Лекция - 6

1 РЕГУЛИРОВКА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как следует из уравнения (1.5), регулировать скорость двигателя постоянного тока независимого и параллельного возбуждения можно тремя основными способами:

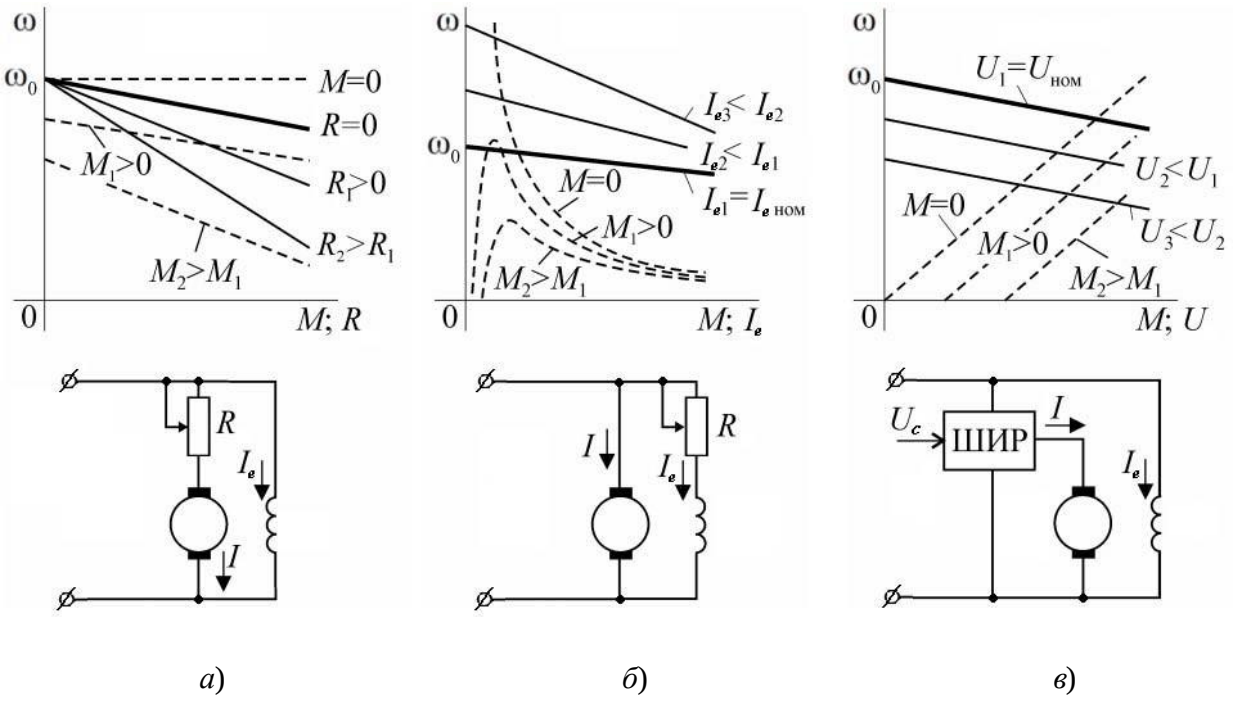
– изменением добавочного активного сопротивления в цепи обмотки якоря двигателя;

– изменением потока Ф возбуждения двигателя;

– изменением подводимого к обмотке якоря напряжения *U*.

На рисунке 1.15 представлены графики механических и регулировочных характеристик двигателей постоянного тока при различных способах регулирования и схемы их реализации. Механические характеристики изображены сплошными линиями, регулировочные – штриховыми.

Включение реостата в цепь якоря двигателя для регулирования частоты вращения является наиболее простым и очевидным (рис. 1.15, *а*). Увеличение сопротивления *R* в цепи якоря приводит к уменьшению тока *I* и напряжения *U* на его обмотках, в результате чего падает и частота вращения. Регулировочные характеристики (зависимости ω (*R*) частоты вращения от сопротивления добавочного резистора) при этом способе регулирования линейны. Регулирование возможно только в области скоростей вращения ниже номинальной.



а) *б*) *в*)

Рис. 1.15. Характеристики электродвигателей постоянного тока и схемы реализации различных способов регулирования

Несмотря на линейность регулировочных характеристик, регулирование частоты вращения сопряжено с рядом трудностей. Это связано с тем, что при изменении сопротивления R жесткость механических характеристик существенно изменяется (см. рис. 1.15, *а*). Поэтому при малом моменте нагрузки большие изменения сопротивления не приведут к значительному изменению частоты вращения, а при большом – даже незначительное увеличение сопротивления может привести к остановке двигателя.

Уменьшение жесткости механических характеристик является существенным недостатком рассматриваемого способа регулирования, однако более важным фактором, препятствующим его применению, являются высокие потери. Через реостат протекает весь ток якоря двигателя, поэтому, например, при равенстве напряжений на добавочном сопротивлении и якоре они будут потреблять одинаковую мощность от источника. Потери составят половину используемой энергии. При этом необходимо применять мощный реостат и обеспечивать его охлаждение.

В современных приводах включение добавочного сопротивления в цепь якоря находит применение только в устройствах ограничения пусковых токов (см. рис. 1.12).

Значительно уменьшить потери при регулировании частоты вращения двигателей с электромагнитным возбуждением можно путем изменения тока возбуждения I_e. Изменение тока приводит к изменению магнитного потока Ф, который в соответствии с (1.5) оказывает непосредственное влияние на частоту ω. Уменьшение потерь при использовании этого способа по сравнению с регулированием в цепи якоря достигается в результате того, что мощность цепи возбуждения значительно меньше мощности цепи якоря. Регулирование скорости вращения изменением величины магнитного потока главных полюсов называется полюсным.

При уменьшении магнитного потока ниже номинального, например, путем установки добавочного резистора в цепь обмотки возбуждения, частота вращения возрастает (см. рис. 1.15, *б*) и может превысить номинальную. По этой причине этот способ регулирования возможен только для тех двигателей, которые допускают такое повышение частоты вращения.

Регулировочные характеристики ω (I_e) двигателя при полюсном управлении нелинейны. При нулевом моменте нагрузки регулировочная характеристика представляет собой гиперболу, а при нагрузке отличной от нуля – кривую второго порядка, имеющую максимум в области малых токов возбуждения.

Нелинейность и неоднозначность регулировочных характеристик являются большими недостатками полюсного управления, которые нужно учитывать при разработке и эксплуатации. Другим недостатком, так же, как и в случае добавочного сопротивления в цепи якоря, является уменьшение жесткости механических характеристик. Сложность изменения механических и регулировочных характеристик затрудняет регулирование частоты вращения. Изменение магнитного потока влияет не только на скорость вращения, но и на вращающий момент двигателя. При увеличении скорости уменьшается момент и наоборот. Механические характеристики рабочих органов, как правило, имеют противоположную зависимость. Поэтому при регулировке частоты вращения необходимо обратное – одновременное увеличение и скорости и момента.

Достоинством полюсного способа регулирования являются возможность получения при номинальном напряжении питания скоростей вращения, превышающих номинальную скорость.

Несмотря на то, что при полюсном регулировании потери мощности значительно снижены, применение активного сопротивления в любых схемах неэффективно. Резистор преобразует энергию не в полезную работу, а в тепло. Необходимо обеспечивать его охлаждение. Возникают трудности при необходимости автоматического или дистанционного электронного управления. Особо отметим, что в мехатронных системах использование реостатов совершенно неприемлемо. Получить дополнительную информацию по якорному и полюсному управлению при помощи реостатов можно в пособиях [8 – 11].

Как в цепи якоря, так и в цепи обмотки возбуждения целесообразно использовать регуляторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Ввиду линейности механических и регулировочных характеристик такой регулятор предпочтительно включать в цепь якоря (рис. 1.15, *в*).

Широтно-импульсный регулятор (ШИР) позволяет изменять среднее напряжение на обмотке якоря. При этом схема регулятора отличается малым энергопотреблением. Регулировочные характеристики ω (*U*) при ШИМ напряжения питания являются линейными, а жесткость механических характеристик не изменяется. Увеличение частоты вращения сопровождается увеличением вращающего момента. Применение ШИР является чрезвычайно удобным и выгодным во всех устройствах. По этой причине многие управляющие микроконтроллеры имеют в своем составе модули ШИМ, которые на аппаратном уровне вырабатывают требуемый ШИМ-сигнал. В цепях переменного тока для регулирования используют управляемые выпрямители [4].

Принцип работы ШИР заключается в изменении скважности импульсов напряжения питания якоря, подаваемых с заданной частотой. Скважностью называется отношение периода следования импульсов к их длительности. Например, если период в два раза превышает длительность импульса, то скважность равна двум. В крайних случаях, когда напряжение питания постоянно или равно нулю, скважность соответственно равна единице или бесконечности.

На рисунке 1.16 представлены временные диаграммы работы ШИР при различных значениях выходного напряжения. На рисунке 1.16, *а* приведен график изменения выходного напряжения регулятора, когда длительность импульса со-

ставляет десятую часть периода. Среднее и действующее значение $\overline{U}$ выходного напряжения соответственно составляет десятую часть напряжения U_0 питания регулятора. На рисунке 1.16, *б* и *в* приведены графики изменения напряжения регулятора при $\overline{U}$, равном 50% и 90% от U_0 соответственно.

При использовании ШИР для питания электродвигателей нет необходимости сглаживать импульсы его выходного напряжения, так как ротор будет вращаться равномерно благодаря своему моменту инерции. В случае использования ШИР для питания устройств, не допускающих пульсации питающего напряжения, на выходе ШИР ставится сглаживающий фильтр из конденсаторов и, при необходимости, катушек индуктивности (дросселей). Это не ухудшает работу регулятора, но делает выходное напряжение постоянным, близким к тому, как оно показано штриховыми линиями на рис. 1.16.

Для формирования импульсов выходного напряжения в ШИР могут быть использованы любые ключевые элементы, в том числе и электромагнитные, однако для повышения надежности электрической схемы целесообразно использовать

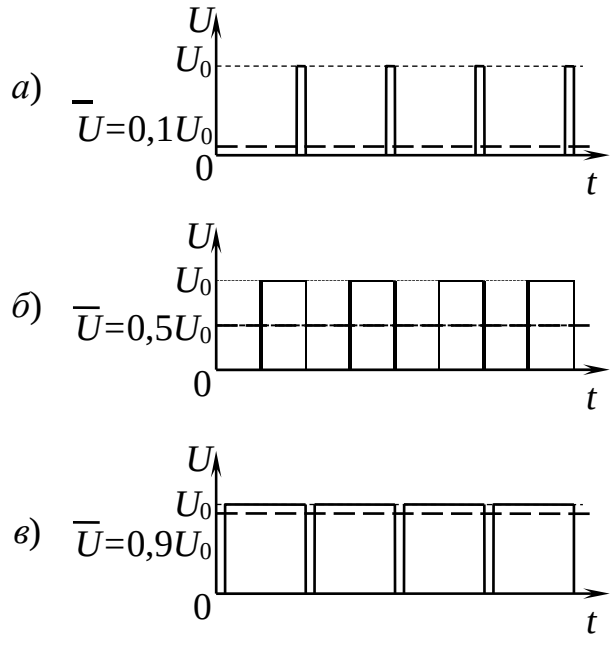


Рис. 1.16. Временные диаграммы работы ШИР при различных значениях $\overline{U}$ выходного напряжения:

сплошные линии – диаграммы изменения выходного напряжения *U*;

штриховые – среднее (действующее) значение $\overline{U}$ выходного напряжения

полупроводниковые приборы: биполярные и полевые транзисторы, тиристоры. Эти приборы работают в *ключевом режиме*. Для работы выходных полупроводниковых приборов в ключевом режиме схема должна обеспечить только два устойчивых состояния: «полностью открыт» и «полностью закрыт».

При последовательном соединении транзистора и нагрузки (рис. 1.17) имеет место уравнение

$$U_{КЭ}(I) = U_0 - IR, \tag{1.10}$$

где $U_{КЭ}$ – напряжение между коллектором и эмиттером транзистора, В; I и R – ток и сопротивление нагрузки, А и Ом; U_0 – напряжение питания ШИР, В. График этой функции называется *нагрузочной линией* [14]. Мощность, выделяющаяся на транзисторе, определяется произведением тока в нагрузке на напряжение на транзисторе. Умножив (1.10) на ток I, получим

$$P(I) = U_0 I - I^2 R. \tag{1.11}$$

Продифференцировав это уравнение по току I и приравняв производную нулю, можно найти ток, соответствующий максимальной выделяющейся на транзисторе мощности и соответствующее сопротивление коллекторной цепи. Максимальная мощность выделяется на транзисторе, если это сопротивление равно сопротивлению R нагрузки, или при равенстве напряжения $U_{КЭ}$ напряжению на нагрузке. В ключевом режиме работы в закрытом состоянии ток через транзистор предельно мал ($I \approx 0$), следовательно, мощность P также равна нулю (см. (1.11)), несмотря на то, что напряжение равно напряжению питания U_0. В открытом состоянии сопротивление коллекторной цепи транзистора близко к нулю, ток определяется исходя из закона Ома:

$$I = \frac{U_0}{R}. \tag{1.12}$$

Подставив (1.12) в (1.10) и (1.11), получим, что $U_{кэ} \approx 0$ и $P \approx 0$, несмотря на высокое значение тока I. Таким образом, в ключевом режиме работы транзистор переходит из одного состояния с минимальным потреблением энергии в другое. По этой причине ШИР имеют два основных преимущества перед пассивными схемами на реостатах. Это, во-первых, высокий КПД, и, как следствие, отсутствие не-

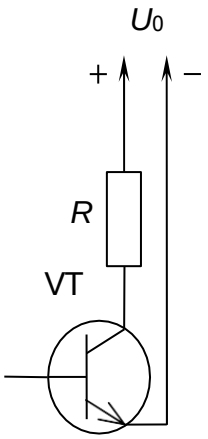


Рис. 1.17. К пояснению ключевого режима работы биполярного транзистора

обходимости мощного отвода тепла от регулирующего ключевого элемента. Переход из закрытого состояния в открытое происходит через область с большим потреблением энергии, поэтому он должен быть произведен максимально быстро. Реальные полупроводниковые приборы не могут мгновенно изменить значение тока в цепи [4]. Поэтому на них все же выделяется часть мощности, и их необходимо устанавливать на сравнительно небольшой радиатор.

Для управления электродвигателем постоянного тока в режиме ШИМ может быть использована схема на рис 1.14 и другие подобные схемы. В зависимости от требуемого направления вращения на один из входов схемы необходимо подавать импульсы с различной скважностью, что позволит изменять частоту вращения в широком диапазоне. При отсутствии необходимости изменения направления вращения достаточно использовать один силовой ключевой элемент (см. рис. 1.17).

Кроме ШИМ также существуют:

– длительностно-импульсная модуляция (ДИМ), при которой длительность импульса меняется, а длительность паузы между импульсами остается постоянной;

– времяимпульсная модуляция (ВИМ), при которой длительность импульса постоянна, а время между фронтами импульсов изменяется;

– частотно-импульсная модуляция (ЧИМ), при которой длительность импульсов постоянна, но меняется количество импульсов за определенный промежуток времени.

Эти виды модуляции используются значительно реже, а смысл их одинаков и заключается в изменении скважности импульсов. ШИМ сохраняет период следования импульсов постоянным, что позволяет легко согласовывать несколько устройств с различной скважностью ШИМ-сигнала. Большинство микроконтроллеров имеют в своем составе аппаратные блоки ШИМ, а при отсутствии таких

блоков они легко реализуются программно при помощи таймера и системы прерываний. В цепях переменного тока используется аналог ШИМ, при котором нагрузка подключается к сети только в определенную часть полупериода. Для этой цели широко используют тиристоры. Подробно прочитать про регулирование частоты вращения электродвигателей постоянного тока можно в пособиях [3 – 5].

Регулирование частоты вращения электродвигателей с последовательным возбуждением осуществляется способами, аналогичными рассмотренным. В пассивных схемах с реостатом полюсное регулирование, реализуемое параллельным включением обмотки возбуждения регулируемого резистора, является наиболее экономичным.

2 ЭНКОДЕРЫ И СЕРВОПРИВОДЫ

Электродвигатели постоянного тока в отличие от, например, шаговых, не позволяют обеспечить точное перемещение вала на заданный угол. Стабилизировать частоту вращения и управлять положением вала можно различными путями, однако без применения датчиков положения точность позиционирования рабочего органа будет недостаточной для применения в мехатронной системе. Для получения информации о пройденном угловом перемещении валом электродвигателя постоянного тока применяют специальные устройства – *энкодеры*.

Энкодер или датчик углового перемещения предназначен для создания отрицательной обратной связи. На схеме рис. 1.1 это датчик Д. Энкодер обеспечивает блок управления БУ информацией о фактическом угловом перемещении вала электродвигателя. БУ сравнивает текущее фактическое перемещение с необходимым перемещением в данный момент времени и формирует соответствующий управляющий сигнал для увеличения или уменьшения скорости вращения.

Такая система с обратной связью называется *сервоприводом*. В общем смысле сервопривод – это привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения. Сервоприводом является любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положе-ния, скорости, усилия и т.п.) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике и устройстве согласно задан-

ному внешнему значению. Сервопривод является наиболее близким понятием к термину «исполнительный механизм», используемому в автоматике.

Энкодер – это устройство, преобразующее линейное или угловое перемещение в последовательность сигналов, позволяющих определить величину перемещения. Можно выделить угловые и линейные энкодеры. Угловой энкодер – устройство, преобразующее угол поворота вращающегося вала в электрические сигналы, позволяющие определить этот угол. Линейные энкодеры преобразуют в электрические сигналы линейное перемещение.

Энкодеры можно разделить на два типа:

– абсолютные, позволяющие получить абсолютное значение угла поворота (например, переменный резистор);

– инкрементные, позволяющие определить угол поворота в ту или иную сторону относительно некоторого неизвестного начального положения.

Для определения абсолютного перемещения в мехатроных системах с инкрементными энкодерами применяют дополнительные датчики положения. Большинство используемых энкодеров являются инкрементными.

По принципу действия энкодеры подразделяются на:

– энкодеры с щеточными контактами;

– резисторные энкодеры (потенциометры);

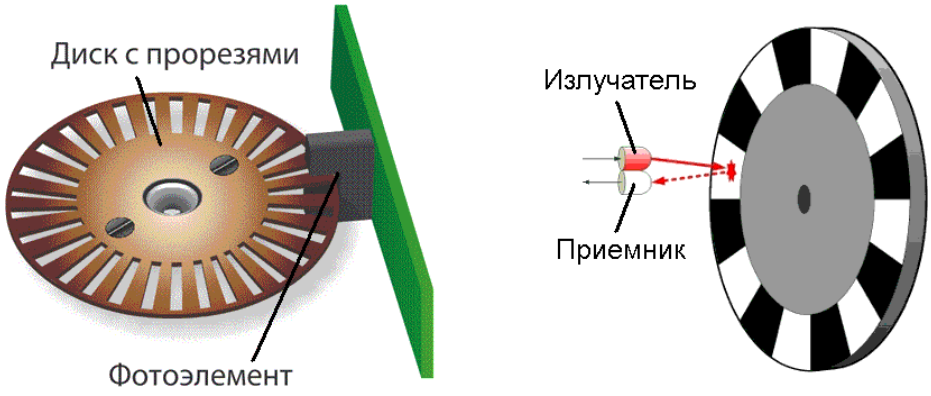
– оптические энкодеры;

– магнитные энкодеры (на основе датчиков Холла);

– индуктивные энкодеры;

– емкостные энкодеры.

Широко распространены оптические инкрементные энкодеры на основе оптопар (фотоэлементов, см. рис. 1.18). Такие энкодеры работают по двум принципам: «на просвет» и «на отражение». В первом случае луч от источника света, направленный на фотоэлемент, периодически прерывается диском со специальными прорезями (или прозрачным диском с непрозрачными штрихами), вращающимся на валу, во втором – источник и приемник света находятся по одну сторону непрозрачного диска с областями с разной отражающей способностью. В обоих случаях фотоприемник фиксирует переход от одной области к другой и энкодер генерирует импульс, инкрементирующий «счетчик положения».



а) *б*)

Рис. 1.18. Схемы фотоэлектрических инкрементных энкодеров:

а – «на просвет»; *б* – «на отражение»

На рисунке 1.18 представлен самый простой вариант реализации энкодера – одиночный. Он имеет только один фотоэлемент (одну оптопару). К недостаткам такого энкодера относятся ошибки при подсчете импульсов на границах из-за возможных ложных срабатываний и невозможность определения направления вращения.

В сдвоенном (квадратурном) энкодере используются две оптопары, выходные сигналы которых сдвинуты по фазе на 90°. Это позволяет определять направление вращения и распознать ложные срабатывания. Электрические сигналы таких преобразователей перемещения называют фазами A и B. К этим двум фазам добавляют третью фазу (R или Z), сигнализирующую о некотором фиксирован-ном начальном положении вала. Примером квадратурных энкодеров могут слу-жить датчики типа E30S, ЛИР-112.

Выходной сигнал квадратурных энкодеров может быть как синусоидальным, так и прямоугольным. В любом варианте реализации фазы сигналов сдвинуты на 90°. При вращении вала энкодера с прямоугольным выходным сигналом в одном направлении происходит последовательная смена сигналов $U_A = 0$, $U_B = 0$; $U_A = 1$, $U_B = 0$; $U_A = 1$, $U_B = 1$; $U_A = 0$, $U_B = 1$; а в другом – $U_A = 0$, $U_B = 0$; $U_A = 0$, $U_B = 1$; $U_A = 1$, $U_B = 1$; $U_A = 1$, $U_B = 0$, где U_A и U_B – напряжения фаз A и B, соответственно. Эти сигналы можно непосредственно подавать на входы портов микроконтроллера и использовать в соответствующем алгоритме управления.

Кроме энкодеров применяются и другие преобразователи вращательного движения в электрические сигналы. Это, например, тахогенераторы, преобразующие частоту вращения вала в пропорциональное выходное напряжение. Их применение неоправданно ввиду присущей им мультипликативной погрешности, которая равна нулю при использовании энкодеров. Используются также сельсины и вращающиеся трансформаторы. *Сельсины* – это элементы синхронной связи, обеспечивающие одновременный поворот или одновременное вращение нескольких, механически не связанных между собой валов. *Вращающиеся трансформаторы* предназначены для получения переменного напряжения, находящегося в функциональной зависимости от угла поворота ротора и по сути являются одним из видов энкодеров. Получить более подробную информацию об этих типах датчиков углового перемещения можно из пособия [9].

3 ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Недостатки коллекторных двигателей постоянного тока, обусловленные наличием щеточно-коллекторного узла (недостаточная надежность, высокая стоимость изготовления и эксплуатации, недопустимость работы в пожаро- и взрывоопасных средах), привели к необходимости создания двигателя постоянного тока без коллектора и щеток. Эти элементы в машине постоянного тока выполняют функцию механического переключателя (коммутатора). Благодаря широкому применению управляемых полупроводниковых приборов – тиристоров и транзисторов, появилась возможность создать на этих элементах полупроводниковый коммутатор, способный заменить щеточно-коллекторный узел в машинах постоянного тока. Эти полупроводниковые приборы работают в ключевом режиме [9].

Вентильный электродвигатель возможно было бы максимально приблизить по свойствам и принципу работы к электродвигателю постоянного тока, однако в ходе развития такого типа электроприводов более рациональным оказалось соединение синхронной машины с полупроводниковым коммутатором [9, 10].

При любой реализации вентильного электропривода обмотка якоря вместе с полупроводниковым коммутатором располагается на статоре машины, а индуктором является ротор. При этом на роторе размещаются полюсы, возбуждаемые по-

стоянными магнитами или обмоткой возбуждения через контактные кольца. В первом случае двигатель полностью лишен скользящих электрических контактов (бесконтактный двигатель) [10]. Кольца, так же, как и коллектор, соприкасаются со щетками, однако в них отсутствует коммутация, в результате чего они являются узлом, менее сложным в изготовлении и эксплуатации, чем коллектор.

Свойства вентильного двигателя зависят от способа управления полупроводниковыми элементами коммутатора. Если его работа не зависит от пространственного положения ротора двигателя, то вентильный двигатель по своим характеристикам в принципе не отличается от синхронного. Регулирование частоты вращения в таком двигателе выполняется изменением частоты питающего напряжения посредством статических преобразователей частоты. При этом переключение полупроводниковых элементов

коммутатора не зависит от пространственного положения ротора двигателя и его частоты вращения. Такое управление называют частотным. Однако задача создания вентильных двигателей – получить бесконтактный двигатель постоянного тока со свойствами коллекторного двигателя. Это оказывается возможным лишь при позиционном управлении, когда последовательность и частота переключения полупроводниковых элементов коммутатора находятся в строгой зависимости от пространственного (углового) положения ротора относительно статора двигателя. В этом случае процесс переключения тока в катушках обмотки статора (якоря) вентильного двигателя происходит аналогично процессу коммутации в коллекторном двигателе постоянного тока. Механические характеристики вентильных двигателей с позиционным управлением мало отличаются от механических характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения [9]. Отличие заключается во взаимном

расположении магнитных полей статора и ротора. В электродвигателях постоянного тока магнитные поля взаимно перпендикулярны (см. рис. 1.5), а в вентильных электроприводах на основе синхронного двигателя угол между ними изменяется в зависимости от нагрузки.

Кроме синхронных электродвигателей в вентильных электроприводах применяют индукторные шаговые электродвигатели. Синхронные и шаговые электродвигатели рассматриваются в следующем разделе текущей главы пособия, а подробнее ознакомиться с принципом работы вентильных электродвигателей можно в книгах [5, 9, 10].