Лекция – 7

1 СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

1.1 ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Свое название синхронные электрические машины (генераторы и электродвигатели) получили благодаря тому, что в них положение магнитопровода ротора всегда совпадает с силовыми линиями вращающегося магнитного поля, т.е. ротор вращается *синхронно* с полем.

Вращающееся магнитное поле можно получить в двух- и трехфазных системах, т.е. только при числе фаз, не меньшем двух. Разность фаз для двухфазных систем с двумя перпендикулярными электромагнитами должна составлять 90°, а для трехфазных с тремя электромагнитами, направленными под углом 120° друг к другу, – 120°. Применение большего числа фаз на практике нецелесообразно, так как при необходимости те же результаты достигаются меньшими средствами при увеличении числа пар полюсов. Так, в результате совпадения осей, четырехфазная система при формировании вращающегося магнитного поля ничем не отличается от двухфазной.

На рисунке 1.19 представлена схема получения вращающегося магнитного поля в двухфазной системе. Направления вектора индукции магнитного поля в роторе в различные моменты времени *a…d* показаны стрелкой. На графике приведены зависимости двух фаз ϕ–1 и ϕ–2 токов в обмотках статора электродвигателя от времени. Разность фаз составляет 90°. В момент времени а ток в обмотках фазы ϕ–2 отсутствует, поэтому магнитное поле формируется только обмотками фазы ϕ–1. Допустим, его направление совпадает с указанным стрелкой. В момент времени с, когда ток в фазе ϕ–1 изменит свой знак, это направление изменится на противоположное. В момент времени *a′* токи в обеих фазах равны, вектор магнитной индукции в роторе занимает среднее положение между полями, создаваемыми обмотками отдельных фаз, т.е. повернется на 45°. Модуль векторной суммы индукции магнитных полей обмоток двух фаз равен модулю индукции обмоток отдельной фазы. С течением времени в момент *b* нулевым будет ток в обмотках фазы ϕ–1, магнитное поле будет создаваться только обмотками фазы ϕ–2, а его направление изменится еще на 45°. В дальнейшем вращение вектора магнитной

индукции в роторе будет продолжаться. Полный оборот совершается за один период тока в сети. Очевидно, что при питании синусоидальным напряжением с разностью фаз 90° и перпендикулярном расположении полюсов статора магнит-ное поле вращается равномерно, а модуль вектора магнитной индукции не меня-ется во времени.

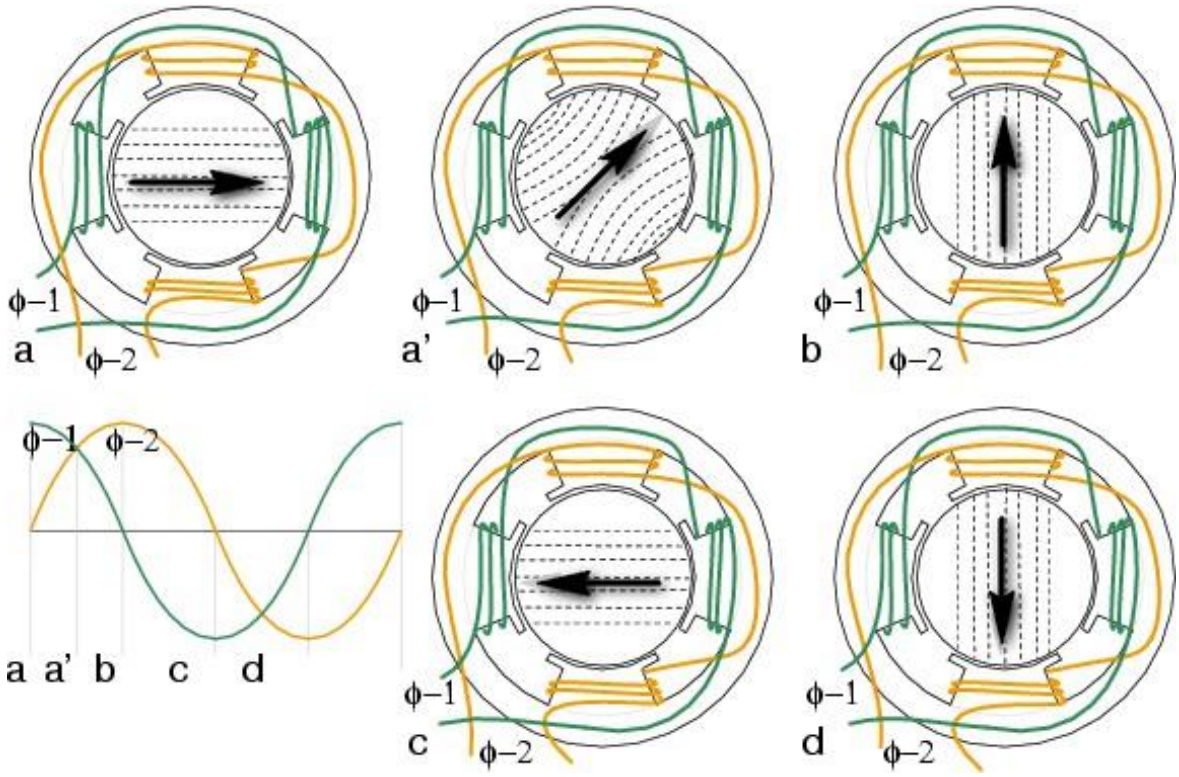


Рис. 1.19. Схема получения вращающегося магнитного поля в двухфазной системе

Двухфазные электрические сети применялись в начале XX века, однако были вытеснены более эффективными трехфазными. Для трехфазной электрической сети требуются линии с меньшей массой проводов при том же самом напряжении и большей передаваемой мощности, в сравнении с двухфазной четырехпроводной системой. Трехфазная сеть создает меньше внешних магнитных полей. Эти преимущества трехфазной сети связаны с тем, что сумма токов всех фаз при симметричной нагрузке всегда равна нулю. Электрические машины переменного тока с расположением обмоток согласно рис. 1.19 широко применяются и в настоящее время. Это однофазные асинхронные электродвигатели, реверсивные электродвигатели систем автоматического регулирования.

Аналогично двухфазной системе трехфазная обмотка машины переменного тока создает круговое равномерно вращающееся магнитное поле только при одновременном выполнении трех условий:

- оси обмоток фаз сдвинуты в пространстве на 120°;
- токи в обмотках фаз также сдвинуты на 120°;
- ток (напряжение) сети изменяется по гармоническому закону.

Трехфазную обмотку статора в машинах переменного тока выполняют в виде трех групп катушек, смещенных в пространстве на 120°. На рисунке 1.20 показана обмотка статора, в которой все витки каждой фазы сосредоточены в одной катушке, лежащей в двух диаметрально расположенных пазах, где буквами *A, B, C* условно обозначены начала, а буквами *X, Y, Z* – соответствующие концы обмо-ток фаз. Обмотки могут быть соединены звездой или треугольником и подключа-ются к трехфазному источнику ЭДС. В случае недостатка знаний по трехфазным цепям переменного тока рекомендуем воспользоваться учебниками по электро-технике, например, [6].

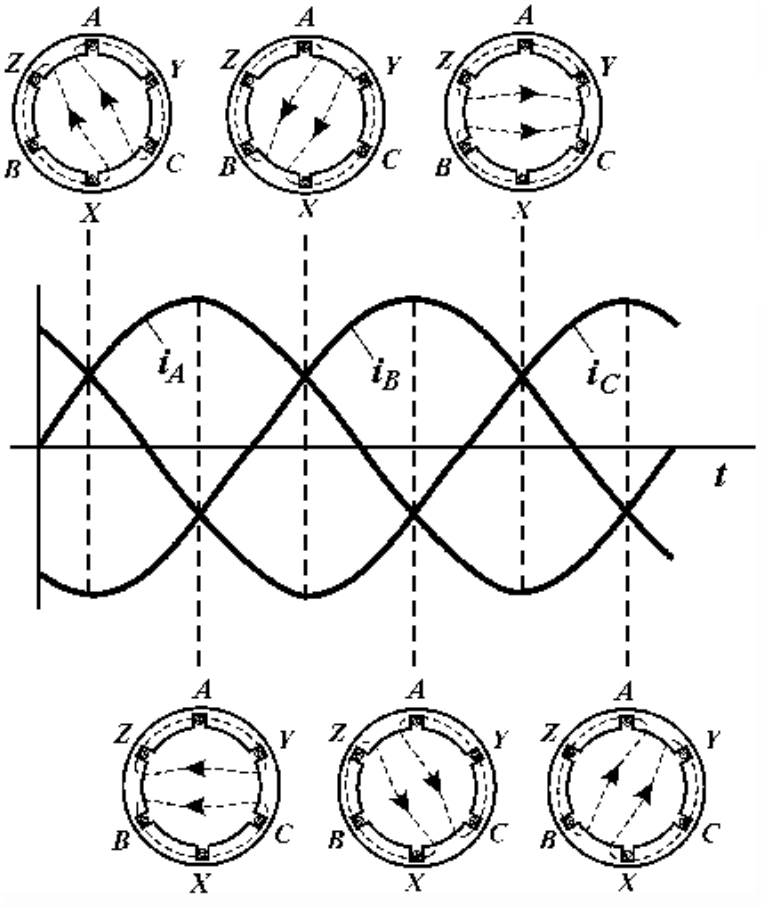


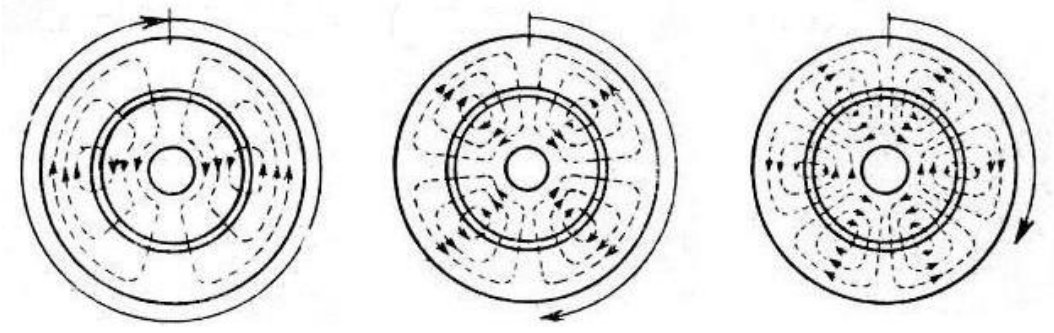
Рис. 1.20. Схема получения вращающегося магнитного поля в трехфазной системе

Вращение магнитного поля в трехфазной системе формируется аналогично тому, как это происходит в двухфазной. На рисунке 1.20 изображены схемы силовых линий магнитного поля статора в различные моменты времени, соответствующие временной диаграмме токов в фазах А, В и С.

1.2 ЧИСЛО ПАР ПОЛЮСОВ И ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ

Подобно магнитному полю машины постоянного тока, вращающееся поле может быть двухполюсным, четырехполюсным, шестиполюсным и т.д. Иначе говоря, машина переменного тока может иметь одну, две, три и более пар полюсов. Число пар полюсов вращающегося поля полностью определяется устройством создающей его обмотки статора. По прошествии одного периода изменения тока вращающееся поле оказывается переместившимся так, что картина его распределения в пространстве становится точно такой же, как и в начале этого периода.

На рисунке 1.21 изображены вращающиеся поля с одной, двумя и тремя парами полюсов. Рядом с ними дугообразными стрелками отмечены те углы, на которые надо повернуть картины этих полей для того, чтобы новое положение по распределению поля ничем не отличалось от исходного. В то время как двухполюсное поле надо повернуть для этой цели на полный оборот, четырехполюсное поле – только на полоборота, а шестиполюсное – всего лишь на одну треть оборота. Поэтому частота вращения в синхронном электродвигателе с одной парой полюсов совпадает с частотой тока в сети, с двумя – в два раза, а с тремя – в три раза меньше последней.



а) *б*) *в*)

Рис. 1.21. Вращающиеся магнитные поля с различными числами пар полюсов:

а – одной; *б* – двумя; *в* – тремя

Частота вращения магнитного поля носит еще название синхронной скорости. Этот термин применяют как для синхронных, так и для асинхронных машин переменного тока.

Синхронная скорость в оборотах в минуту для двигателя с одной парой полюсов, включенного в сеть частотой 50 Гц, составляет 3000 об/мин, с двумя – 1500 об/мин, с тремя – 1000 об/мин, с четырьмя – 750 об/мин. Следовательно, число пар полюсов можно определить непосредственно по документации на син-хронный электродвигатель или шильдику (табличке с типом и основными пара-метрами), размещенным на его корпусе. Аналогично можно определить число пар полюсов и асинхронного электродвигателя с учетом того, что частоты вращения немного (не более чем на 5%) меньше указанных, так как асинхронные электро-двигатели работают со *скольжением*.

1.3 УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Устройство синхронных машин переменного тока противоположно устройству машин постоянного тока. По этой причине некоторые вентильные электродвигатели сложно однозначно отнести к тому или иному типу электрических машин. Синхронные машины также являются обратимыми, т.е. могут работать как в режиме генератора, так и в режиме электродвигателя. В них статор является якорем, а ротор – индуктором. Коммутация в синхронных машинах или не требуется, так как питание осуществляется от сети переменного тока, или реализуется в электронном блоке (в вентильных электродвигателях и сервоприводах).

Устройство магнитопровода статора синхронных и асинхронных машин одинаково (рис. 1.22). Статор представляет собой полый цилиндр *1*, набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности этого цилиндра выштампованы пазы для укладки обмотки якоря *2*. При внешнем диаметре менее 1 м его собирают из цельных кольцевых пластин, а при большем диаметре каждый кольцевой слой составляют из отдельных сегментов [11].

Ротор синхронной машины – это система постоянного тока, поэтому его магнитопровод может выполняться как массивным, выполненным из цельной поковки высокопрочной легированной стали, так и шихтованным, набранным из от-

дельных пластин подобно статору. Обмотка *4* ротора, питающаяся от источника постоянного тока, является однофазной и называется обмоткой возбуждения. При подключении этой обмотки к источнику двигатель возбуждается – в нем наводится магнитное поле. Для подвода электрической энергии к обмотке возбуждения используют кольца *5* со щетками. Такой вариант подвода энергии к движущимся частям машины значительно более надежен, чем коллекторно-щеточный узел, так как здесь отсутствует непрерывная коммутация обмоток и протекает постоянный ток, а не импульсный.

Для работы синхронного двигателя,

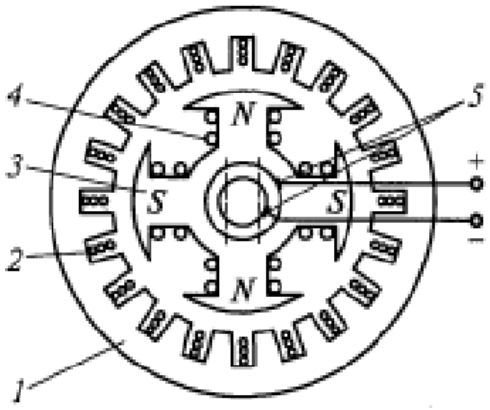


Рис. 1.22. Конструктивная схема синхронной машины:

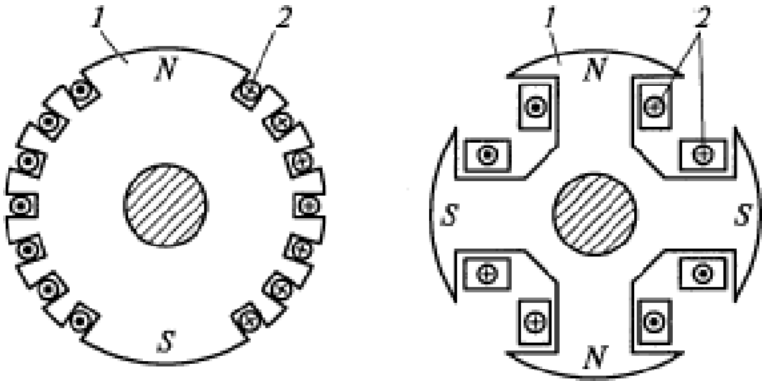
1 – якорь; *2* – обмотка якоря; *3* – полюсы индуктора; *4* – обмотка возбуждения; *5* – контактные кольца со щетками

помимо трехфазного переменного тока, требуется еще и постоянный ток. Исключение составляют синхронные двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами. Но обычно это двигатели малой мощности. В качестве источника постоянного тока в современных синхронных двигателях с электромагнитным возбуждением обычно используется тиристорный возбудитель (тиристорный управляемый выпрямитель) [9].

В зависимости от конструкции магнитопровода ротора синхронные машины делятся на четыре класса:

- явнополюсные;
- неявнополюсные;
- возбуждаемые постоянными магнитами;
- реактивные.

Ротор явнополюсных синхронных машин имеет выступающие полюсы (рис. 1.22, рис. 1.23, *б*). Магнитопроводы полюсов для машин большой мощности шихтуются из пластин конструкционной стали толщиной 1...2 мм, а для машин небольшой мощности – из пластин электротехнической стали толщиной 0,5...1 мм [9].



а) *б*)

Рис. 1.23. Поперечные разрезы роторов неявнополюсной (*а*) и явнополюсной (*б*) синхронных машин:

1 – магнитопровод; *2* – обмотка возбуждения

На полюсах ротора часто устанавливают демпферную обмотку, размещая ее в пазах полюсных наконечников. Медные или латунные стержни этой обмотки по торцам замыкают сегментами таким образом, чтобы образовалась короткозамкну-

тая клетка. Демпферная обмотка выполняет ряд функций. В генераторах она ослабляет влияние токов обратной последовательности при несимметричной нагрузке и уменьшает пульсации магнитного потока, вызванные зубчатостью статора. В двигателях она выполняет функции пусковой (при асинхронном пуске) и успокоительной (уменьшает амплитуду качаний ротора при изменении нагрузки) обмотки [9].

Неявнополюсные роторы (рис. 1.23, *а*) применяют в высокоскоростных (1500 или 3000 об/мин) синхронных машинах большой мощности, так как при большой мощности применение машин явнополюсной конструкции невозможно по условиям механической прочности ротора. Неявнополюсные роторы имеют быстроходные синхронные двигатели большой мощности – турбодвигатели и синхронные неявнополюсные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с паровыми и газовыми турбинами – турбогенераторы [9].

Неявнополюсный ротор изготовляют из цельной поковки высокопрочной стали. По условиям сохранения механической прочности ротора его диаметр при частоте вращения 3000 об/мин не должен превышать 1200...1250 мм. На наружной поверхности ротора фрезеруют прямоугольные пазы, в которые укладывают обмотку возбуждения (см. рис. 1.23, *а*). Примерно на одной трети полюсного деления обмотку не укладывают, и эта часть образует так называемый большой зубец, через который проходит основная часть магнитного потока возбуждения [9].

Синхронные машины большой и средней мощности, а также большинство машин малой мощности имеют электромагнитное возбуждение. Однако по мере совершенствования магнитотвердых материалов для возбуждения синхронных машин все шире применяются постоянные магниты.

Явнополюсная синхронная машина развивает момент даже при отсутствии тока возбуждения – за счет реактивного момента (см. рис. 1.25). Это свойство синхронной машины легло в основу создания синхронных электроприводов без возбуждения на базе синхронных реактивных двигателей [8].

Система электромагнитного возбуждения должна обеспечивать достаточно быстрое, надежное и устойчивое регулирование тока возбуждения в любых режимах работы машины. Для увеличения быстродействия регулирования в ава-

рийных режимах работы применяется форсировка возбуждения, т.е. быстрое увеличение напряжения возбуждения до предельного значения, равного 1,8...2,0 номинального напряжения возбуждения. Кроме того, система возбуждения должна обеспечивать быстрое гашение магнитного поля, т.е. уменьшение тока возбуждения до нуля без значительных перенапряжений на обмотках. Необходимость в гашении поля возникает при аварийном отключении машины или обнаружении повреждения в ней [9].

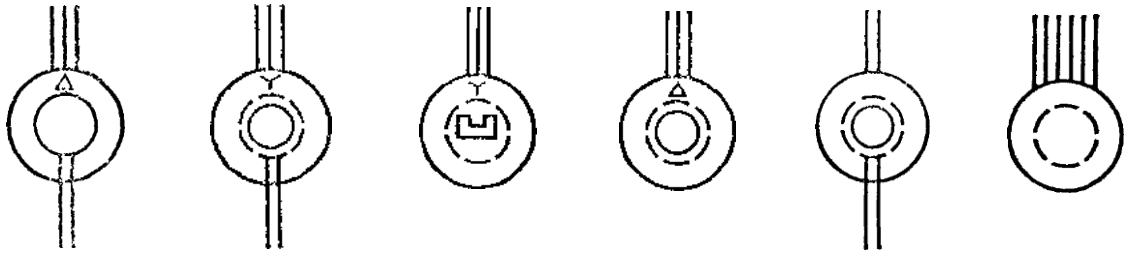
В синхронных машинах применяется несколько систем возбуждения. Простейшей из них является электромашинная система, в которой в качестве источника возбуждения используют специальный генератор постоянного тока, называемый возбудителем, вал которого приводится во вращение от вала синхронной машины [9].

В настоящее время все большее применение получают вентильные системы возбуждения, которые могут рассчитываться на большие мощности и являются при этом более надежными, чем электромашинные. Для синхронных генераторов различают три вида вентильных систем возбуждения: систему с самовозбуждением; независимую систему возбуждения; бесщеточную систему возбуждения [9].

В последнее время синхронные двигатели мощностью от 30 до 200 кВт стали исполняться бесконтактными с обмоткой возбуждения, специальным образом располагаемой на статоре вместе с трехфазной обмоткой. Ротор в этом случае представляет собой безобмоточное зубчатое колесо, через которое замыкается магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения и переменного тока. Вращается он синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой. Обмотка возбуждения усиливает магнитный поток и тем самым увеличивает вращающий момент двигателя [5].

На рисунке 1.24 представлены упрощенные условные графические обозначения синхронных электрических машин [15]. На рисунке 1.24, *а – г* показаны обозначения трехфазных синхронных электрических машин. Знаками «Δ» и «Y» показано соединение трехфазных обмоток в треугольник или звезду, соответственно [6]. На рисунке 1.24, *д* показано обозначение однофазной явнополюсной машины с обмоткой возбуждения и успокоительной или пусковой обмоткой на

роторе, на рис. 1.24, *е* – индукторной машины с двумя обмотками переменного тока и одной обмоткой постоянного тока на статоре. Короткозамкнутая обмотка обозначается кольцом, к которому не подключены провода, неявнополюсная обмотка возбуждения – кольцом, к которому подсоединены два провода, подводящие постоянное напряжение, явнополюсная – кольцом, выполненным штриховыми линиями. Так, на рис. 1.24, *б* приведен пример обозначения синхронной машины с явнополюсной обмоткой возбуждения и с пусковой короткозамкнутой обмоткой, на рис. 1.24, *в* – синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов.



а) *б*) *в*) *г*) *д*) *е*)

Рис. 1.24. Упрощенные условные графические обозначения синхронных электрических машин

1.4РАБОТА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Без учета подробностей принцип работы синхронного электродвигателя довольно прост. Статор, подключенный к цепи переменного тока, создает вращающиеся магнитное поле (см. пп. 1.2.1, 1.2.2), а ротор непрерывно поворачивается так, чтобы его магнитное поле совпадало с полем статора.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих при работе синхронного электродвигателя, сравним его с двигателями постоянного тока.

В отличие от всех других двигателей, синхронные имеют абсолютно жесткую механическую характеристику (см. рис. 1.2, *б*, линия *1*). Частота вращения ротора всегда совпадает с частотой вращения магнитного поля статора независимо от момента нагрузки на валу. Уменьшение частоты вращения до нуля (выпадение из синхронизма) возможно при превышении моментом критического значения. При этом возникают недопустимые колебания тока и вращающего момента, двигатель необходимо отключить от сети.

Несмотря на постоянство частоты вращения при изменении нагрузки на валу синхронного двигателя в его работе происходят изменения – меняется *внутренний угол поворота ротора* θ, т.е. угол сдвига между осью магнитного поля, созданного обмотками статора синхронного двигателя, и осью его полюсов, т.е. магнитного поля ротора. Другая интерпретация внутреннего угла поворота ротора – это угол сдвига между вектором ЭДС, наводимой ротором в обмотках статора, и вектором фазного напряжения питающей сети. Для синхронных машин вместо механической характеристики для количественного определения изменений, происходящих в их работе при изменении момента, удобно использовать *угловую характеристику* – зависимость $M(\theta)$ момента на валу от внутреннего угла поворота.

Электромагнитный момент синхронной явнополюсной машины состоит из двух составляющих, первая из которых представляет электромагнитный момент M_1, возникающий в результате взаимодействия полей статора и ротора, а вторая – реактивный момент M_2, возникающий из-за несимметрии магнитной цепи машины и связанного с ней стремления ротора ориентироваться по оси поля статора. Угловая характеристика $M(\theta)$ синхронной машины с явнополюсным ротором приведена на рис. 1.25. Ее анализ показывает, что увеличение угла θ на начальном участке вызывает рост электромагнитного момента, близкий к линейному. При номинальном электромагнитном моменте угол θ обычно составляет 20...30° [8].

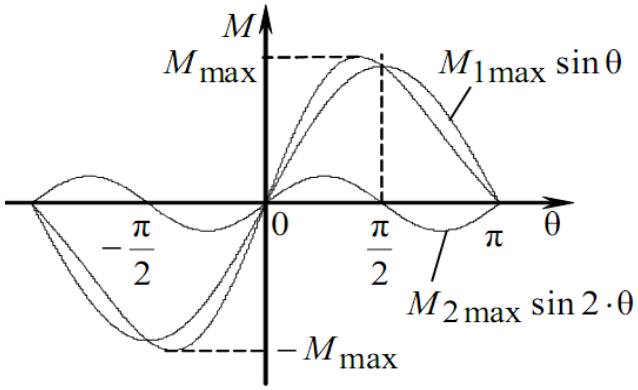


Рис. 1.25. Угловая характеристика явнополюсного синхронного двигателя

Неявнополюсный синхронный электродвигатель не имеет выраженных полюсов, следовательно, в нем не формируется реактивный момент M_2. Поэтому максимального значения момент неявнополюсного синхронного двигателя достигает при внутреннем угле поворота ротора $\theta = \pi/2$. При бóльших значениях угла синхронный двигатель выпадает из синхронизма.

При угле $\theta = 0$ магнитные поля ротора и статора совпадают, нет движущей силы, которая стремится повернуть ротор, поэтому вращающий момент равен нулю. Достижение моментом M_2 максимального значения при угле $\theta = \pi/2$ становится понятным, если обратиться к рис. 1.5. Это угол максимального рассогласования направлений полей ротора и статора. В электродвигателях постоянного тока он за счет коллекторно-щеточного узла всегда поддерживается равным $\pi/2$.

Максимальный момент M_{max} характеризует перегрузочную способность синхронного двигателя. Перегрузочная способность синхронной машины с явнополюсным ротором, т.е. отношение максимального момента к номинальному, составляет 2...3.

Синхронные электрические машины являются обратимыми, поэтому они так же, как и машины постоянного тока непрерывно работают и как генераторы, и как электродвигатели. Если сравнить электрические машины постоянного тока с синхронными, то можно прийти к следующим выводам:

– в машинах постоянного тока постоянен угол сдвига магнитных полей статора и ротора, изменяется скорость вращения, ЭДС, индуцируемая в якоре индуктором, постоянна по направлению, но по модулю зависит от скорости вращения;

– в синхронных машинах угол сдвига магнитных полей изменяется при неизменной скорости вращения, ЭДС, индуцируемая в якоре индуктором, постоянна по модулю, но ее направление зависит от внутреннего угла поворота ротора θ.

Реакцией на появление нагрузки на валу в двигателе постоянного тока является снижение скорости, обеспечивающее уменьшение ЭДС индукции, появление тока якоря и формирование вращающего момента (см. п. 1.1.3), в синхронном двигателе – отклонение угла θ от нулевого значения, обеспечивающее возникновение вращающего момента. Увеличение потребления тока при увеличении нагрузки на валу в двигателе постоянного тока происходит за счет снижения уменьшения ЭДС индукции относительно напряжения питания, в синхронных электродвигателях – за счет сдвига фазы ЭДС индукции относительно фазы напряжения питания. На холостом ходу в синхронном двигателе ЭДС индукции почти совпадает по фазе с напряжением питания и равна ей по модулю, поэтому двигатель почти не потребляет энергии.

В современных условиях, когда наиболее перспективным является использование вентильного электродвигателя, конструкция электродвигателя постоянного тока может быть подобна конструкции синхронного электродвигателя. При этом вентильный электродвигатель с позиционным управлением по характери-стикам соответствует двигателю постоянного тока, а двигатель с частотным управлением – синхронному (см. п. 1.1.15). Все большее распространение находят сервоприводы на базе синхронных и шаговых электродвигателей с частотным управлением. Такие приводы широко применяются в микромехатронных систе-мах бытовой техники и персональных компьютеров.

1.5ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

По сравнению с асинхронными двигателями синхронные имеют более сложную конструкцию и, следовательно, их стоимость выше. Однако эти двигатели обладают способностью оказывать энергосберегающее влияние на участке электрической сети, в котором они работают. Дело в том, что если у работающего синхронного двигателя постепенно увеличивать ток в обмотке возбуждения, то

будет уменьшаться реактивная (индуктивная) составляющая тока статора. В результате будет уменьшаться угол фазового сдвига между током статора двигателя и напряжением сети. При некотором значении тока в обмотке возбуждения синхронного двигателя реактивная составляющая тока статора уменьшится до нуля, ток статора станет чисто активным и коэффициент мощности синхронного двигателя cosφ = 1. Если продолжать увеличение тока возбуждения (перевозбуждать двигатель), то реактивная составляющая тока статора вновь появится, но теперь она будет опережать по фазе напряжение, т.е. станет емкостной [9].

Асинхронные двигатели, трансформаторы и другие виды электромагнитных нагрузок создают в цепях переменного тока значительные индуктивные токи. Это приводит к снижению коэффициента мощности участка сети, в который включены эти устройства. В результате сила тока на этом участке сети увеличивается (за счет индуктивной составляющей), а потери, величина которых пропорциональна квадрату тока, возрастает. Включение в цепь с индуктивной нагрузкой синхронного электродвигателя с емкостной нагрузкой позволяет частично или полностью скомпенсировать реактивную составляющую тока потребления и снизить потери.

В некоторых случаях для повышения коэффициента мощности в сети применяют синхронные компенсаторы СК, представляющие собой перевозбужденные синхронные двигатели специальной конструкции, работающие без нагрузки на валу. Синхронный компенсатор фактически используется как генератор реактивной мощности. Применяют синхронные компенсаторы для повышения коэффициента мощности (для уменьшения потерь мощности) на участках сетей со значительной электромагнитной нагрузкой (например, сети крупного промышленного предприятия с большим количеством трансформаторов и асинхронных двигателей), так как мощность изготавливаемых синхронных компенсаторов значительна и составляет от 16 до 160 МВ·А. Обычно коэффициент мощности повышают до значений, близких к единице, например до 0,95, что дает значительный эффект энергосбережения. Стремление увеличить коэффициент мощности до cosφ = 1 ведет к значительному росту требуемой мощности синхронного компен-сатора, и следовательно, капитальных затрат. Например, для повышения cosφ с 0,7 до 0,95 при мощности потребителя 100 МВ·А требуется синхронный компен-

сатор мощностью 31 МВ·А. Для доведения коэффициента мощности этой сети до cosφ = 1 требуется синхронный компенсатор мощностью 55 МВ·А, что в 1,8 раза больше [9].

Вращающий момент на валу синхронного электродвигателя пропорционален напряжению сети в первой степени, в то время как момент асинхронного электродвигателя пропорционален его квадрату. Это обусловливает более надежную работу синхронных двигателей при снижении напряжения питания. Кроме того, синхронный электродвигатель имеет возможность компенсации снижения напряжения питания статора путем увеличения тока возбуждения ротора.

К другим достоинствам синхронных электродвигателей относятся:

– современные синхронные двигатели имеют высокий КПД, составляющий 96 – 98%, что на 1–2% выше КПД асинхронных двигателей той же мощности;

– синхронный двигатель обладает абсолютно жесткой механической характеристикой, что позволяет стабилизировать частоту вращения и определять пройденное угловое перемещение без применения датчиков положения;

– большой воздушный зазор в синхронных двигателях обеспечивает простоту охлаждения внешним вентилятором;

– особенности конструкции синхронных двигателей позволяют изготавливать их на мощности в десятки мегаватт.

Синхронные машины наиболее перспективные электромеханические преобразователи энергии, и их применение в сервоприводах мехатронных систем непрерывно расширяется.

К недостаткам синхронных двигателей следует отнести сложность конструкции ротора по сравнению с асинхронными двигателями и сложность пуска.

Кроме того, к недостаткам синхронных двигателей следует отнести сложность переходных процессов при изменении нагрузки на валу. Угловая характеристика, представленная на рис. 1.25, на начальном участке по сути является графиком зависимости момента упругого элемента от угла закручивания, т.е. ротор двигателя, обладающей моментом инерции, ведет себя как маятник на спиральной пружине. Эта особенность обусловливает высокую степень колебательности переходных процессов и сложность управления двигателем. Для уменьшения колебаний ротора применяют короткозамкнутую успокоительную обмотку, укладываемую в его пазах.

1.6ПУСК И ТОРМОЖЕНИЕ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В отличие от асинхронных синхронные двигатели при включении в сеть не создают пускового момента, так как ротор двигателя по причине своей инерционности не может мгновенно достичь синхронной скорости вращения. Поэтому при пуске синхронного двигателя между полюсами возбужденного неподвижного ротора и вращающимся полем статора не появляется устойчивой магнитной связи, необходимой для возникновения пускового момента.

Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести его ротор во вращение до скорости, близкой (95%) к синхронной. Существует два способа пуска синхронных двигателей.

Синхронный пуск осуществляется с помощью дополнительного разгонного двигателя, находящегося на одном валу с ротором СД, который заставляет ротор вращаться. Этот способ используется только при холостом ходе синхронного двигателя и в настоящее время почти не применяется.

Наиболее удобен асинхронный пуск синхронных электродвигателей. Для этого при явнополюсном роторе в полюсные наконечники закладывается короткозамкнутая пусковая обмотка из медных или латунных стержней. Она напоминает беличье колесо асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора.

Асинхронный пуск двигателя состоит из двух этапов: асинхронный набор частоты вращения при отсутствии возбуждения постоянным током и втягивание в синхронизм после включения постоянного тока возбуждения. Во время первого этапа обмотку возбуждения отключают от источника постоянного тока и замыкают на резистор сопротивлением в 6…10 раз выше сопротивления обмотки возбуждения. Это необходимо в связи с тем, что в разомкнутой обмотке может индуктироваться значительная ЭДС, опасная для целостности изоляции. Двигатель становится как бы асинхронным (см. раздел 1.3), и под действием асинхронного момента скорость ротора удается довести примерно до 95% синхронной. После того, как ротор разогнался, обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока. Возникает синхронный электромагнитный момент, машина втягивается в

синхронизм, т.е. ротор и поле статора вращаются синхронно [6, 8 – 11].

Торможение синхронного двигателя возможно переводом его в генераторный режим с применением динамического торможения. В этом случае обмотку статора двигателя отключают от сети и замыкают на резисторы. Ротор, вращаясь по инерции, своим магнитным потоком индуцирует в обмотке статора ЭДС. Так как эта обмотка замкнута, то в ней появляются токи, величина которых ограничивается сопротивлением резисторов. Возникающий при этом на роторе электромагнитный момент, как и в любом генераторе, является тормозящим и способствует быстрой остановке ротора [9].

1.7ШАГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Одним из видов синхронных электродвигателей являются шаговые. Такое название они получили благодаря тому, что их вал обычно совершает дискретное перемещение на заданный угол (шаг) под действием управляющих импульсов, подаваемых на обмотки статора. Эти двигатели являются синхронными благодаря тому, что ротор отслеживает магнитное поле, создаваемое обмотками. В результате этого шаговые двигатели позволяют без применения датчиков положения обеспечить точное позиционирование вала и рабочего органа путем подачи заданного числа импульсов. Этим и обусловлено их широкое применение в мехатронных устройствах различного размера и назначения: от микромехатронных устройств бытового назначения (CD-ROM, принтеры) до промышленных станков.

К достоинствам шаговых двигателей следует отнести:

- высокую точность до 3% от величины шага при 200 шагах на оборот;
- отсутствие мультипликативной погрешности позиционирования;
- возможность быстрого старта, остановки или реверсирования;
- возможность получения низких скоростей вращения без редуктора;
- высокая надежность и безопасность, связанная с отсутствием щеток.

Недостатками шаговых двигателей являются:

- шаговым двигателям, как и другим синхронным, присуще явление резонанса (см. п. 1.2.5);
- возможна потеря контроля положения при работе без обратной связи, связанная, например, с превышением максимально допустимого момента нагруз-

ки на валу;

– без нагрузки в режиме торможения потребление энергии не меньше, чем при совершении работы;

– затруднена работа на высоких скоростях;

– невысокая удельная мощность;

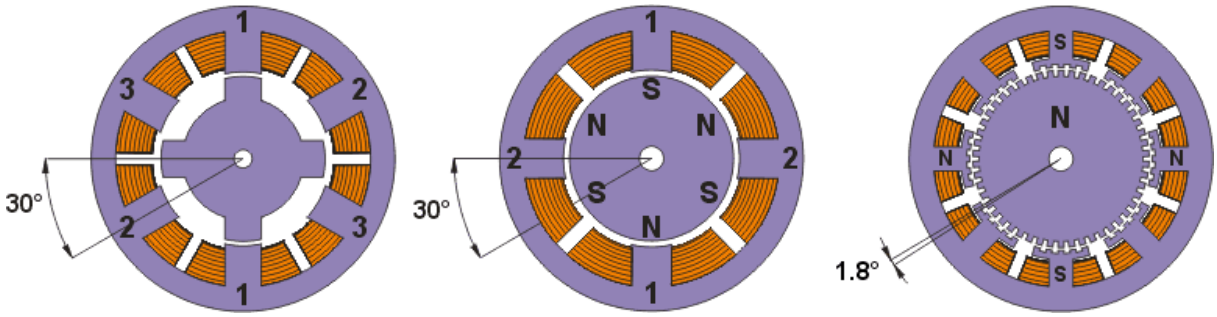
– относительно сложная схема управления.

Существование подобных недостатков приводит к необходимости использования сервоприводов с энкодерами (см. пп. 1.1.14, 1.1.15) вместо шаговых двигателей. Системы с обратной связью способны работать с большими ускорениями и при переменном характере нагрузки. Если нагрузка шагового двигателя превысит его момент, то информация о положении ротора теряется и система требует базирования с помощью, например, концевого выключателя или другого датчика. Системы с обратной связью не имеют подобного недостатка.

При проектировании конкретных систем приходится делать выбор между сервомотором и шаговым двигателем. Когда требуется прецизионное позиционирование и точное управление скоростью, а требуемый момент и скорость не выходят за допустимые пределы, то шаговый двигатель является наиболее экономичным решением. Как и для обычных двигателей, для повышения момента может быть использован понижающий редуктор. Однако для шаговых двигателей редуктор не всегда подходит. В отличие от коллекторных двигателей, у которых момент растет с увеличением скорости, шаговый двигатель имеет больший момент на низких скоростях. К тому же, шаговые двигатели имеют гораздо мень-шую максимальную скорость по сравнению с коллекторными двигателями, что ограничивает максимальное передаточное число и, соответственно, увеличение момента с помощью редуктора. Готовые шаговые двигатели с редукторами хотя и существуют, однако являются экзотикой. Еще одним фактом, ограничивающим применение редуктора, является присущий ему люфт. Коллекторный двигатель имеет более высокую удельную мощность, низкую стоимость, простую схему управления, и вместе с одноступенчатым червячным редуктором он способен обеспечить тот же диапазон скоростей, что и шаговый двигатель. К тому же, при этом обеспечивается значительно больший момент [16].

Явнополюсный ротор шагового двигателя может быть активным или реак-

тивным. Активный ротор шагового двигателя имеет обмотку возбуждения постоянного тока, контактные кольца и щетки или же выполняется в виде постоянного магнита с полюсами чередующейся полярности. Реактивный ротор выполняется без обмотки возбуждения с явно выраженными ненамагниченными полюсами. Число полюсов ротора в два раза меньше числа полюсов статора [9]. Также отдельно можно выделить гибридные двигатели, являющиеся разновидностью двигателей с активным ротором (см. рис. 1.26) [16].



а) *б*) *в*)

Рис. 1.26. Схемы шаговых электродвигателей различных типов:
а – с реактивным ротором; *б* – с активным ротором; *в* – гибридный

Определить тип двигателя можно внешним осмотром. При вращении вала обесточенного двигателя с постоянными магнитами (или гибридного) чувствуется переменное сопротивление вращению, двигатель вращается как бы щелчками. Вал обесточенных двигателей с реактивным ротором и двигателей с обмотками возбуждения вращается свободно. У двигателя с реактивным ротором нет выво-дов обмотки возбуждения, но обычно он имеют три (реже четыре) обмотки с од-ним общим выводом. Двигатели с активным ротором могут иметь обмотку возбуждения и чаще всего имеют две независимые обмотки статора. Эти обмотки могут быть снабжены отводом от середины. Иногда двигатели с активным ротором имеют 4 раздельных обмотки [16].

Шаговые двигатели с реактивным ротором имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала (рис. 1.26, *а*). Намагниченность ротора отсутствует. На рисунке 1.26, *а* ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из кото-рых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг

30° [16].

При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять положе-ние, когда магнитный поток замкнут, т.е. зубцы ротора будут находиться напро-тив тех полюсов, на которых находится запитанная обмотка. Если затем выклю-чить эту обмотку и включить следующую, то ротор поменяет положение, снова замкнув своими зубцами магнитный поток. Таким образом, чтобы осуществить непрерывное вращение, нужно включать фазы попеременно. Двигатель не чувст-вителен к направлению тока в обмотках. Реальный двигатель может иметь боль-шее количество полюсов статора и большее количество зубцов ротора, что соот-ветствует большему количеству шагов на оборот. Иногда поверхность каждого полюса статора выполняют зубчатой, что вместе с соответствующими зубцами ротора обеспечивает очень маленькие значения угла шага, порядка нескольких градусов. Двигатели с реактивным ротором довольно редко используют в индуст-риальных применениях [16].

Двигатели с активным ротором состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 1.26, *б*). Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается больший магнитный поток и, как следствие, больший момент, чем у двигателей с реактив-ным ротором [16].

На рисунке 1.26, *б* двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полю-сов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намо-тана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет вели-чину шага 30°. При протекании тока в одной из катушек ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно. На практике двигатели с постоянными магнии-тами обычно имеют 24 или 48 шагов на оборот (15° или 7,5°). Для примера на рис. 1.27 показан разрез реального шагового двигателя с постоянными магни-тами [16].

Для удешевления конструкции двигателя магнитопровод статора выполнен в виде штампованного стакана. Внутри находятся полюсные наконечники в виде

ламелей. Обмотки фаз размещены на двух разных магнитопроводах, которые установлены друг на друге. Ротор представляет собой цилиндрический многополюсный постоянный магнит.

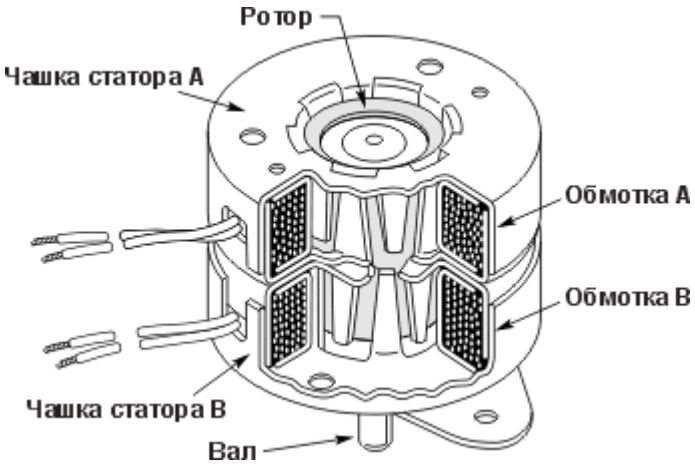


Рис. 1.27. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами

Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с реактивным ротором [16].

Гибридные двигатели являются дальнейшим усовершенствованием двигателей с постоянными магнитами и по способу управления ничем от них не отличаются. Они дороже, чем двигатели с постоянными магнитами, но обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и бóльшую скорость. Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага 3,6…0,9°). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с реактивным ротором и двигателей с постоянными магнитами. Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными [16].

Ротор гибридного двигателя имеет зубцы и разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит (рис. 1.26, *в*). Таким образом, зубцы одной части ротора являются северными полюсами, а зубцы другой – южными. Верхняя и нижняя части ротора повернуты друг относительно друга по оси на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно ко-личеству зубцов на одной из его половинок. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отли-

чие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для шага 3,6° и 8 основных полюсов для шага 1,8…0,9°. Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент. Это обеспечивается соответствующим расположением зубцов, когда часть зубцов ротора находится строго напротив зубцов статора, а часть между ними. Ротор показанного на рис. 1.26, *в* двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет 2 фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг 1,8° [16].

Продольный разрез гибридного шагового двигателя показан на рис. 1.28. Стрелками показано направление магнитного потока постоянного магнита ротора. Часть потока (на рисунке показана сплошной черной линией) проходит через полюсные наконечники ротора, воздушные зазоры и полюсный наконечник статора. Эта часть не участвует в создании момента [16].

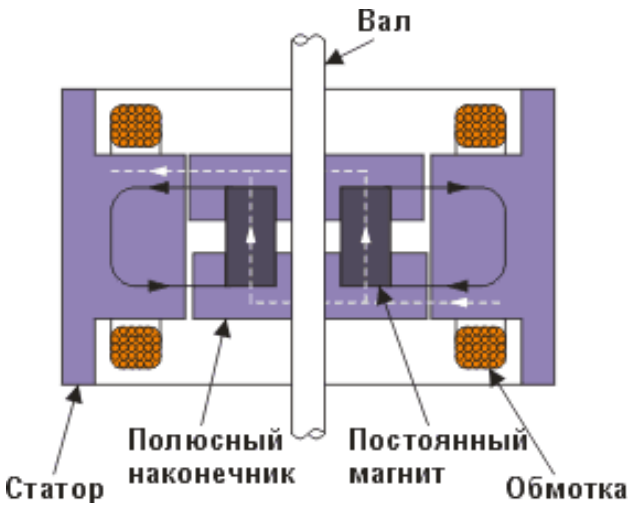


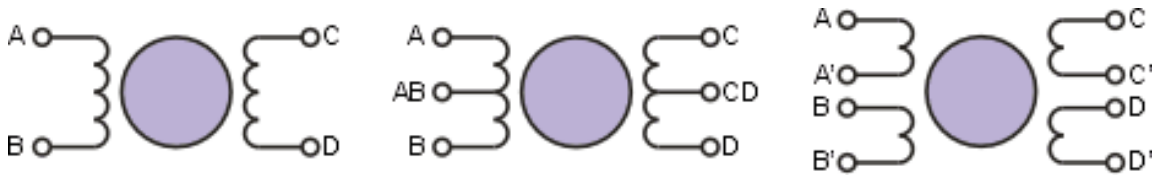
Рис. 1.28. Продольный разрез гибридного шагового двигателя

Воздушные зазоры у верхнего и нижнего полюсного наконечника ротора разные. Это достигается благодаря повороту полюсных наконечников на половину шага зубьев. Существует вторая магнитная цепь, которая обладает минимальными воздушными зазорами и минимальным магнитным сопротивлением. По этой цепи замыкается другая часть потока (на рисунке показана штриховой белой линией), которая и создает момент. Таким же образом создают магнитный поток катушки статора.

Величина зазора между зубцами ротора и статора очень небольшая – типично 0,1 мм, что требует высокой точности при сборке. Чтобы магнитный поток не замыкался через вал, который проходит внутри магнита, его иногда изготавливают из немагнитных марок стали [16].

Для получения больших моментов необходимо увеличивать как поле, создаваемое статором, так и поле постоянного магнита. При этом требуется больший диаметр ротора, что уменьшает отношение крутящего момента к моменту инерции. Поэтому мощные шаговые двигатели иногда конструктивно выполняют из нескольких секций в виде этажерки. Крутящий момент и момент инерции увеличиваются пропорционально количеству секций, а их отношение не уменьшается. Существуют и другие конструкции шаговых двигателей. Например, двигатели с дисковым намагниченным ротором. Такие двигатели имеют малый момент инерции ротора, что в ряде случаев важно [16].

В зависимости от конфигурации обмоток шаговые двигатели делятся на биполярные и униполярные (рис. 1.29). Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, полярность включения которой необходимо изменять для изменения направления магнитного поля. Для обмоток такого типа двигателя требуется мостовая схема включения (см. рис. 1.14). Биполярный двигатель имеет две обмотки и четыре вывода (рис. 1.29, *а*) [16].



а) *б*) *в*)

Рис. 1.29. Обмотки шаговых двигателей:

а – биполярного; *б* – униполярного; *в* – четырехобмоточного

Униполярный двигатель также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод (рис. 1.29, *б*). Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема включения двигателя. Концы *A*, *B*, *C* и *D*

обмоток подключаются к выходам транзисторных ключей (см. п. 1.1.12), соединяющих их, например, с минусом источника питания, а средние точки *AB* и *CD* соединяются вместе и подключаются к противоположному полюсу (плюсу). Средние точки обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов. Иногда униполярные двигатели имеют раздельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют четырехфазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8 (рис. 1.29, *в*). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами также можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности [16].

Если сравнивать между собой биполярный и униполярный двигатели, то биполярный имеет более высокую удельную мощность. При одних и тех же размерах биполярные двигатели обеспечивают больший момент.

Момент, создаваемый шаговым двигателем, пропорционален величине магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Путь для повышения магнитного поля – это увеличение тока или числа витков обмоток. Естественным ограничением при повышении тока обмоток является опасность насыщения железного сердечника. Однако на практике это ограничение действует редко. Гораздо более существенным является ограничение по нагреву двигателя вследствие активных потерь в обмотках. Как раз этот факт и демонстрирует одно из преимуществ биполярных двигателей. В униполярном двигателе в каждый момент времени используется лишь половина обмоток. Другая половина просто занимает место в окне сердечника, что вынуждает делать обмотки проводом меньшего диаметра. В то же время в биполярном двигателе всегда работают все обмотки, т.е. их исполь-зование оптимально. В таком двигателе сечение отдельных обмоток вдвое боль-ше, а сопротивление – соответственно вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток в 1,41 раза при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте примерно 40%. Если же повышенного момента не требуется, биполярный двигатель позволяет уменьшить габариты или просто работать с меньшими потерями. На практике все же часто применяют униполярные двигатели, так как они требуют значительно

более простых схем управления обмотками. Это важно, если они выполнены на дискретных компонентах. В настоящее время существуют специализированные микросхемы драйверов для биполярных двигателей, с использованием которых драйвер получается не сложнее, чем для униполярного двигателя. Например, это микросхемы L293E, L298N или L6202 фирмы SGS-Thomson, PBL3770, PBL3774 фирмы Ericsson, NJM3717, NJM3770, NJM3774 фирмы JRC, A3957 фирмы Allegro, LMD18T245 фирмы National Semiconductor [16].

Существует несколько способов управления шаговыми двигателями:

– одношаговый или полношаговый с включением одной фазы («one phase on» full step или wave drive mode);

– полношаговый или полношаговый с включением двух фаз («two-phase-on» full step или просто full step mode);

– полушаговый («one and two-phase-on» half step или просто half step mode);

– микрошаговый (micro stepping mode).

На рисунке 1.30 представлены временные диаграммы работы шагового двигателя в различных режимах. Все способы управления могут быть реализованы как на биполярном, так и на униполярном двигателях. Графики показывают ди-

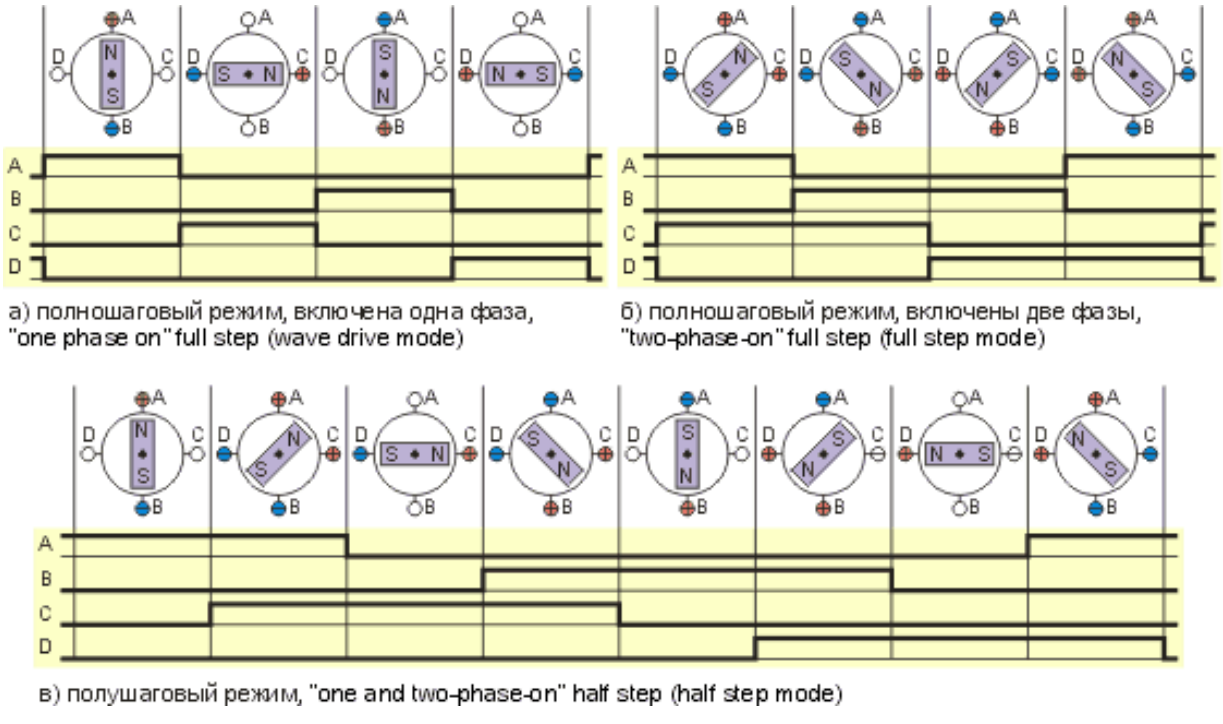


Рис. 1.30. Временные диаграммы управления шаговым двигателем различными способами

намику подачи управляющих импульсов на обмотки униполярного двигателя, рисунки – соответствующие полярности подключения обмоток биполярного двигателя и положения ротора.

Первый способ обеспечивается попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 1.30, *а*). Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с «естествен-ными» точками равновесия ротора у неподключенного двигателя. Недостатком этого способа управления является то, что для биполярного двигателя в один и тот же момент времени используется 50% обмоток, а для униполярного – только 25%. Это означает, что в таком режиме не может быть получен полный момент [16].

Второй способ – управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рис. 1.30, *б*) и обеспечивается примерно на 40% больший момент, чем в случае одной включенной фазы. Этот способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый способ, но положение точек равновесия ротора смещено на полшага относительно «естественных» точек [16].

Третий способ является комбинацией первых двух и называется полушаговым режимом, так как двигатель делает шаг в половину основного. Этот метод управления достаточно распространен, так как двигатель с меньшим шагом стоит дороже и очень заманчиво получить от 100-шагового двигателя 200 шагов на оборот. Каждый второй шаг запитана лишь одна фаза, а в остальных случаях запитаны две (рис. 1.30, *в*). В результате угловое перемещение ротора составляет половину угла шага для первых двух способов управления. Кроме уменьшения размера шага этот способ управления позволяет частично избавиться от явления резонанса. Полушаговый режим обычно не позволяет получить полный момент, хотя наиболее совершенные драйверы реализуют модифицированный полушаговый режим, в котором двигатель обеспечивает практически полный момент, при этом рассеиваемая мощность не превышает номинальной [16].

В микрошаговом режиме ток в фазах меняют небольшими шагами, обеспечивая дробление половинного шага на еще меньшие микрошаги. Когда одновременно включены две фазы, но их токи не равны, то положение равновесия ротора

будет лежать не в середине шага, а в другом месте, определяемом соотношением токов фаз. Меняя это соотношение, можно обеспечить некоторое количество микрошагов внутри одного шага. Кроме увеличения точности позиционирования, микрошаговый режим имеет и другие преимущества: снижение шума и вибрации, обеспечение плавности хода. Вместе с тем, для реализации микрошагового режима требуются значительно более сложные драйверы, позволяющие задавать ток в обмотках с необходимой дискретностью. Полушаговый режим является частным случаем микрошагового режима, но он не требует формирования ступенчатого тока питания катушек, поэтому часто реализуется. Микрошаговый режим по сути является управлением шаговым двигателем в режиме синхронного. Именно этот режим используют в синхронных сервоприводах. Драйвер двигателя питается от постоянного тока, из которого широтно-импульсной модуляцией (см. п. 1.1.13)

получают переменный ток заданной частоты.

В полношаговом режиме с двумя включенными фазами положения точек равновесия ротора смещены на полшага. Нужно отметить, что эти положения ротор принимает при работе двигателя, но положение ротора не может сохраняться неизменным после выключения тока обмоток. Поэтому при включении и выключении питания двигателя ротор будет смещаться на полшага. Для того чтобы он не смещался при остановке, необходимо подавать в обмотки ток удержания. То же справедливо и для полушагового и микрошагового режимов. Следует отметить, что если в выключенном состоянии ротор двигателя поворачивался, то при включении питания возможно смещение ротора и на бóльшую, чем половина шага, величину.

Ток удержания может быть меньше номинального, так как от двигателя с неподвижным ротором обычно не требуется

большого момента. Однако есть применения, когда в остановленном состоянии двигатель должен обеспечивать полный момент, что для шагового двигателя возможно. Это свойство шагового двигателя позволяет в таких ситуациях обходиться без механических тормозных систем. Поскольку современные драйверы позволяют регулировать ток питания обмоток двигателя, задание необходимого тока удержания обычно не представляет проблем. Задача обычно заключается просто в соответствующей программной поддержке для управляющего микроконтроллера [16].