним общим подшипником, являющимся как поддерживающим, так и направляющим; этот подшипник помещается под ободом ротора генератора. Такой тип гидрогенераторов (так называемый зонтичный) не имел большого распространения, однако, в последнее время зонтичные генераторы снова начинают входить в практику (рис. 302), так как такая конструкция позволяет умень-

шить помещение станции (требуется меньшее место для того, чтобы вынуть ротор) и допускает более легкий осмотр подшипника и генератора. С целью уменьшения размеров гидрогенератора иногда соединяют генератор с вертикальным валом, выполненный на большое число оборотов в минуту, с тихоходной турбиной посредством зубчатой передачи.

Гидравлические турбины имеют равномерную скорость вращения, но регуляторы скорости турбин обладают очень большим временем действия, поэтому при внезапных изменениях нагрузки получаются очень большие изменения скорости турбины (до 20%); это заставляет делать роторы

гидрогенераторов с большим моментом инерции, ограничивающим изменение скорости. Обычно необходимый момент инерции сосредоточивают в самом роторе, выполняя последний с большим диаметром. В последнее время имеется тенденция к уменьшению диаметра ротора, так как стоимость генератора тогда уменьшается; необходимый момент инерции получается за счет отдельного маховика, который во избежание крутильных колебаний (§ 142) жестко связывают с ротором (рис. 303).

При внезапном сбросе нагрузки и отказе в действии регулятора скорости гидравлические турбины увеличивают свою скорость вращения до так называемого угонного значения, равного $1,8-2,5$ от номинального; это обстоятельство необходимо учитывать при конструировании ротора гидрогенератора. Максимальная допустимая окружная скорость при угонной скорости около 160 м/сек. Раньше ротор выполнялся всегда из литой стали или из чугуна, в настоящее время часто применяют роторы, сваренные из прокатной сортовой стали: обод—из стальных листов, спицы—из двухтавровых балок. При таком выполнении значительно облегчается вес генератора и конструкция получается более надежной вследствие однородности строения прокатного материала, тогда как в литье всегда возможны раковины и трещины.

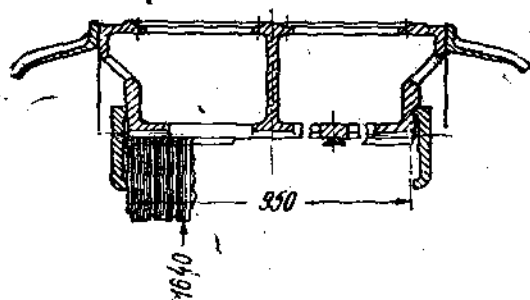


Рис. 306. Поперечное сечение литого чугунного корпуса статора.

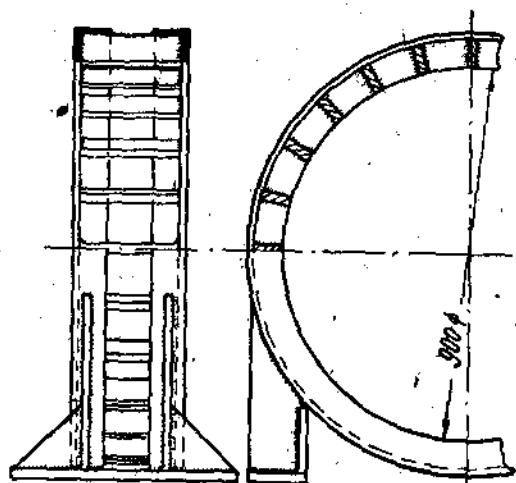


Рис. 307. Сварной корпус статора.

Полюса делают из листового железа, иногда литые. К ободу ротора полюса прикрепляются при помощи ласточкиных хвостов (рис. 304) или болтов; в полюсах из листового железа болты ввертываются в стальные стержни, проходящие через листовое железо (рис. 305). Обмотка возбуждения в больших машинах выполняется обычно из навитой на ребро неизолированной полосовой меди, образующей катушку, надетую на полюс (рис. 304 и 305). Изоляцию обмотки возбуждения в этом случае выполняют в виде прессшпановых или миканитовых прослоек между витками. В небольших машинах обмотку возбуждения выполняют из круглой или прямоугольной изолированной проволоки. Для успокоения колебаний при параллельной работе в полюсных наконечниках (которые в этом случае всегда должны быть из листового железа) укладывают успокоительную обмотку (§ 143).

Корпус статора генератора с вертикальным валом прост в конструктивном отношении, выполняется в последнее время сварным (рис. 302). Корпус должен иметь камеры для подвода охлаждающего воздуха (§ 225). В генераторах с двумя подшипниками он, кроме того, служит основанием для крестовины, поддерживающей опорный подшипник (рис. 301). Констру-

ирование корпуса генератора с горизонтальным валом при большом диаметре сложнее, так как корпус поддерживает листовое железо статора и должен обладать поэтому достаточной жесткостью, чтобы междужелезное пространство не изменялось под влиянием прогиба корпуса. Обычно корпус в поперечном сечении имеет коробчатую форму с ребрами жесткости и выполняется литым из чугуна (рис. 306) или сварным из прокатной стали (рис. 307).

Вследствие большого махового момента и малых механических потерь гидрогенератор после отключения от сети очень долго (несколько часов) не останавливается. Так как с уменьшением скорости вращения смазка подшипников ухудшается, что вызывает большой износ подшипников, то гидрогенераторы снабжают обычно специальными тормозами, которыми останавливают ротор. Для уменьшения износа тормозных колодок тормоз приводят в действие лишь по уменьшении скорости вращения генератора до $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{4}$ номинальной. Тормоз служит также для подъема ротора при осмотре и разборе опорного подшипника.

Наибольшая мощность гидрогенератора 77 500 kVA при $88\frac{1}{4}$ об./мин. (Днепровская ГЭС, генераторы заводов „Электросила“ и G.E.C.). В постройке находится гидрогенератор на 82 500 kVA, 150 об./мин. (G.E.C.).¹⁾

Коэффициент полезного действия гидрогенераторов $97 \div 97,5\%$.

223. Генераторы для поршневых машин.

Поршневые двигатели имеют обычно низкую скорость вращения (от 80 до 200 об./мин.), поэтому синхронные генераторы, приводимые во вращение поршневыми машинами, выполняют с явно выраженными полюсами, причем всегда с горизонтальным валом (рис. 308). В качестве первичных двигателей применяют, главным образом, дизели. Вследствие неравномерной окружной скорости генераторы, приводимые поршневыми первичными двигателями, должны иметь большой момент инерции и часто снабжены успокоительной обмоткой. Тихоходные генераторы имеют очень большой диаметр, что требует особой жесткости корпуса статора (рис. 307), чтобы последний не прогибался ни от действия веса самого статора, ни от магнитного притяжения к ротору. Наибольшая мощность генератора для дизеля 13 000 kVA при $\cos \varphi = 0,8$; скорость вращения 94 об./мин., напряжение 6 300 V (S. S. W.).²⁾

224. Синхронные двигатели.

Конструкция синхронного двигателя в основном почти не отличается от конструкции генератора, за исключением лишь особенностей конструкции ротора, вызванных стремлением удовлетворить требуемым пусковым условиям. Синхронные двигатели выполняют большей частью с явно выраженными полюсами для невысоких скоростей вращения, реже строят синхронные двигатели с цилиндрическим ротором для привода воздушных турбокомпрессоров и турбовоздухоуловов, которые требуют больших скоростей вращения. Для увеличения перегрузочной способности междужелезное пространство у двигателей надо делать больше, с другой стороны, для уменьшения пускового тока и улучшения $\cos \varphi$ при пуске двигателя в качестве асинхронного, его необходимо уменьшать. Обычно останавлива-

¹⁾ J. Liston. Developments in the Electrical Industry During 1933. G.E.R., 1934, стр. 11.

²⁾ Der 15 000 kW - Dieselmotor - Generator der Hamburgischen Elektrizitäts-Werke. E. T. Z., 1927, стр. 606.

ются на компромиссном решении. Для возможности непосредственного пуска почти все синхронные двигатели имеют на роторе пусковую обмотку. В большинстве случаев эта обмотка выполняется короткозамкнутой, аналогично успокоительной обмотке (§ 165). Для улучшения пусковых характеристик фирма Westinghouse делает двойную короткозамкнутую обмотку (как в двигателе Бушера), а в двигателях, предназначенных для пуска с большим начальным моментом, пусковую обмотку выводят на кольца

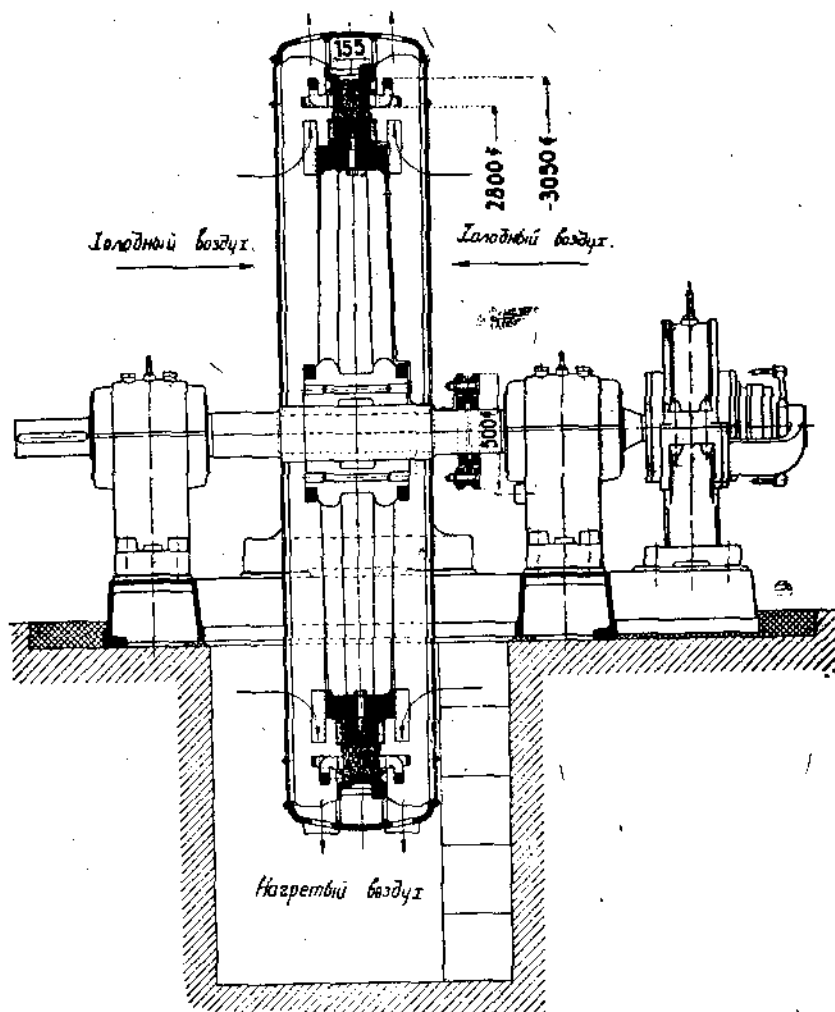


Рис. 308. Генератор 450 kVA, 166 об/мин, с приводом от поршневого двигателя (S. S. W.).

и замыкают через щетки на реостат (§ 165); пусковые характеристики такого синхронного двигателя аналогичны пусковым характеристикам индукционного двигателя с кольцами. Для привода механизмов с большим моментом сопротивления при пуске фирма G. E. C. строит специальные двигатели (названные ею *super synchronous*), в которых статор может вращаться на подшипниках, установленных на валу ротора. При включении двигателя в сеть начинает вращаться статор, так как ротор удерживается в покое моментом сопротивления приводимого механизма, статор же не

испытывает никаких сопротивлений, кроме трения. Когда статор достигает синхронной скорости, его затормаживают специальной стальной лентой, наложенной поверх статора. Соответственно уменьшению скорости статора начинает увеличивать свою скорость ротор, вращаясь в сторону, противоположную вращению статора, таким образом, что относительная скорость их все время равна синхронной. Когда статор полностью заторможен и останавливается, ротор имеет синхронную скорость, и двигатель работает как обычный синхронный двигатель.

225. Вентиляция синхронных машин.

Потери энергии в электрических машинах ведут к повышению температуры отдельных частей ее. При повышении температуры сверх некоторой допустимой максимальной, материалы, применяемые в электрических машинах для изоляции проводников, теряют свои изолирующие свойства и работа электрической машины нарушается. В машинах малой мощности при номинальной нагрузке температура обычно не превышает предельной допустимой, так как вследствие большой поверхности, приходящейся на единицу объема машины, теплота интенсивно рассеивается в окружающее

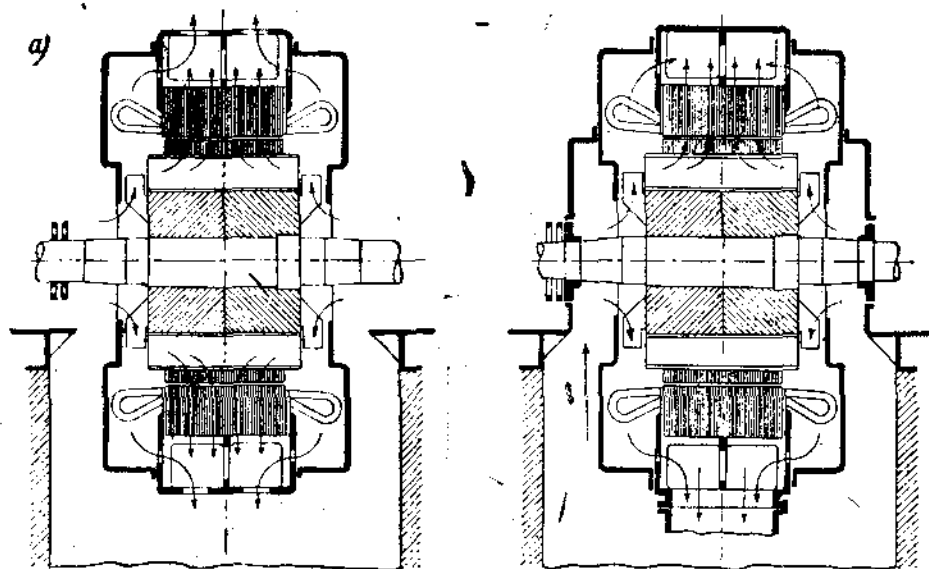


Рис. 309. Машина с самовентиляцией.

пространство. Так как с увеличением размеров машины объем ее растет пропорционально кубу линейных размеров, а поверхность растет пропорционально квадрату линейных размеров, то величина поверхности, приходящейся на единицу объема, уменьшается и количество рассеиваемого в окружающее пространство тепла уменьшается. Вследствие этого естественное охлаждение машины оказывается недостаточным. Поэтому во избежание повышения температуры машины выше допустимого предела в машинах большой мощности устраивают искусственную вентиляцию, осуществляемую путем пропускания через машину холодного воздуха, поглощающего тепло и уносящего его из машины. Циркуляция воздуха достигается устройством вентилятора.

По типу привода вентилятора машины можно разделить на машины с самовентиляцией (рис. 309) и на машины с внешней вентиляцией (рис. 310). Машины с самовентиляцией имеют вентилятор, сидящий на роторе; в машинах с внешней вентиляцией вентилятор установлен отдельно от машины в канале для воздуха и приводится во вращение электрическим (переменного или постоянного тока) двигателем или паровой турбиной. Большинство синхронных машин строят с самовентиляцией, внешнюю вентиляцию устраивают лишь в машинах большой мощности очень тихоходных (60—80 об./мин.) и в турбогенераторах очень большой мощности — свыше 30 000 kVA при 3000 об./мин. и свыше 80 000 kVA при 1500 об./мин. Встречается и комбинация самовентиляции с внешней вентиляцией. Ма-

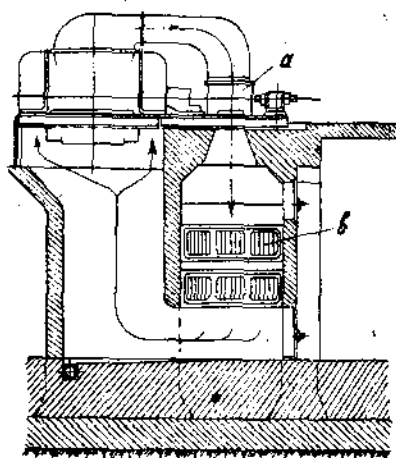


Рис. 310. Машина с внешней вентиляцией: а — вентилятор, б — воздухоохладитель.

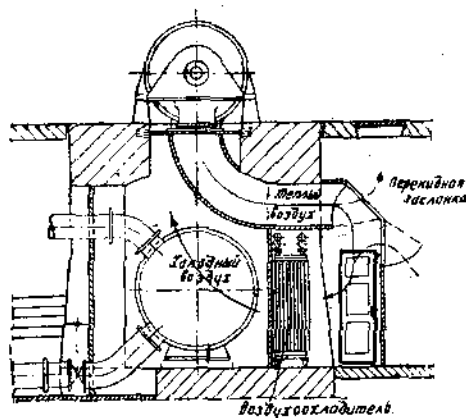


Рис. 311. Замкнутая система вентиляции.

шины с самовентиляцией обычно имеют нагнетательные вентиляторы, которые всасывают холодный воздух и прогоняют его через машину; иногда встречаются машины и с вытяжными вентиляторами, установленными на выходных из машины каналах.

Количество необходимого для охлаждения воздуха равно:

$$V = \frac{Q}{1,1\Delta T} \text{ м}^3/\text{сек.}; \quad (466)$$

здесь Q — потери в машине в kW (за исключением потерь в подшипниках), ΔT — нагрев воздуха при прохождении его через машину ($\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$). Скорость воздуха при выходе из машины 6—8 м/сек. В турбогенераторах грубо можно считать, что за 30—40 мин. через машину должно пройти количество воздуха, по весу равное полному весу генератора.¹⁾ Необходимость в пропускании такого большого количества воздуха, во-первых, требует устройства в корпусе статора специальных каналов и камер, определяющих собою форму корпуса, во-вторых, заставляет обращать особое внимание на чистоту воздуха. Так, по подсчетам В. Г. Ламме, для одного генератора даже при содержании в воздухе по объему одной стомиллионной части пыли, за сто дней работы (при 12 часах работы в день)

¹⁾ В. Г. Ламме. Some Practical Consideration in Artificial Ventilation for Electrical Machinery. Сборник Electrical Engineering Papers, изд. Westinghouse, 1919.

через генератор пройдет 14 кубических метров пыли. Осаждаясь в генераторе, пыль, во-первых, уменьшает сечение вентиляционных каналов, что ведет к уменьшению количества проходящего воздуха и к повышению вследствие этого температуры машины и, во-вторых, покрывает тонким слоем все охлаждаемые части, вследствие чего непосредственное соприкосновение их с воздухом нарушается и теплопередача от нагретых частей к охлаждающему воздуху ухудшается; это также ведет к повышению температуры машины. Поэтому в установках с засасыванием воздуха извне генератора необходимо во избежание осаждения пыли устанавливать фильтры для очистки воздуха перед поступлением его в генератор; кроме того, несмотря на установку фильтров, необходимо подвергать генератор периодической продувке и чистке, так как фильтры пропускают некоторое количество пыли.

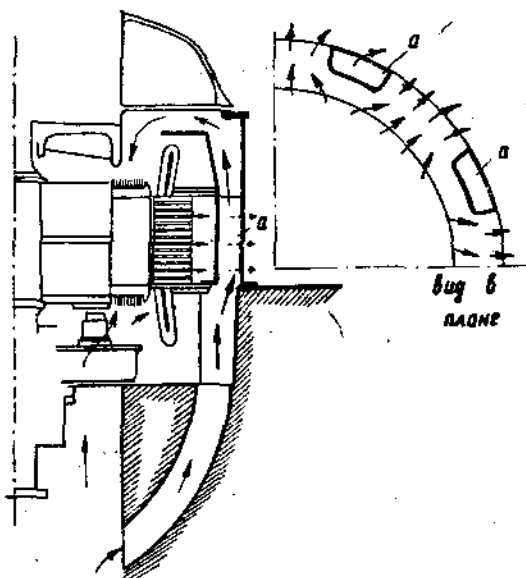


Рис. 312. Выполнение вентиляции вертикального гидрогенератора.

Раньше были широко распространены матерчатые фильтры (из фланели или сукна); в настоящее время применяют обычно так называемые висциновые фильтры, в которых очистка воздуха производится благодаря прилипанию пыли к поверхностям фильтра, смазанным специальным сортом масла. Недостатком матерчатых фильтров является опасность пожара и затруднительность очистки, так как применяемую матерью нельзя мыть. Недостатком висциновых фильтров является попадание масла в генератор, загрязняющего обмотки и ухудшающего теплопередачу от обмоток к охлаждающему воздуху.

Применение фильтров не является радикальным решением вопроса, так как фильтры все же пропускают пыль; кроме того,

подобная система вентиляции поддерживает возникающий в генераторе пожар. В случае пробоя изоляции в генераторе пыль, осевшая на обмотке, может воспламениться, причем возникающее пламя будет раздуваться охлаждающим воздухом, вследствие чего начавшийся пожар распространяется на всю обмотку и совершенно выводит генератор из строя. В настоящее время в генераторах большой мощности большую часть применяют замкнутую систему вентиляции. При такой системе один и тот же воздух проходит через генератор, соединительные воздухопроводы и водяной охладитель, после которого снова поступает в генератор (рис. 311). Охладитель устанавливается под генератором в том же помещении, где и конденсатор паровой турбины; в последнее время для уменьшения размеров трубопроводов и уменьшения высоты фундамента генератора устанавливают охладитель наверху рядом с генератором. Замкнутая система вентиляции имеет следующие преимущества: 1) отсутствие пыли в воздухе; 2) исключение опасности появления в воздухе влаги; 3) отсутствие необходимости чистки и продувки генератора; 4) отсутствие длинных подводящих каналов для воздуха; 5) минимальная опасность пожара и возможность быстрой ликвидации его, так как вследствие небольшого количества воздуха, со-

держась в замкнутой системе, возникшее пламя не может поддерживаться; 6) сильное уменьшение шума, создаваемого движущимся воздухом.

а) Вентиляция машин с явно выраженными полюсами. Вследствие сравнительно большого диаметра и малой длины железа статора легко добиться удовлетворительного охлаждения генераторов с явно выраженными полюсами. В генераторах небольшой мощности достаточная циркуляция воздуха создается самим ротором и полюсами. В генераторах большой мощности по бокам ротора устраивают вентиляторы. При мощностях до 5000 kW воздух часто засасывается прямо из машинного зала, проходит мимо лобовых частей обмоток статора и ротора и через радиальные вентиляционные каналы в железе статора и выпускается снова в машинный зал (рис. 309, а). При больших мощностях, требующих большого количества воздуха, машину закрывают со всех сторон, а подвод воздуха производят по специальным каналам (рис. 309, б); выпуск воздуха

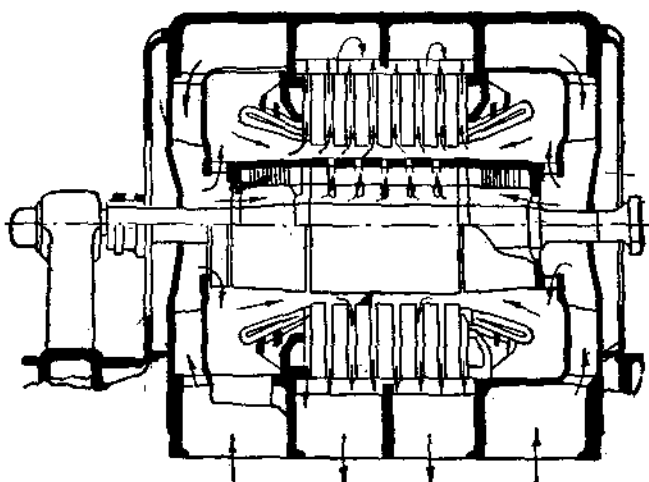


Рис. 313. Радиальная вентиляция турбогенератора.

производится непосредственно в машинный зал или по каналу воздух выводят из здания станции наружу. На рис. 312 показана система вентиляции вертикального гидрогенератора; к верхним лобовым соединениям воздух подается через вертикальные каналы в корпусе статора. При мощностях свыше 30 000 — 40 000 kVA всегда применяют замкнутую систему вентиляции.

б) Вентиляция турбогенераторов. Проблема вентиляции турбогенераторов несравненно сложнее, чем вентиляции генераторов с явно выраженными полюсами, так как турбогенераторы имеют большую длину и небольшое, одинаковое по всей окружности статора, междужелезное пространство. Для лучшего охлаждения всех частей турбогенератора в железе статора и ротора устраивают ряд вентиляционных каналов. По способу устройства вентиляционных каналов и проведения через них воздуха различают:

1. Радиальная вентиляция (рис. 313): воздух проходит по междужелезному пространству и поступает из последнего в радиальные каналы в железе статора, через которые выходит в камеры корпуса статора и в отводящие каналы. Недостатки радиальной вентиляции: 1) количество проходящего через машину воздуха определяется, главным образом, площадью сечения междужелезного пространства, а потому не может

быть увеличено при увеличении длины машины и неизменности величины междужелезного пространства; 2) в радиальные каналы, расположенные около середины длины железа, поступает воздух, уже сильно нагретый

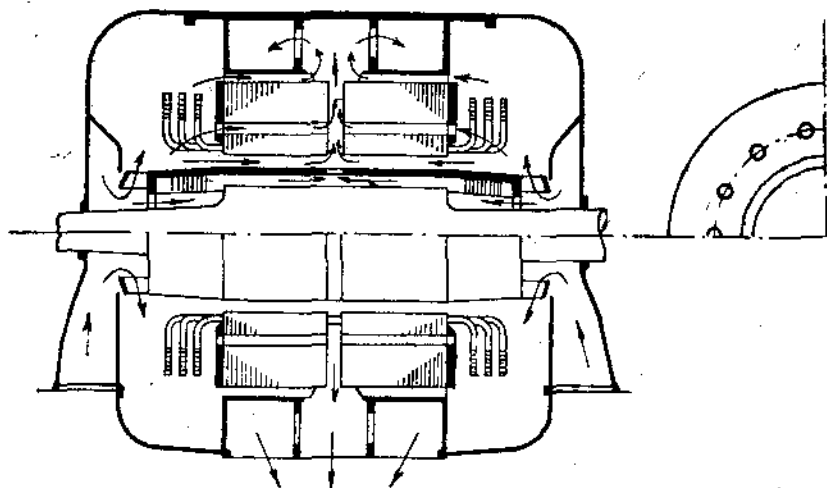


Рис. 314. Аксиальная вентиляция турбогенератора.

за счет потерь ротора, что ухудшает отдачу тепла статором; поэтому средняя часть статора имеет температуру значительно более высокую, чем боковые части; 3) при прохождении по радиальному каналу воздух

соприкасается лишь с крайними листами пакетов железа; внутренние листы пакетов охлаждаются очень слабо, вследствие наличия изоляционных бумажных или лаковых прослоек между листами, являющихся плохим проводником тепла. Радиальная вентиляция применяется в машинах с длиной железа меньше 1500 мм.

2. Аксиальная вентиляция (рис. 314): воздух проходит по междужелезному пространству и по каналам, устроенным в железе статора параллельно оси вала. Система аксиальной вентиляции обладает тем преимуществом, что воздух проходит через железо статора перпендикулярно

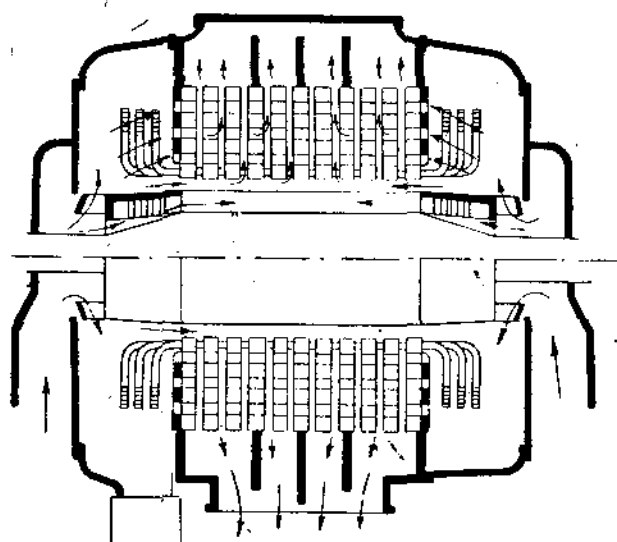


Рис. 315. Радиально-аксиальная вентиляция турбогенератора.

лярно листам железа, что повышает теплоотдачу, так как изоляция между листами железа не препятствует отдаче тепла. К недостатку этой системы относится невозможность получить большой площади соприкосновения железа с воздухом, так как увеличение размеров или количества каналов требует увеличения диаметра машины и ведет поэтому к удорожанию ее.

Обычно применяют двухстороннюю вентиляцию с поступлением воздуха с двух торцевых сторон статора и выходом его посередине. В старых конструкциях турбогенераторов применяли и одностороннюю вентиляцию с поступлением воздуха с одной стороны статора и выходом его с другой стороны. Двухсторонняя аксиальная вентиляция применяется при мощностях до 10 000 кВА, односторонняя — 1500 — 2000 кВА.

3. Радиально-аксиальная вентиляция (рис. 316) представляет комбинацию двух первых типов: воздух проходит через междужелезное пространство и аксиальные каналы и поступает в радиальные каналы, откуда выходит в выводной канал. При этой системе вентиляции можно пропустить через машину гораздо большее количество воздуха, чем при чисто радиальной или чисто аксиальной. С целью более равномерного распределения воз-

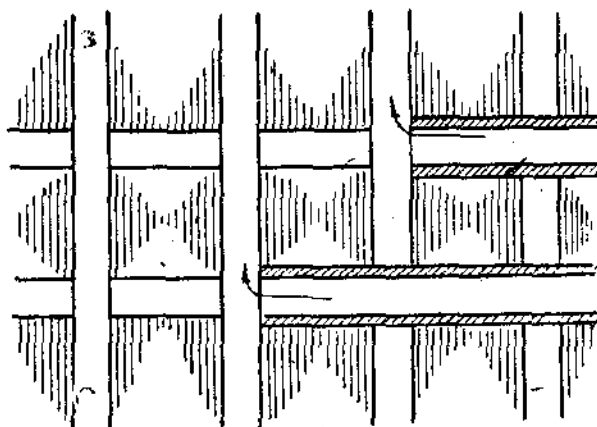


Рис. 316. Разобщение аксиальных и радиальных каналов посредством трубочек.

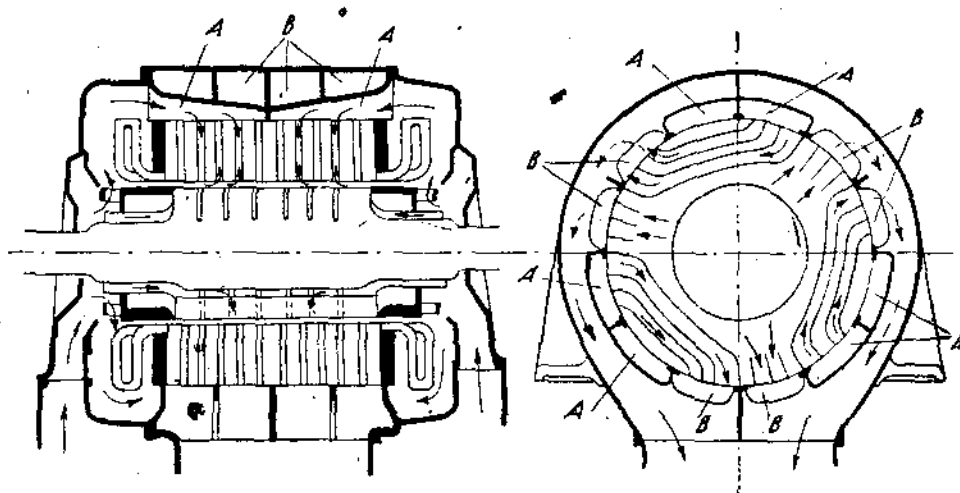


Рис. 317. Тангенциальная вентиляция.

духа по всему объему железа статора отдельные аксиальные каналы сообщаются лишь с определенными радиальными каналами, а от других радиальных каналов они отделены вставленными в них трубочками (рис. 316). Радиально-аксиальная вентиляция применяется при длине железа до 1700 мм.

4. Тангенциальная вентиляция (рис. 317): воздух через особые камеры А подается в радиальные каналы, охлаждает железо статора и при помощи направляющих распорок в радиальных каналах попадает в отводящие камеры В, не заходя в междужелезное пространство. В камеры В проходит и воздух из междужелезного пространства. В этой системе вентиляции отсутствуют аксиальные каналы, заставляющие уве-

личивать наружный диаметр статора; воздух, охлаждающий статор, попадает в радиальные каналы не только через межжелезное пространство, но и непосредственно через камеры *A*, что позволяет увеличить количество пропускаемого воздуха. Эта система вентиляции применяется при длине железа до 2000 мм в турбогенераторах на 3000 об./мин.

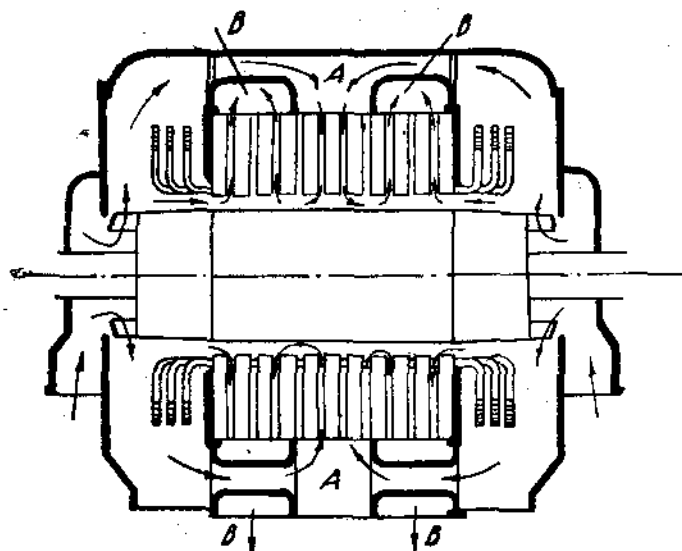


Рис. 318. Двухструйная вентиляция.

5. Многоструйная вентиляция. На рис. 318 изображена двухструйная система вентиляции. Здесь так же, как и в предыдущей системе, для охлаждения железа статора через камеры *A*, устроенные по середине длины железа, подается добавочный воздух, поступающий в радиальные каналы; в отличие от предыдущей системы этот воздух проходит через воздушный зазор, после

чего через боковые радиальные каналы выходит в отводящие камеры *B* по бокам статора. На рис. 319 показана система трехструйной вентиляции. Многоструйная вентиляция значительно проще в конструктивном отно-

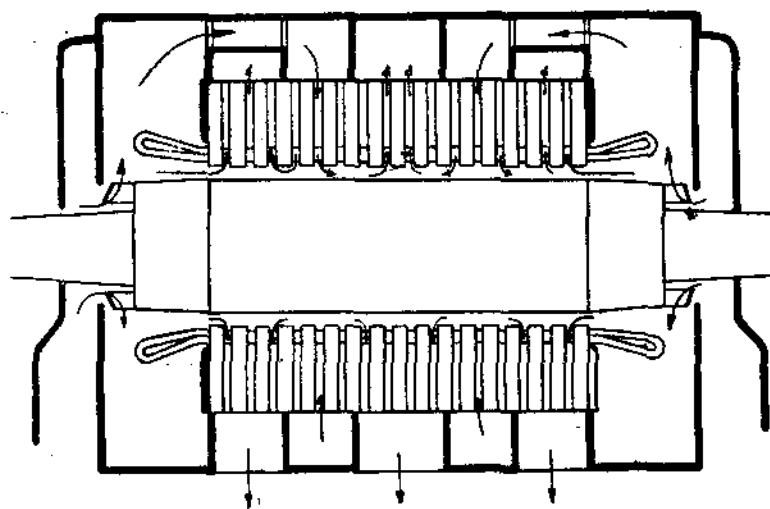


Рис. 319. Трехструйная вентиляция.

шении, чем тангенциальная. Двухструйная вентиляция в двухполюсных машинах применяется при длине железа 2100—2300 мм, трехструйная — при длине свыше 2300 мм. В четырехполюсных машинах двухструйная вентиляция применяется при длине железа до 2500 мм, трехструйная —

при длине до 3500 мм.¹⁾ За последнее время для охлаждения синхронных машин при замкнутой системе вентиляции вместо воздуха применяют иногда водород (§ 226).

226. Водородное охлаждение.

Первые попытки применения в качестве охлаждающей среды для электрических машин водорода вместо воздуха относятся к 1921 г. Вследствие целого ряда преимуществ охлаждение водородом в последнее время начинает широко распространяться. Плотность водорода равна около 7% плотности воздуха; так как потери на вентиляцию пропорциональны плотности газа, то при вращении ротора машины в атмосфере водорода вентиляционные потери уменьшаются, примерно, в 10 раз. Вследствие этого к. п. д. машины увеличивается на $0,6 \div 1\%$ при полной нагрузке и на $1,2 \div 2\%$ при половинной. Благодаря уменьшению потерь, а также вследствие значительно лучшей, чем у воздуха, теплопроводности водорода, превышение температуры машины при охлаждении водородом значительно ниже, чем при охлаждении воздухом, а при одинаковом превышении температуры мощность машины при водородном охлаждении может быть повышена на 25%. Вследствие отсутствия воздушных мешков в изоляции понижается, с одной стороны, вредное действие на изоляцию короны, с другой стороны, уменьшается перепад температуры в изоляции; поэтому продолжительность службы изоляции увеличивается. Опасность пожара внутри генератора отпадает, так как водород не поддерживает горения. Давление водорода внутри машины должно быть всегда несколько выше атмосферного для избежания проникновения внутрь воздуха; следовательно, внутри машины не может образоваться взрывчатой смеси, а потому отсутствует и опасность взрыва. Но даже и при возможности взрыва последний не представляет большой опасности благодаря малому количеству водорода, заключенного внутри машины. При водородном охлаждении вследствие лучшей теплопроводности и меньших потерь в машине получается большая компактность устройства вследствие меньших размеров водяных охладителей, которые могут быть расположены сбоку или наверху машины; поэтому отпадает надобность в вентиляционных каналах и в охлаждающем устройстве под машиной.

Так как для избежания утечки водорода корпус машины должен быть герметически закрыт, то водородное охлаждение первоначально применялось только для синхронных компенсаторов, не требующих вывода наружу концов вала. В последнее время разработаны конструкции лабиринтных уплотнений для вывода вала, и водородное охлаждение применяется и для турбогенераторов.²⁾

¹⁾ Описание различных систем вентиляции см.: 1) А. Е. Алексеев. Вентиляция современных гидрогенераторов вертикального исполнения — «Вестник электропромышленности», 1932, № 4, стр. 157. 2) Его же. Конструктивное исполнение вентиляции в современных паровых турбогенераторах — «Вестник электропромышленности», 1931, № 1, стр. 9. Там же указана литература.

²⁾ Литература: 1) E. Knowlton, Ch. W. Rice and E. H. Freiburghouse. Hydrogen as a Cooling Medium for Electrical Machines. Tr. A. I. E. E. 1925, стр. 922. 2) R. W. Wieseman. Outdoor Hydrogen-Ventilated Synchronous Condensers. Tr. A. I. E. E. 1929, стр. 1221. 3) M. D. Ross. The Application of Hydrogen Cooling to Turbine Generators. Tr. A. I. E. E. 1931, стр. 381. 4) C. J. Fechheimer. Developments in Hydrogen-Cooled Condensers. El. J. 1931, стр. 165. 5) C. J. Fechheimer. Interchanging Hydrogen and Air in Hydrogen-Cooled Machinery. El. J. 1931, стр. 361. 6) Fortschritte der Wasserstoffkühlung für Turbogeneratoren und Phasenschieber E. T. Z. 1932, стр. 726.

227. Применяемые напряжения.

С увеличением напряжения машины растет толщина изоляции, вследствие чего уменьшается использование впадин. Затруднения в изготовлении изоляции с увеличением напряжения сильно возрастают; изоляция должна быть слюдяная, при этом все пустоты должны быть заполнены специальной компаундной массой, во избежание заполнения их воздухом, который при высоких напряжениях ионизируется и разрушает изоляцию. Для равномерного распределения градиента потенциала необходимо набегать острых углов в сечении проводника. Из-за увеличения толщины изоляции теплопроводность ее уменьшается, вследствие чего для уменьшения нагревания обмотки необходимо уменьшать плотность тока, т. е. увеличивать площадь сечения проводника, что в связи с уменьшением коэффициента использования впадины заставляет увеличивать длину машины для избежания больших индукций в зубцах. Поэтому размеры и вес машины с повышением напряжения увеличиваются. Генератор на 22 kV дороже на 20—25%, генератора той же мощности с напряжением 11—13 kV, а генератор на 33 kV дороже на 40—50%.¹⁾

Однако, при низких напряжениях получается слишком большая сила тока генератора. Хотя стоимость генератора при этом и ниже, но аппаратура станции (масляные выключатели, разъединители, трансформаторы, кабели и пр.) должны иметь очень большие размеры. Поэтому общая стоимость установки получается все же выше. Это заставляет увеличивать напряжение машины. Нормально напряжение синхронных машин не превосходит 11—13 kV, но имеются генераторы на 22 и на 30—35 kV. В последнее время для уменьшения силы тока в США применяют генераторы с двумя обмотками (§ 228).

228. Турбогенераторы с двумя обмотками.

Цель применения генераторов с двумя обмотками и схемы их были указаны в § 48. Для уменьшения трансформаторного действия одной обмотки на другую при коротком замыкании и вызываемого этим действием падения напряжения в неповрежденной обмотке и перехода энергии из неповрежденной секции в поврежденную, необходимо, чтобы обмотки имели наименьшую магнитную связь друг с другом через поток рассеяния. Поток рассеяния в генераторе с двумя обмотками можно разбить на две части: 1) поток, сцепляющийся только с одной обмоткой (поток самоиндукции), и 2) поток, сцепляющийся с двумя обмотками (поток взаимной индукции). Обозначая через r активное сопротивление всего генератора, а через x_s и x_a — реактивности всего генератора, обусловленные потоками рассеяния и потоками реакции якоря, получим для типов обмоток, указанных в § 48, эквивалентные схемы, изображенные на рис. 320, при вычерчивании которых приняты средние процентные соотношения различных потоков рассеяния. Как видно из рис. 320, а, наибольшую взаимную реактивность имеет генератор с обмотками, чередующимися через каждую впадину, в котором весь поток рассеяния лобовых частей является потоком взаимной индукции. Генераторы с обмотками, чередующимися через $q/2$ впадин, занимают промежуточное положение (рис. 320, б).

¹⁾ C. M. Laffoon. Increased Voltages for Synchronous Machines. Tr. A. I. E. E. 1930, стр. 213; 2) M. Schenkel. Génératrices à courant alternatif à haute tension et machines à courant continu à haute tension. Доклад на Междунар. электротехн. конгрессе, Paris, 1932, Секция 3, № 24; 3) C. A. Parsons and J. Rosen. J. I. E. E. 1929, стр. 1065. 4) F. Beldi. Gegenwärtiger Stand der Isolertechnik im Grossmaschinenbau, insbesondere bei hohen Spannungen. E. u. M. 1932, стр. 541.

Генераторы с обмотками, чередующимися пофазно, и с укорочением шага до $2/3 \tau$ не имеют взаимных потоков рассеяния (рис. 320, c). Вследствие насыщения зубцов при коротком замыкании реактивности отдельных обмоток (обусловленные потоком самоиндукции) уменьшаются (иногда до 0,4—0,5 своего значения), а взаимная реактивность увеличивается.

Для уменьшения трансформаторного действия наиболее выгоднейшей является машина с чередованием обмоток пофазно, однако, вследствие присущих ей других недостатков эта обмотка обычно не применяется; в практику вошла обмотка с чередованием через $q/2$ впадин. Взаимная реактивность получается тем меньше, чем в меньшем числе впадин встречаются проводники разных обмоток; последнее условие обычно удовлетворяется при укороченном шаге.

При неравномерной нагрузке обеих обмоток кривая м. д. с. реакции якоря сильно отличается от синусоиды, что соответствует появлению, наряду с основной гармоникой м. д. с., неподвижной относительно ротора, ряда высших гармоник, движущихся относительно ротора. Высшие гармоники м. д. с. индуктируют в роторе токи Фуко, вследствие чего температура ротора сильно повышается. Так как искажение кривой м. д. с., а следовательно, и нагрев ротора тем больше, чем больше неравномерность нагрузки обеих обмоток, то генератор с двумя обмотками не может давать полную мощность

при неодинаковой нагрузке обеих обмоток. Так, при одном из опытов с генератором, имеющим чередующиеся пофазно обмотки, было получено при нагрузке одной обмотки на 60% от полной мощности генератора, а другой на 40% повышение температуры ротора на 8°C, а статора на 15°C сверх температуры при той же полной мощности, но при равномерной нагрузке обеих обмоток. При нагрузках обмоток 55 и 45% температура как ротора, так и статора повысилась на 5°C. Если работает только одна обмотка, то генератор может давать около 60% своей мощности. Искажение кривой м. д. с. при неравномерной нагрузке получается наибольшее в машинах с обмотками, чередующимися пофазно, наименьшее — в машинах с обмотками, чередующимися через каждую впадину (§ 72). Для того чтобы удовлетворить одновременно и условию наименьшей взаимной реактивности, на практике применяют обычно промежуточный тип обмотки — с чередованием через $q/2$ впадин.

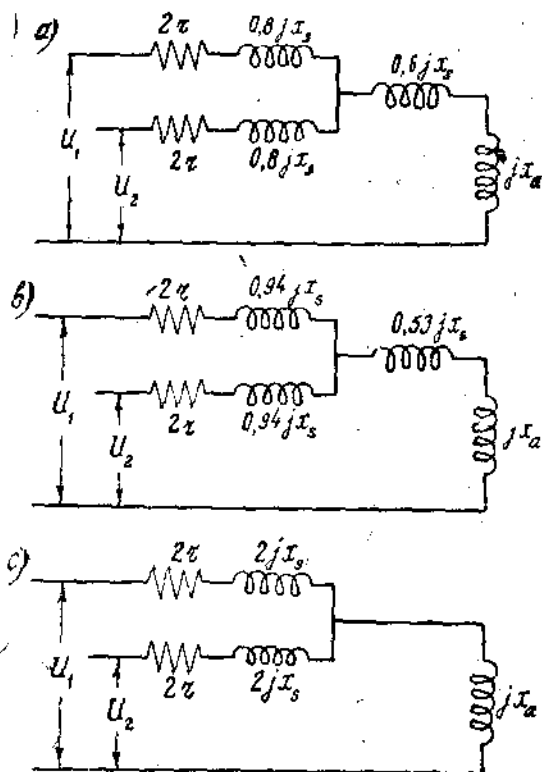


Рис. 320. Эквивалентные схемы генераторов с двумя обмотками: а) чередование обмоток через каждую впадину, б) чередование обмоток через $q/2$ впадин, в) чередование обмоток через q впадин при укорочении шага до $2/3 \tau$.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие	3

ВВЕДЕНИЕ

Подразделение электрических машин переменного тока (5). Синхронные машины (5). Области применения синхронных машин (6)	5-6

ГЛАВА I.

Основные законы электротехники в применении к синхронным машинам.

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея) (7). Правило правой ладони (7). Закон Био-Савара (8). Направление электромагнитной силы (9). Закон Ленца (9). Закон магнитной цепи (9). Свойства синусоиды (11). Построение синусоиды (11). Векторная диаграмма (12). Сдвиг фаз синусоидальных величин (13). Сумма синусоидальных величин (14). Разложение функций в ряд Фурье (14). Символический метод (15). Фазные и линейные значения напряжения и тока в многофазных системах (16). Мощность многофазной системы (16). Действующее значение и мощность при несинусоидальном изменении величин (16)	7-16

ГЛАВА II.

Принцип действия и конструктивное выполнение синхронных машин.

Принцип действия синхронной машины (17). Различные формы конструкции синхронных машин (19). Части синхронной машины (21). Возбудитель (21). Связь между частотой и скоростью вращения (21). Применяемые числа оборотов в минуту (21). Синхронные машины с явно выраженными полюсами (22). Синхронные машины с неявно выраженными полюсами (22). Связь между положением ротора относительно проводника и величиной электродвижущей силы в проводнике (23). Понятие об электрических градусах (24). Сдвиг проводников в пространстве и электродвижущих сил во времени (24). Получение многофазных токов (25). О мощности синхронных машин в kW и в kVA (25). О номинальных величинах (26)	17-26

ГЛАВА III.

Обмотки синхронных машин.

Общие замечания (27). Встречное и согласное соединение проводников (28). Виток (28). Катушка (28). Шаг витка и катушки (29). Встречное и согласное соединение витков и катушек (29). Активные и неактивные части обмоток (29). Классификация обмоток (30). Катушечные обмотки однофазных машин с целым числом впадин на полюс и фазу (30). Катушечные однослойные обмотки трехфазных машин с целым числом впадин на полюс и фазу (34). Катушечные двухслойные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу (38). Стержневые однослойные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу (40). Стержневые двухслойные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу (40). Обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу (45). Двойные обмотки (49). Параллельные ветви обмотки (51). Форма лобовых частей обмотки (52). Конструктивное выполнение обмоток (57)	27-57

ГЛАВА IV.

Электродвижущая сила синхронной машины.

Общие замечания (58). Электродвижущая сила одного проводника (58). Коэффициент формы поля (60). Электродвижущая сила витка и катушки (61). Электродви-

жущая сила двухполюсной машины при синусоидальном поле (62). Электродвижущая сила многополюсной машины при синусоидальном поле (64). Электродвижущая сила многополюсной машины при любом поле (65). Коэффициент укорочения шага обмотки (65). Коэффициент распределения обмотки (66). Обмоточный коэффициент (68). Соединение трехфазных обмоток звездой и треугольником (68). Высшие гармоники в кривой электродвижущей силы (71). Способы уничтожения высшей гармоники (73) 58—77

ГЛАВА V.

Реакция якоря многофазной синхронной машины.

Общие замечания (78). Разложение потока синхронной машины (78). Количественный учет влияния реакции якоря на работу синхронной машины (82). Магнитодвижущая сила катушки (82). Магнитодвижущая сила многокатушечной однофазной обмотки (84). Магнитодвижущая сила многофазной многокатушечной обмотки (86). Кривые магнитодвижущей силы обмоток с укороченным шагом и обмоток с дробным числом впадин на полюс и фазу (91). Кривые магнитодвижущей силы двойных обмоток (96). Поток реакции якоря многофазной машины с цилиндрическим ротором (97). Поток реакции якоря многофазной машины с явно выраженными полюсами (98). Влияние потока реакции якоря на результирующий поток между железного пространства (101). Поток рассеяния статора (102). Поток рассеяния полюсов (103) . . 78—104

ГЛАВА VI.

Диаграммы напряжения и характеристики синхронных машин.

Общие замечания (105). Изменение напряжения при нагрузке (105). Диаграмма ненасыщенной машины с цилиндрическим ротором (106). Диаграмма напряжения при коротком замыкании (108). Диаграмма Бен-Эшенбурга (110). Диаграмма Роттерта (111). Диаграмма Потье (112). Диаграмма Блонделя (113). Построение диаграммы напряжения (114). Построение диаграммы Бен-Эшенбурга (115). Построение диаграммы Потье (116). Построение диаграммы Блонделя (118). Диаграмма, рекомендованная Американским институтом инженеров-электриков (120). Диаграмма, рекомендованная шведскими нормами (122). Построение диаграммы Блонделя в относительных единицах (123). Практические замечания о применении диаграмм напряжения (126). Внешняя характеристика синхронной машины (127). Регулировочная характеристика синхронной машины (127). Нагрузочная характеристика синхронной машины (128). Характеристика короткого замыкания (129) 105—131

ГЛАВА VII.

Однофазные синхронные машины.

Общие замечания (132). Обмотки однофазных машин (132). Сравнение однофазной машины с трехфазной при одинаковой частоте (132). Реакция якоря однофазного синхронного генератора (134). Обратная синхронная составляющая потока реакции якоря однофазной машины (136). Разложение обратной синхронной составляющей на продольную и поперечную составляющие (137). Влияние продольной и поперечной пульсирующих составляющих обратной синхронной составляющей на работу однофазной синхронной машины (138). Уничтожение обратной синхронной составляющей (139). Учет реакции якоря в однофазном генераторе с успокоительной обмоткой (140). Диаграммы напряжения однофазного генератора с успокоительной обмоткой (141). Коэффициент полезного действия однофазных генераторов (141) 132—141

ГЛАВА VIII.

Параллельная (совместная) работа синхронных машин.

Общие замечания (142). Условия для параллельного включения синхронных машин (143). Уравнение для вращающихся моментов, действующих на ротор синхронной машины (143). Электромагнитный вращающийся момент синхронной машины (144). Электромагнитная мощность синхронной машины (150). Успокоительный момент (152). Величина успокоительного момента (153). Мощность и вращающийся момент, идущие на сообщение ротору ускорения (156). Мощность первичного двигателя (157). Вращающийся момент первичного двигателя (158). Уравнение движения ротора синхронной машины (159). Работа синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности (160). Зависимость электромагнитной мощности синхронной машины от угла δ (161). Влияние изменения возбуждения на параллельную работу синхронной

машины (162). Работа синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности при постоянном возбуждении и переменной электромагнитной мощности (165). Параллельная работа нескольких синхронных машин, сравнимых по мощности (166). Включение однофазных синхронных машин на параллельную работу (166). Включение трехфазных синхронных машин на параллельную работу (168). Несинхронное включение на параллельную работу (170). Реактивный вращающий момент (171) . . . 142—172

ГЛАВА IX.

Явления колебаний при параллельной работе синхронных машин.

Общие замечания (173). Свободные колебания синхронных машин (176). Явление свободных колебаний в реальной системе (179). Последствия свободных колебаний (180). Решение дифференциального уравнения движения ротора синхронной машины в случае свободных колебаний (182). Период свободных незатухающих колебаний (184). Период свободных затухающих колебаний (185). Вынужденные колебания (185). Решение уравнения движения генератора в случае вынужденных колебаний при работе его в одиночку (188). Максимальное допустимое отклонение ротора при работе генератора в одиночку (190). Вынужденные колебания генератора, работающего параллельно с другими (191). Допустимый угол отклонения при вынужденных колебаниях в случае параллельной работы синхронных машин (193). Колебания электрической мощности генератора (194). Влияние маховика на колебания ротора синхронного генератора (196). Применение успокоительной обмотки (197). Несинхронное включение синхронных машин на параллельную работу (198). Характеристики регуляторов скорости первичных двигателей (201). Процесс регулирования (203). Влияние регуляторов скорости на параллельную работу синхронных машин (204) . . . 173—205

ГЛАВА X.

Синхронный двигатель.

Принцип действия трехфазного синхронного двигателя (206). Диаграммы напряжения синхронного двигателя (208). Электромагнитный вращающий момент синхронного двигателя (210). Мощность синхронного двигателя (211). Зависимость электромагнитного момента синхронного двигателя от угла θ (213). Полезный вращающий момент синхронного двигателя (214). Опрокидывающий, или максимальный, вращающий момент синхронного двигателя (214). Синхронизирующая мощность синхронного двигателя (216). Влияние изменения тока возбуждения на работу синхронного двигателя (217). U-образные кривые синхронного двигателя (или кривые Mordey) (219). Применение синхронного двигателя для компенсации $\cos \varphi$ сети (220). Синхронный компенсатор (223). Пуск в ход синхронных двигателей (223). Пуск в ход синхронного двигателя при помощи постороннего двигателя (224). Пуск в ход синхронного двигателя при помощи индукционного двигателя, включенного последовательно со статором синхронного двигателя (225). Непосредственный пуск синхронного двигателя (226). Пуск при помощи вспомогательного генератора (226). Асинхронный пуск синхронных двигателей (227). Схемы включения для синхронного пуска синхронных двигателей (232). Рабочие характеристики трехфазного синхронного двигателя (233). Однофазный синхронный двигатель (234) . . . 206—234

ГЛАВА XI.

Симметричное короткое замыкание синхронной машины.

Общие замечания (235). Определения (236). Установившееся короткое замыкание на зажимах синхронной машины (237). Треугольник Потье (239). Характеристика короткого замыкания (240). Способ Рюденберга для определения установившегося тока короткого замыкания синхронной машины (240). Способ Foerster'a для определения установившегося тока короткого замыкания (242). Внезапное короткое замыкание (244). Свойства магнитных потоков, сцепленных с замкнутыми проводящими контурами (245). Соотношения между потоком сцепления и током (246). Изменение магнитных потоков, сцепляющихся с обмотками трехфазной синхронной машины, при внезапном коротком замыкании на зажимах машины (247). Величина начального тока трехполюсного короткого замыкания генератора с успокоительной обмоткой на роторе (256). Мгновенное переходное реактивное сопротивление обмотки статора (260). Влияние рассеяния ротора на ток короткого замыкания синхронного генератора с успокоительной обмоткой (261). Переходное реактивное сопротивление обмотки статора (262). Ударный ток машины, не снабженной успокоительной

обмоткой (263). Переходная электродвижущая сила (263). Формулы для подсчета ударного тока короткого замыкания (264). Уравнение для тока короткого замыкания (265). Декрементные кривые (267). Ток в обмотке возбуждения при коротком замыкании на зажимах статора (269). Последствия токов короткого замыкания (270). Вращающий момент при коротком замыкании (270). Механические усилия в лобовых частях обмоток (272). Тепловые действия токов короткого замыкания (274). Ударный ток при несинхронном включении машины на параллельную работу (274). Влияние параметров машины и конструкции ее на ток короткого замыкания (275) 235-278

ГЛАВА XII.

Несимметричные короткие замыкания синхронных машин.

Статистика коротких замыканий в системах (279). Метод симметричных составляющих (279). Сопротивление синхронной машины для тока положительной последовательности фаз (280). Сопротивление синхронной машины для токов отрицательной последовательности фаз (281). Сопротивление синхронной машины для токов нулевой последовательности фаз (283). Двухполюсное короткое замыкание на зажимах синхронной машины (285). Однополюсное короткое замыкание на зажимах синхронной машины (289). Вычисление токов при несимметричных коротких замыканиях (290). Ток в обмотке возбуждения при несимметричных коротких замыканиях (291) . . . 279-291

ГЛАВА XIII.

Параметры синхронных машин.

Синхронная реактивность (292). Реактивность рассеяния (293). Мгновенная переходная реактивность (296). Переходная реактивность (296). Реактивность для токов отрицательной последовательности фаз (299). Реактивность для токов нулевой последовательности фаз (300). Активное сопротивление обмотки статора (302). Постоянная времени обмотки статора (305). Постоянная времени обмотки возбуждения (307). Постоянная времени успокоительной обмотки (308). Ампер-витки реакции якоря (309). Нормальная характеристика холостого хода (309). Кратность тока короткого замыкания (310). Момент инерции вращающихся частей и маховой момент (310). Указатель литературы к главе XIII (313) 292-313

ГЛАВА XIV.

Конструктивное выполнение синхронных машин.

Общие замечания (314). Турбогенераторы (314). Гидрогенераторы (318). Генераторы для поршневых машин (324). Синхронные двигатели (324). Вентиляция синхронных машин (326). Водородное охлаждение (333). Применяемые напряжения (334). Турбогенераторы с двумя обмотками (334) 314-334