

Шаговыми двигателями называют исполнительные двигатели дискретного действия, питающиеся импульсами электрической энергии, ротор которых под воздействием каждого импульса перемещается на некоторый определенный угол, называемый шагом. Такие двигатели применяются в системах автоматизированного управления, например, в станках с программным управлением. В отличие от синхронных двигателей шаговые электродвигатели должны сохранять синхронизм как при вращении, так и при пуске, торможении или реверсе и, кроме того, допускать длительную фиксированную стоянку ротора, когда по обмоткам управления проходит постоянный ток. Питание шаговых электродвигателей осуществляется от электронных коммутаторов, управляемых маломощными импульсами, например, от программного устройства. Принцип действия шагового двигателя состоит в том, что при прохождении токов по обмоткам статора (обмоткам управления) ротор развивает синхронизирующий момент, стремящийся переместить его в положение максимального потокосцепления возбужденных обмоток. На рис. Показан схематично поперечный разрез магнитно цепи шагового двигателя, который поясняет его принцип действия.

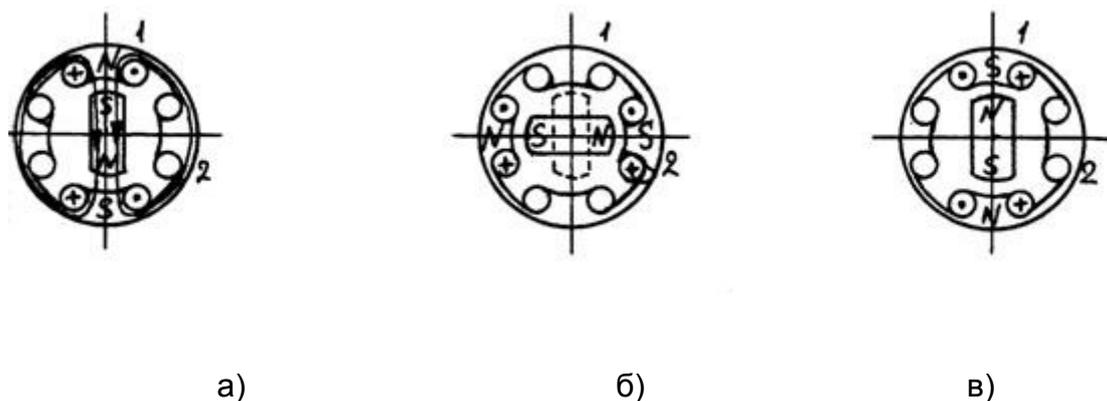


Рис.42

Так, если по обмотке 1 протекает ток в указанном на рис.,а направлении, то ротор двигателя, выполненный, например, в виде постоянного магнита, благодаря взаимодействию магнитных полей статора и ротора займет указанное на рисунке положение, при котором оси полей статора и ротора совпадают. В этом положении, соответствующем максимальному потокосцеплению возбужденной обмотки 1 статора, ротор находится в устойчивом положении. Всякое воздействие, выводящее его из этого равновесия, приводит к

возникновению синхронизирующего момента. Если в результате команды управляющее устройство переключило обмотки, и ток протекает не по обмотке 1, а по обмотке 2(рис. ,б), то вследствие наступившего рассогласования осей поля статора и ротора (первое положение показано штриховыми линиями) также возникает синхронизирующий момент, перемещающий ротор в новое устойчивое положение. Последующее включение первой фазы с обратной полярностью (рис. ,в) приводит к дальнейшему повороту ротора. Таким образом, при последовательном изменении (коммутации) токов в обмотках статора шагового двигателя, приводящем к перемещению в пространстве поля статора, ротор перемещается синхронно с полем и останавливается - фиксируется при прекращении коммутации токов, т.е. при прекращении вращения (остановке) поля.

Кривая напряжения, используемого для питания обмоток управления шагового двигателя, имеет обычно прямоугольную или ступенчатую форму. Каждому управляющему импульсу, поданному на вход электронного коммутатора, соответствует скачкообразное изменение величины или полярности напряжений, прикладываемых к обмоткам двигателя. Создаваемое обмотками управления магнитное поле перемещается по окружности расточки статора на фиксированный угол при каждом переключении напряжения.

Таким образом, каждому единичному переключению токов в обмотках соответствует поворот ротора на вполне определенное угловое перемещение, называемое шагом. Величина углового шага определяется числом тактов коммутации за один период изменения напряжения n и числом пар полюсов двигателя p

$$\alpha = \frac{2\pi}{pn}$$

Число одновременно включаемых обмоток управления, способ их коммутации в общем случае зависят от числа обмоток управления, требуемой величины углового шага, а также типа обмоток управления. При подаче на вход электронного коммутатора серии управляющих импульсов и соответствующей этой серии последовательной коммутации токов в обмотках двигателя ротор синхронно с полем поворачивается на угол, пропорциональный числу импульсов в серии. Средняя скорость вращения ротора пропорциональна частоте управляющих импульсов.

Пусковые свойства двигателя характеризуются частотой приемистости, т.е. максимальной частотой импульсов, при которой возможен пуск без выпадения ротора из синхронизма (без потери шагов). В зависимости от типа двигателя приемистость составляет от 10 до 10000 Гц. Шаговые двигатели, по существу, являются синхронными двигателями, работающими при импульсном питании. Режим торможения и фиксированной стоянки ротора получается при прекращении подачи управляющих импульсов на электронный коммутатор, когда по обмоткам управления проходит постоянный ток, создающий неподвижную в пространстве намагничивающую силу.

Для облегчения объяснения принципов его действия на рис. 2.9 приведено поперечное сечение простого реактивного ШД. Это трехфазный двигатель, статор которого имеет шесть зубцов. Каждые два зубца статора, отстоящие на 180° друг от друга, принадлежат одной фазе; катушки противоположных зубцов соединены последовательно или параллельно (на рис. 2.9 они соединены последовательно). Ротор имеет четыре зубца. Статор и ротор обычно изготавливают из шихтованного магнитомягкого материала, но часто используют и массивные роторы. Материал как статора, так и ротора должен обладать высокой магнитной проницаемостью и обеспечивать прохождение большого магнитного потока.

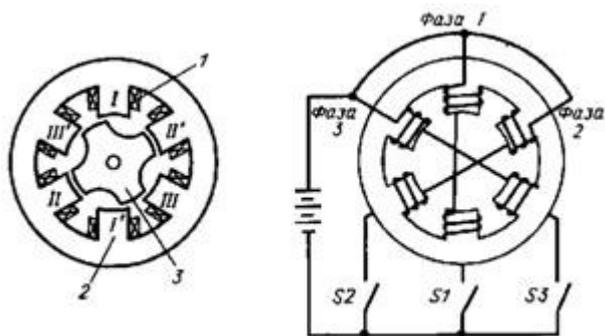


Рис. 2.9. Поперечное сечение трехфазного ШД и схема соединения обмоток: 1 - обмотка; 2 - статор; 3 — ротор.

Определим, одинаковые или противоположные направления намагничивания будут иметь зубцы одной фазы статора. Предположим, что в нашем примере они имеют противоположные направления намагничивания. Таким образом, на рис. 2.9 зубцы I, II и III в возбужденном состоянии представляют северный магнитный полюс, а I', II' и III' — южный.

Ток в каждой фазе управляется в режиме ДА (НЕТ) через соответствующие переключатели. Если ток подается в катушку фазы 1 или, другими словами, фаза 1 возбуждена, магнитный поток будет проходить, как показано на рис. 2.10.

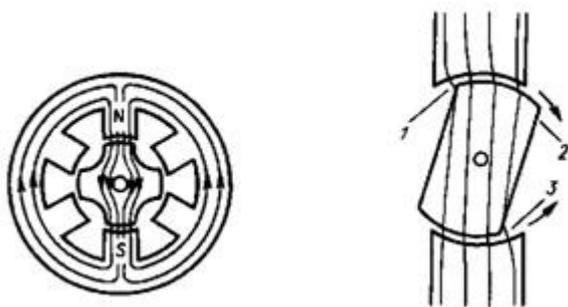


Рис. 2.10. Положение равновесия при возбуждении фазы 1

Рис. 2.11. Силовые линии магнитного поля, создающие момент: 7 - силовые линии; 2 - внешний момент; 3 — возвращающий момент.

Ротор примет такое положение, что зубцы статора I и I' и какие-либо два зубца ротора установятся по одной линии. В этом случае магнитное сопротивление минимально, что обеспечивает положение равновесия. Если ротор начнет двигаться от положения равновесия под действием внешнего момента, приложенного к его валу, то появится удерживающий

момент, как показано на рис. 2.11. В этом случае к ротору приложен внешний момент, направленный по часовой стрелке, и ротор смещен в этом же направлении, что привело к искривлению магнитных силовых линий на концах зубцов как статора, так и самого ротора. Магнитные силовые линии имеют сильное натяжение, известное как натяжение Максвелла. Другими словами, магнитные силовые линии стремятся стать как можно более короткими и прямыми (подобно эластичной струне). На рис. 2.11 этот эффект возникает на концах зубцов, создавая момент против часовой стрелки для возвращения зубцов ротора на одну линию с зубцами статора.

Как видно из рис. 2.11, когда зубцы ротора и статора в возбужденной фазе находятся не на одной прямой, магнитное сопротивление становится минимальным. Посмотрим, что произойдет, если отключить фазу 1 и возбудить фазу 2. После переключения магнитное сопротивление резко возрастет.

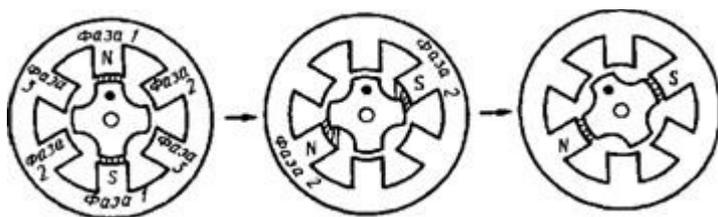


Рис. 2.12. Процесс выполнения шага при переключении возбуждения с фазы 1 на фазу 2

Поэтому ротор, как видно на рис. 2.12, повернется на угол 30° , чтобы минимизировать магнитное сопротивление. Это движение на угол шага при каждом переключении возбуждения называется шагом. После выполнения ротором трех шагов он снова вернется в начальное положение. Это показано на рис. 2.13.

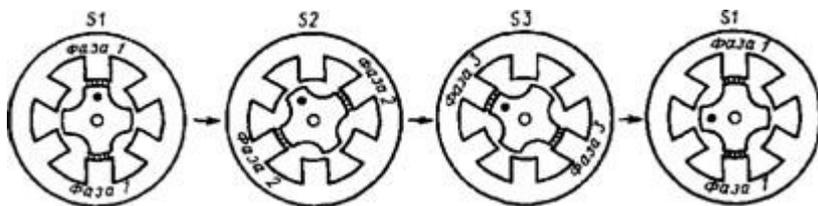


Рис. 2.13. Принцип действия трехфазного реактивного ШД

Укажем основные структурные особенности реактивных ШД.

А. Воздушный зазор должен быть минимальным для создания большого момента при небольшом объеме ротора и достижения высокой точности позиционирования. Влияние длины воздушного зазора приведено на рис. 2.14.

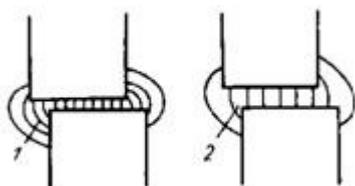
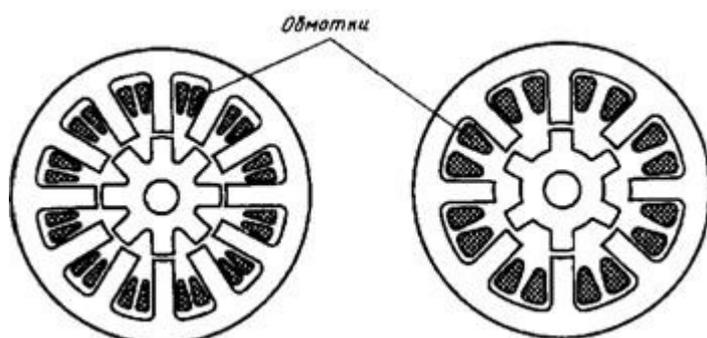


Рис. 2.14. Анализ магнитного поля при малом (1) и большом (2) воздушных зазорах

При одном и том же значении магнитодвижущей силы небольшой зазор будет обеспечивать больший магнитный поток, который создает более высокий момент. Ясно также, что при воздействии на ротор внешнего момента его уход от положения равновесия становится меньше с уменьшением зазора. Значение зазора в современных ШД лежит в пределах от 30 до 100 мкм.

В шаговых двигателях возможно реализовать малый угол шага. Угол шага в 30° , реализуемый структурой рис. 2.10, не является минимально возможным. На рис. 2.15, а показан трехфазный реактивный ШД с 12 зубцами на статоре и 8 на роторе; это в два раза больше, чем у конструкции на рис. 2.10. На рис. 2.15, б показан четырехфазный ШД, имеющий 8 зубцов на статоре и 6 на роторе.



а) б)

Рис. 2.15. Поперечное сечение реактивных ШД с углом шага 15° :

а - трехфазный (зубцов статора 12, ротора 8); б - четырехфазный (зубцов статора 8, ротора 6)

Угол шага обеих конструкций равен 15° . На рис 2.16 изображен четырехфазный ШД с углом шага $7,5^\circ$, у которого 16 зубцов на статоре и 12 на роторе. Как видно из этого рисунка, ШД изготавливают тонким для уменьшения момента инерции.

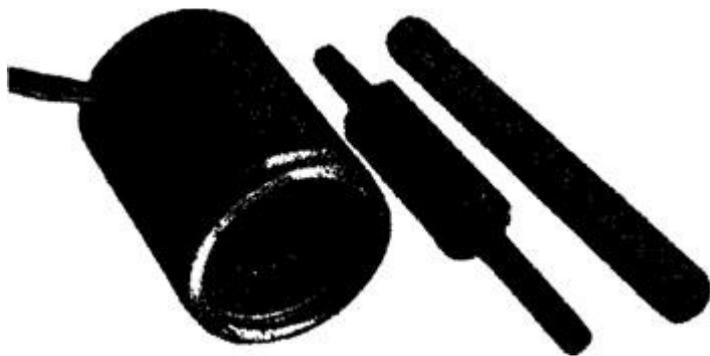


Рис. 2. 16. Статор и ротор четырех фазного реактора ШД с углом шага $7,5^\circ$

Соотношение между углом шага θ_S числом фаз m и зубцами ротора N_r , а также количеством шагов S задается формулой

$$S = 360/\theta_S = mN_r$$

Для того чтобы уменьшить угол шага θ_S , число зубцов ротора N_r должно быть увеличено. Из предыдущих объяснений следует, что число зубцов статора должно быть увеличено точно так же, как и ротора, однако оно не входит в уравнение. На рис. 2.17 показано поперечное сечение реактивного ШД с малым углом шага.

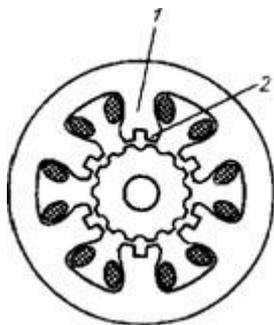


Рис. 2. 17. Поперечное сечение трехфазного реактивного ШД с 2 зубцами на каждом полюсе (зубцов ротора 14, угол шага $8,75^\circ$) : 1 - полюс; 2 - зубец

Большие выступающие части, вокруг которых располагается обмотка, называются полюсами. Полюс статора имеет два или более зубца, все они одного полюса и в любой момент времени намагничены в одном направлении. Так как для конструкции рис. 2.17 $N_r = 14$, число фаз — 3, то $S = 3 * 14 = 42$ шага. Угол шага в этой модели $\theta_S = (360/42)^\circ = 8,57^\circ$. На рис. 2.18 показана развертка магнитной системы ШД, объясняющая процесс движения на шаг. Этот пример показывает, что число зубцов статора не является прямым фактором для определения угла шага.

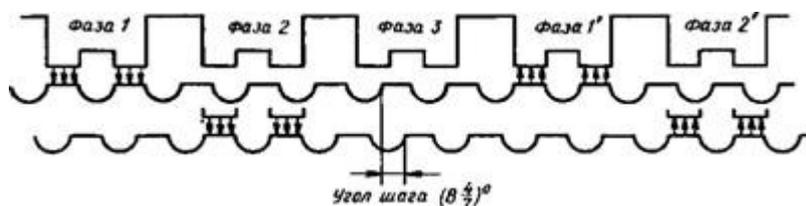


Рис. 2.18. Развертка рабочей зоны трехфазного реактивного ШД с рис. 2.17

На рис. 2.19 приведен пример трехфазного ШД, у которого число зубцов ротора увеличено до 44. Число шагов на один оборот равно 132.

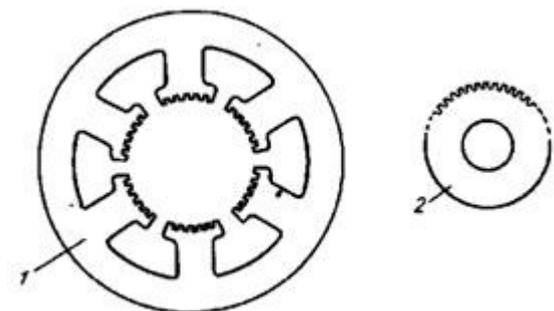


Рис. 2. 19. Поперечное сечение трехфазного реактивного ШД (зубцов ротора 44 и число шагов за один оборот 132), магнитопроводы: 1 - статора; 2 - ротора

Пример четырехфазного ШД с 50 зубцами ротора приведен на рис. 2.20.



Рис. 2.20. Поперечное сечение четырехфазного реактивного ШД (зубцов ротора 50, число шагов за один оборот 200, угол шага 1,8)

Угол шага равен $1,8^\circ$, и число шагов на один оборот у этой модели равно 200. На рис. 2.21 представлена серия шестифазных реактивных ШД с углом шага $1,2^\circ$.

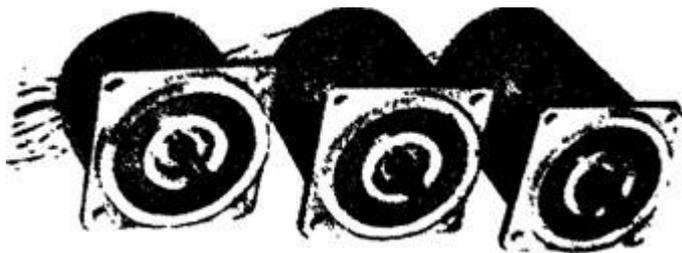
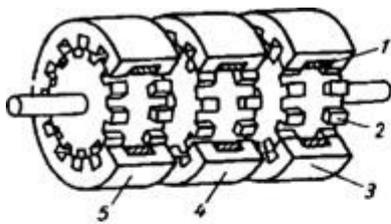


Рис. 2.21. Шестифазные реактивные ШД с углом шага $1,2^\circ$

В. Многопакетные и однопакетные типы ШД. Все реактивные ШД, описанные выше, принадлежат к однопакетному типу двигателей. Их особенность состоит в том, что 3 или 4 фазы выполнены в виде одного слоя, т.е. находятся в одной и той же плоскости. Другой тип реактивных двигателей — многопакетный или каскадный. Разрез такого трехпакетного ШД представлен на рис. 2.22. В этой модели каждый пакет соответствует одной фазе, а ротор и статор имеют одинаковое количество зубцов. Теперь предположим, что возбуждена третья фаза обмотки, расположенная на третьем пакете магнитной системы, и для этого случая зубцы статора и ротора установились на одной линии. В других фазах в это время они расходятся на $1/3$ шага зубца, как показано на рисунке. Направления расхождения первого и второго пакетов противоположны одно другому. Если возбуждение переключается с третьей фазы на первую, то ротор повернется на один шаг по часовой стрелке, а если его переключить на вторую, то на один шаг против часовой стрелки. На рис. 2.23 показаны статор и ротор пятипакетного ШД.



Р и с. 2. 22. Конструкция многопакетного реактивного ШД:
 1 - обмотки; 2 - зубец ротора; 3 - третий пакет; 4 - второй пакет; 5 - первый пакет

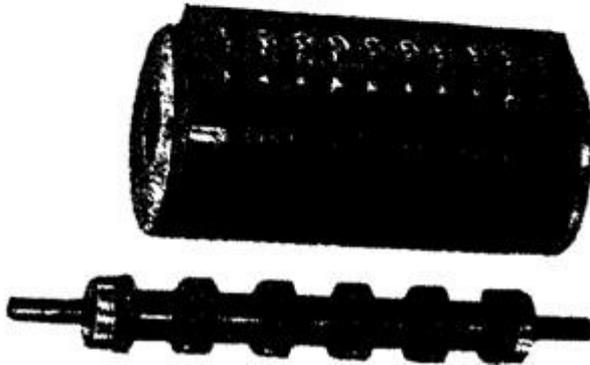


Рис. 2.23. Статор и ротор пятипакетного реактивного ШД

На рис. 2.24, а представлен продольный разрез уникального пятифазного реактивного ШД многопакетного типа, выпускаемого компанией Fanuc и используемого в устройствах с числовым управлением.

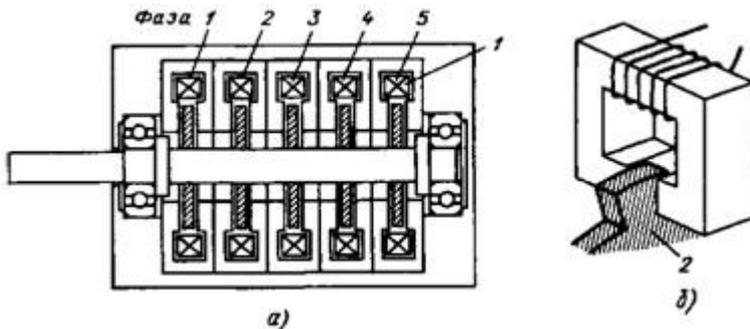


Рис. 2. 24. Продольное сечение пятипакетного реактивного ШД типа "сэндвич":

1 - обмотка; 2 - ротор

На рис. 2.24, б показан принцип действия этого двигателя; зубец ротора проходит между зубцами статора, ширина которых одинакова. Известно, что эта структура создает большой электромагнитный момент на единицу объема ротора.

Так как в многопакетном ШД, показанном на рис. 2.24, используются кольцевые катушки типа соленоида, распределение магнитного поля для этой модели отличается от других, представленных ранее в книге. Сравнение дано на рис. 2.25.

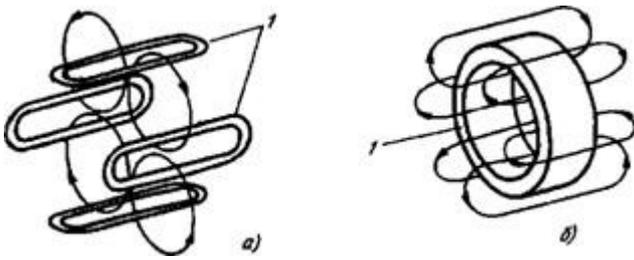


Рис. 2.25. Многополярное (а) и униполярное (б) магнитные поля: 1 - катушка

В однопакетном двигателе магнитные полюсы расположены в плоскости, перпендикулярной валу двигателя. Этот вид распределения магнитного поля называется разноименно полюсным. У многопакетного ШД (рис. 2.24) в плоскости, перпендикулярной валу, расположен только один магнитный полюс (N или S).

Этот вид распределения называется одноименно полюсным. В некоторых типах многопакетных реактивных ШД распределение магнитного поля может быть также разноименнополюсным. Пример такой конструкции представлен на рис. 2.26.

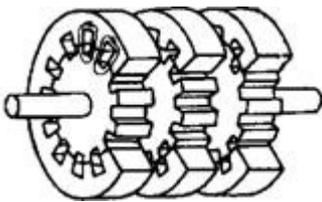


Рис. 2.26. Многопакетный разноименно - полюсный ШД

2.2.2. Шаговые двигатели с постоянными магнитами.

Пример четырехфазного ШД с постоянными магнитами приведен на рис. 2.27.

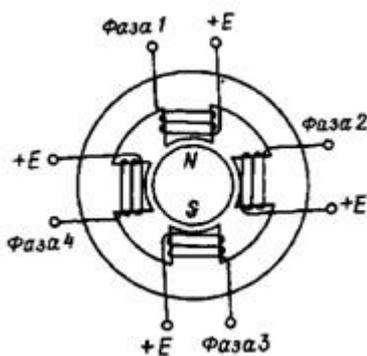


Рис. 2. 27. Поперечное сечение четырехфазного ШД с постоянными магнитами

Цилиндрический постоянный магнит используется в качестве ротора, а статор имеет 4 зубца, вокруг каждого из которых имеется обмотка. Схема управления приведена на рис. 2.28.

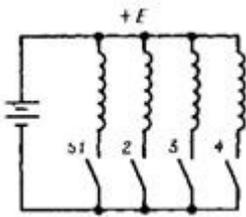


Рис. 2. 28. Принципиальная схема управления для четырех фазного ШД

Выход с каждой из фаз соединен с положительным зажимом источника питания. Если фазы возбуждаются в последовательности 1 à 2 à 3..., ротор будет поворачиваться по часовой стрелке, как показано на рис. 2.29.

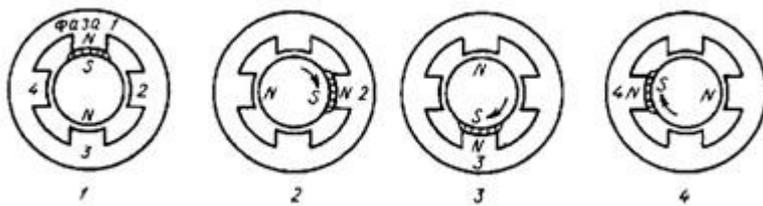


Рис. 2. 29. Шаги в четырехфазном двигателе с постоянными магнитами, возбуждающемся в последовательности 1 à 2 à 3 à 4

Очевидно, что для этого ШД угол шага равен 90° . Если число зубцов статора и магнитных полюсов ротора удвоить, то получится четырехфазный ШД с углом шага 45° (рис. 2.30).

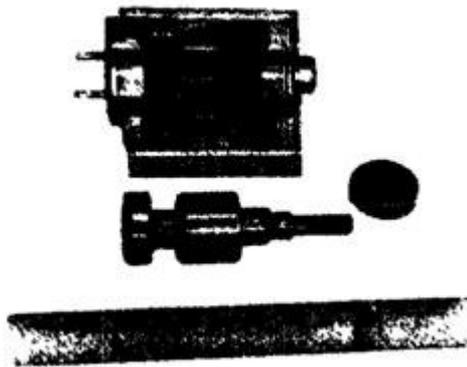


Рис. 2. 30. ШД с постоянными магнитами с углом шага 45°

Для дальнейшего уменьшения угла шага число магнитных полюсов ротора и зубцов статора должно быть увеличено. Однако существует предел как числа зубцов статора, так и числа полюсов ротора. В следующем параграфе рассмотрена альтернативная гибридная конструкция ШД с постоянными магнитами, имеющая малый угол шага.

Особенность ШД с постоянными магнитами состоит в том, что ротор в конце движения приходит в фиксированное положение даже при снятии питания с обмотки статора. Здесь срабатывает механизм фиксации, и данное фиксированное положение называется положением фиксации. Как правило, положения фиксации совпадают с конечными положениями при возбужденных фазах (положениями равновесия), когда возбуждена одна из фаз. При использовании постоянных магнитов возникают две проблемы: во-первых,

постоянные магниты дороги; во-вторых, максимальная плотность магнитного потока ограничена значением намагниченности постоянного магнита. Хотя ферритовые постоянные магниты и дешевы, из-за их относительно низкой намагниченности невозможно получить большой момент.

2.23. Гибридные шаговые двигатели.

Другим типом ШД, использующим для ротора постоянный магнит, является гибридный двигатель. Термин "гибридный" происходит от того, что двигатель работает, используя принципы как реактивного двигателя, так и двигателя с постоянными магнитами. Разрез и сечения (продольное и поперечное) ШД такого типа показаны соответственно на рис. 2.31 и 2.32.

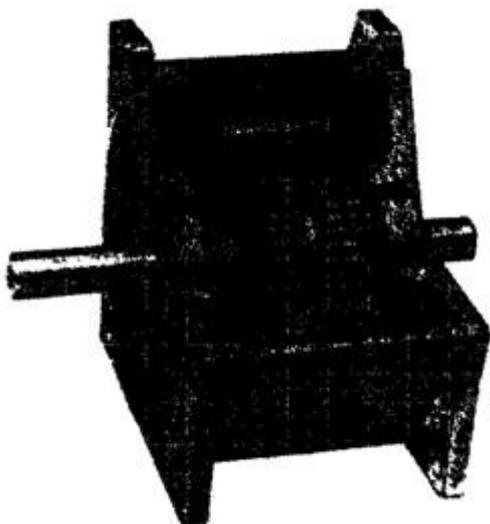


Рис. 2.31. Поперечное сечение гибридного ШД

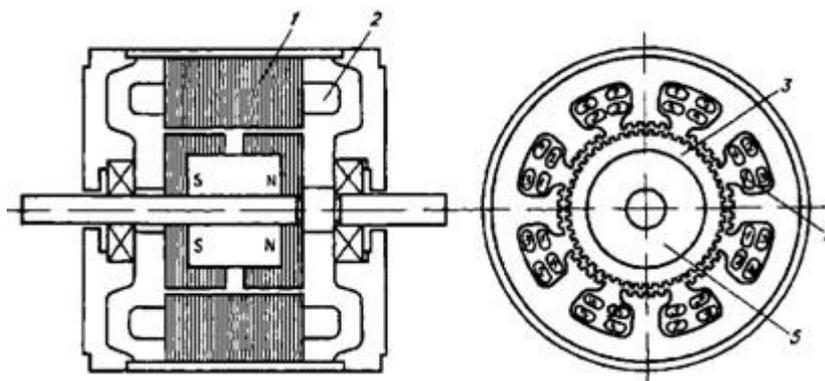


Рис. 2.32. Конструкция гибридного ШД:

1 — магнитопровод статора; 2 - обмотки; 3 - магнитопровод ротора; 4 — обмотка; 5 — постоянный магнит

Структура статора такая же, как у реактивного ШД на рис. 2.20, или очень близка к ней, но обмотки и их соединение отличаются от реактивного двигателя, в котором на одном полюсе намотана только одна из двух катушек одной фазы. В четырехфазном гибридном ШД катушки двух различных фаз намотаны на одном полюсе, как показано на рис. 2.32. Таким

образом, один полюс принадлежит не только одной фазе. Две катушки на полюсе намотаны по так называемой бифилярной схеме, которая будет рассмотрена в 2.26. При возбуждении катушки создают магнитные потоки различной полярности.

Другой важной особенностью гибридного ШД является структура ротора.

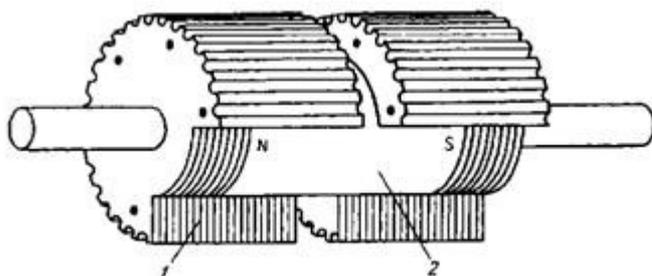


Рис. 2. 33. Структура ротора гибридного ШД: 1 - шихтованная сталь; 2 - постоянный магнит

Цилиндрический постоянный магнит располагается в теле ротора, как показано на рис. 2.33. Постоянный магнит намагничен вдоль оси ШД для создания аксиального магнитного потока (рис. 2.34,б).

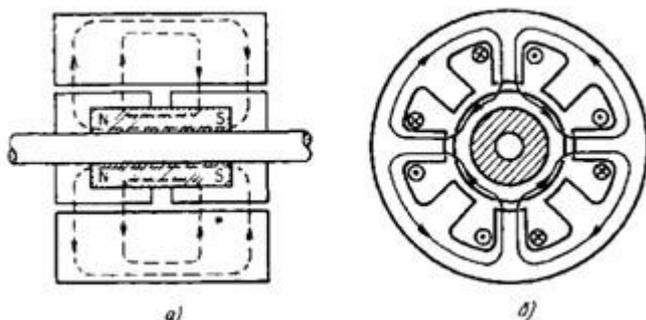


Рис. 2. 34. Прохождение силовых линий магнитного поля в гибридном ШД. Поток, создаваемый ротором (в), образует униполярное магнитное поле, в то время как поток, создаваемый статором (б), образует многополярное магнитное поле.

На каждый из полюсов постоянного магнита надет сердечник ротора из магнито-мягкого материала с зубцами. Зубцы пакетов сдвинуты друг относительно друга на половину зубцового деления. В некоторых ШД зубцы разных пакетов ротора совпадают друг с другом, но зубцы статора имеют сдвиг по углу, как показано на рис. 2.35.

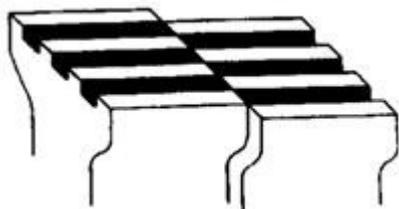


Рис. 2.35. Сдвиг зубцов статора

Магнитное поле, которое создается катушками статора, является разноименно-полюсным (рис. 2.34, б).

Момент в гибридном ШД создается за счет взаимодействия магнитных полей катушек и постоянного магнита в зубчатой структуре воздушного зазора. Для объяснения этого рассмотрим развернутую модель ШД на рис. 2.36. На этой диаграмме зубцовые деления статора и ротора одинаковы.

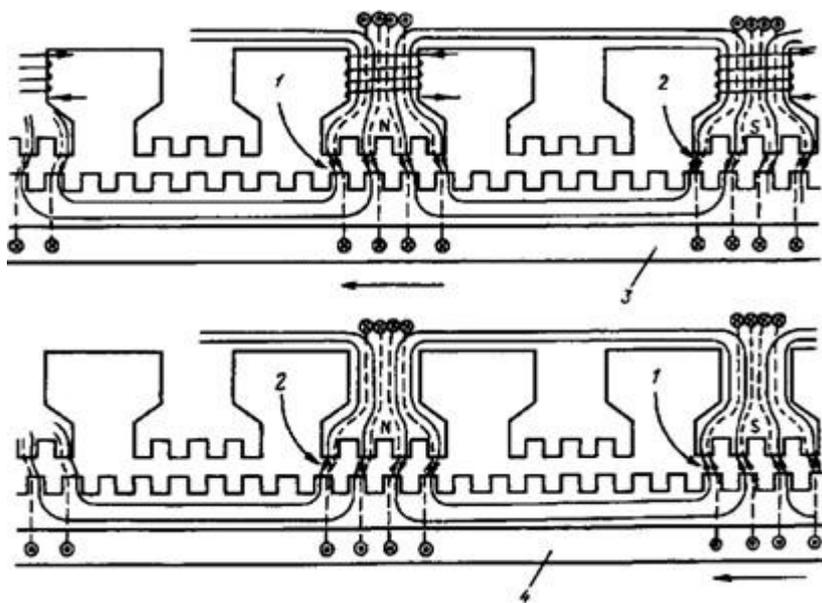


Рис. 2. 36. Развертка четырехфазного гибридного ШД. Вверху поперечное сечение для южного магнитного полюса, внизу - для северного:

1 - усиление одного другим; 2 - нейтрализация одного другим; 3 - постоянный магнит S; 4 - постоянный магнит N

Однако в некоторых ШД зубцовое деление статора несколько больше, чем у ротора, что делается для создания фиксирующего момента и увеличения точности позиционирования (см. рис. 3.16). Верхняя половина этого рисунка представляет собой поперечное сечение северного полюса магнита, а нижняя — южного. Рассмотрим в этой модели магнитное поле под зубцами I и III полюсов. Полюс I возбужден так, что является северным полюсом, а полюс III — южным. Распределение создаваемого ими магнитного поля показано на рисунке сплошными линиями. Пунктирные линии представляют собой поток, создаваемый постоянным магнитом.

Во-первых, следует отметить, что активный момент образуется только за счет магнитного поля обмотки, как в реактивном ШД, из-за того, что зубцы северного и южного полюсов ротора расходятся друг относительно друга на половину зубцового деления. Постоянный магнит создает некоторый фиксирующий момент. Рассмотрим, что произойдет, когда магнитное поле, создаваемое обмоткой, накладывается на поле, создаваемое постоянным магнитом. Результат представлен на том же рисунке. Из-за того что оба поля усиливают друг друга в пространстве, под зубцами полюса появится движущая сила, ориентированная влево (B), в то время как под полюсом III обе компоненты нейтрализуют одна другую, ослабляя силу, ориентированную вправо. Та же самая сила создается и в нижней половине, так как поля статора и ротора имеют одинаковые направления под полюсом III и противоположные под полюсом I. Таким образом, результирующая сила будет направлена влево (B). После того, как ротор повернется на четверть шага между зубцами в этом направлении, движущая сила снизится до нуля и будет достигнуто положение равновесия.

Если возбудить другие полюсы, то ротор сделает следующий шаг.

Как было показано выше, постоянный магнит играет важную роль в создании момента. Но следует также отметить, что структура зубцов статора и ротора в гибридных ШД выбрана так, чтобы обеспечить реализацию малого угла шага.

Этот двигатель [5] был сконструирован для использования в качестве низко скоростного синхронного и назван синхронным индукторным двигателем. В действительности некоторые сегодняшние гибридные двигатели могут быть использованы в качестве двух- или однофазных конденсаторных синхронных двигателей. Двигатель с углом шага $1,8^\circ$ вращается с частотой 60 (или 72) об/мин при 50 (или 60) Гц. Обмотки в этих двигателях не обязательно должны быть бифилярными. Детали обмоток рассмотрены в 2.2.8.

Наиболее распространенным гибридным ШД является четырехфазный 200-шаговый двигатель с углом шага $1,8^\circ$. Этот тип ШД выпускается многими фирмами. Существуют, конечно, гибридные ШД с другими углами шага, например 2 или 5° . В ФРГ фирма Gerhard Berger выпускает гибридные ШД, подробное описание которых можно найти в [6 и 7].

Для того чтобы повысить момент, применяют гибридные многопакетные ШД (рис. 2.37).

Рис. 2.38. Статор и ротор гибридного ШД с тороидальной обмоткой

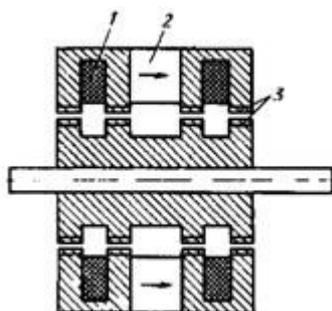


Рис. 2.39. Продольное сечение гибридного ШД с постоянными магнитами на статоре: 1 — обмотка; 2 - кольцевой постоянный магнит; 3 - зубцы

Как видно из рис. 2.39, где изображено продольное сечение этого двигателя, в статоре расположен кольцевой постоянный магнит, а обмотки двух катушек имеют тороидальную форму. В этом двигателе как магнит, так и ток в обмотках создают одноименнополюсное магнитное поле. Зубцы статора в двух пакетах смещены относительно друг друга на четверть зубцового деления, а зубцы четырех пакетов ротора расположены на одной линии.

Принцип работы этого двигателя подобен принципу работы гибридного линейного двигателя, который рассмотрен в 2.2.7.

2.2.5. Двигатель с постоянными магнитами когтеобразного типа.

Еще один тип ШД с постоянным магнитом — это двигатель с когтеобразными полюсами. Поперечное сечение этого ШД показано на рис. 2.40.

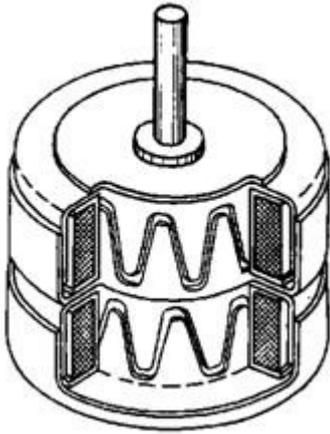


Рис. 2.40. ШД с когтеобразным ротором

Статор штампуют из круглой металлической полосы и вытягивают в форме колокола. Когтеобразные полюсы статора выгибаются внутри в форме полюсов-выступов. Пакет статора образуется соединением двух выгнутых таким образом оболочек, при этом когтеобразные полюсы перемежаются, а обмотка проходит с их внутренней стороны.

Отличительная черта ШД с когтеобразными полюсами состоит в том, что при прохождении тока через обмотки эти полюсы статора создают разноименно-полюсное магнитное поле.

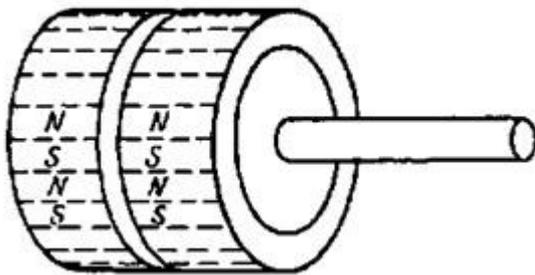


Рис. 2.41. Намагниченность ротора

Как показано на рис. 2.41, ротор в виде цилиндрического керамического магнита (феррита) намагничен так, что также создает разноименно-полюсное магнитное поле. Как правило, количество полюсов для ШД с углом шага $7,5^\circ$ равно 24. Этот тип ШД обычно двухпакетный. Зоны намагниченности двух пакетов ротора находятся на одной линии, как на рис. 2.41, когтеобразные полюсы статора в пакетах смещены друг относительно друга на половину полюсного деления.

Обмотки включают по двухфазной либо по четырехфазной схеме. Обмотки фаз 1 и 3 выполнены бифилярными и помещены в пакет А, а 2 и 4 - в пакет В. Фазы 1 и 3 соединены так, что полярность создаваемого ими магнитного поля противоположна полярности магнитного поля фаз 2 и 4. На рис. 2.42 показана последовательность возбуждения фаз в форме графика возбуждающего тока как для четырехфазной, так и для двухфазной схемы соединения обмоток. В двухфазной схеме управляющий ток имеет прямоугольную форму с чередующимися направлениями.

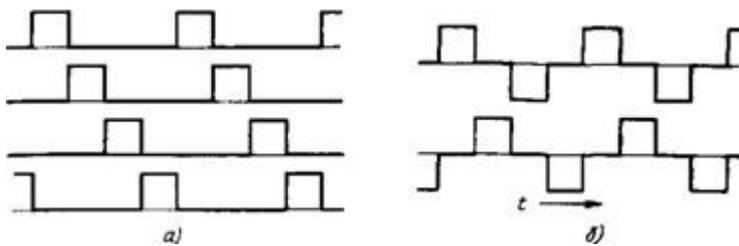


Рис. 2.42. Форма кривой тока, используемая в ШД с когтеобразным ротором:

а - четырехфазная схема; б - двухфазная схема

Разберем работу двухфазной схемы управления, пользуясь рис. 2.43. рассмотрим пространственное расположение магнитных полюсов ротора и зубцов статора в пакете А.

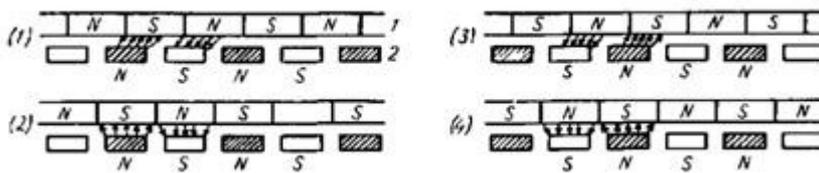


Рис. 2.43. Принцип действия ШД с постоянными магнитами и когтеобразным ротором: 1 — ротор; 2 - зубцы статора

Ротор сначала находится в положении, показанном на схеме (2). Фаза А возбуждается положительным током;

создаваемые при этом магнитные полюсы представлены на той же схеме. Очевидно, что натяжением магнитных силовых линий ротор движется влево. На схеме (2) показано положение равновесия, когда фаза А возбуждена в положительном направлении. Затем, когда она отключается и положительным током возбуждается фаза В, ротор продвинется дальше в том же направлении, так как когтеобразные полюсы статора в пакете В смещены влево относительно полюсов пакета А на половину полюсного деления. На схеме (3) представлен результат возбуждения фазы В. После продвижения ротора и перехода его в положение, показанное на схеме (4), фаза В отключается, а фаза А возбуждается отрицательно направленным током. Отличительной чертой ШД с когтеобразными полюсами является низкая стоимость, они находят широкое применение в качестве двигателей для продвижения бумажной ленты и для перемещения головок в миниатюрных дисковых системах для гибких дисков.

2.2.6. Шаговые двигатели с внешним ротором.

Двигатели могут быть разделены на два типа: с внешним и внутренним ротором. Все ШД, описанные выше, принадлежат ко второму типу, в котором статор окружает ротор. В двигателях с внешним ротором последний расположен вне статора. Шаговые двигатели с внешним ротором выпускают редко [9].

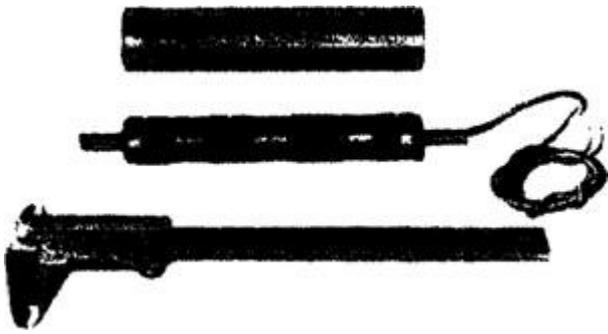


Рис. 2.44. Реактивный ШД с внешним ротором

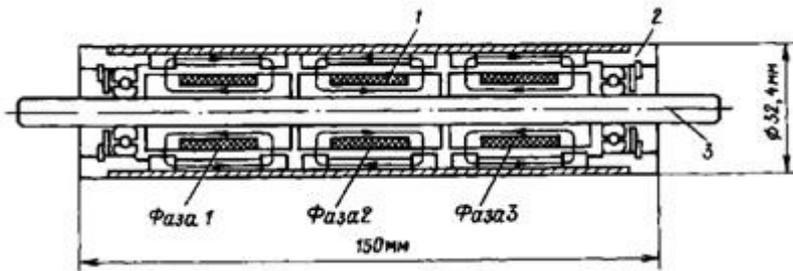


Рис. 2.45. Продольное сечение двигателя с внешним ротором, изображенного на рис. 2.44:

1 - катушка; 2 - ротор; 3 - статор

Двигатель, представленный на рис. 2.44, — 81-шаговый реактивный двигатель с внешним ротором, сконструирован для системы прогона бумаги: его ротор является роликом для прогона бумаги. Как следует из рис. 2.43, статор этого двигателя трехпакетного типа. Три пакета статора закреплены на валу. Внешний ротор соединен с валом двумя подшипниками и свободно вращается.

2.2.7. Линейные шаговые двигатели.

Все двигатели, описанные выше, являются вращающимися машинами. Их конструкции позволяют ротору вращаться относительно статора как по часовой, так и против часовой стрелки.

Однако существуют двигатели, конструкция которых обеспечивает линейное движение, они называются линейными. Видов линейных двигателей существует так же много, как и вращающихся. Они включают двигатели постоянного тока, синхронные, асинхронные и вентильные. Но линейные ШД представляют наибольший интерес среди всех малых линейных двигателей, используемых для управления.

Реактивные линейные двигатели.

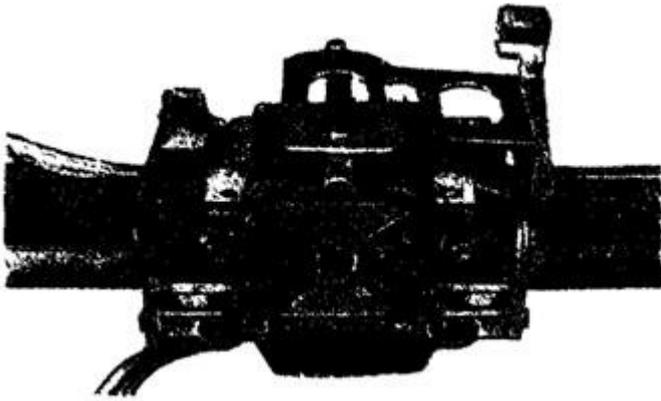


Рис. 2. 46. Трехфазный линейный реактивный ШД, используемый в печатающем устройстве

На рис. 2.46 в качестве примера приведен трехфазный реактивный ШД, который был сконструирован фирмой IBM для движения каретки в серийном печатающем устройстве. На рис. 2.47 изображена связь между зубцами статора, ползунка и обмотками.

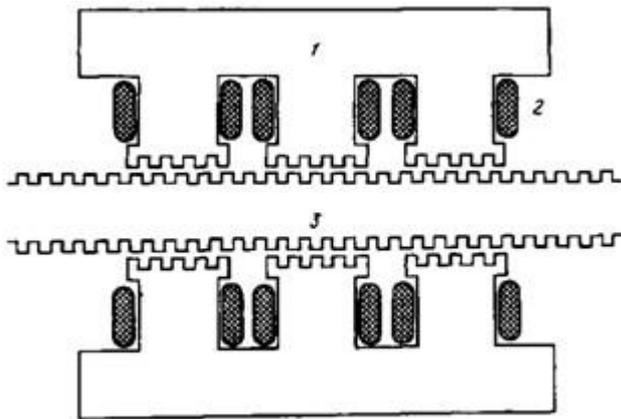


Рис 2 47. Соотношение между зубцами статора, зубцами ползунка и полюсами обмоток: 1 - магнитопровод ползунка; 2 - обмотка; 3 - магнитопровод статора

Сердечники как статора, так и ползунка набраны из пластин электротехнической стали. Динамические характеристики и аспекты управления этого типа двигателя рассмотрены в [10].

Линейные двигатели с постоянными магнитами. Принцип работы линейного ШД с постоянными магнитами [11] приведен на рис. 2.48.

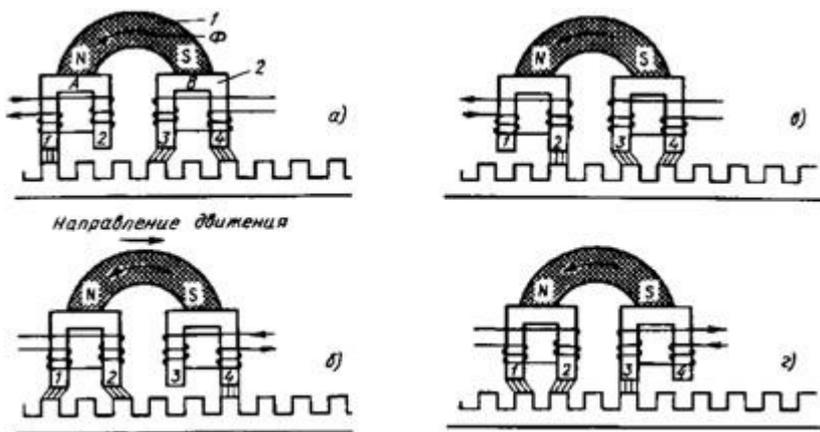


Рис. 2.48. Принцип действия линейного ШД: 1 - постоянный магнит; 2 - электромагнит

Двигатель, который здесь называется ползунком, состоит из постоянного магнита и электромагнитов А и В. Поток, созданный постоянным магнитом, замыкается через сердечники электромагнитов, воздушные зазоры между сердечником и статором. Если в катушке отсутствует ток, то магнитный поток проходит через оба зубца сердечника, как показано для электромагнита В (рис. 2.48, а и в). Если же обмотка возбуждена, то магнитный поток концентрируется только в одном зубце сердечника. Это показано на рис. 2.48, а для электромагнита А. В этом случае плотность магнитного потока через один зубец максимальна, а через другой — незначительна.

На рис. 2.48, а зубец 1 электромагнита А расположен напротив зубца статора. Когда катушка В подключается к источнику питания и ток проходит в направлении, показанном на рис. 2.48, б, ползунок сдвинется вправо на четверть шага зубцов и зубец 4 установится на одной прямой с ближайшим зубцом статора. Далее электромагнит В отключается и обмотка электромагнита А возбуждается с противоположной полярностью. Это создает силу для продвижения ползунка вправо, а зубец 2 устанавливается на одной прямой с ближайшим зубцом статора (рис. 2.48, в). Для дальнейшего продвижения ползунка в этом направлении обмотка электромагнита А отключается и обмотка электромагнита В (рис. 2.48, г) возбуждается в направлении, противоположном предыдущему.

На международной конференции по ШД и системам управления в 1979 г. был представлен линейный ШД (рис. 2.49), который двигался по статору в виде рейки [12]. Для минимизации массы ползунка применяется постоянный магнит из SmCo_5 .

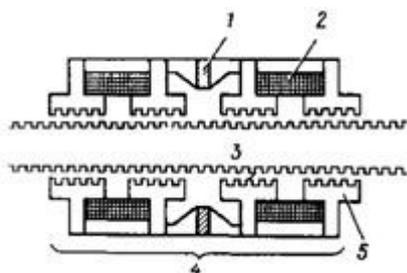


Рис. 2.49. Продольное сечение линейного ШД с постоянными магнитами:

1 - магнит SmCo_5 ; 2 - обмотка; 3 - направляющая статора; 4 - ползунок; 5 — набор зубцов.

На рис. 2.50 изображена структура линейного ШД, используемого для движения чертежной головки автоматической чертежной системы. В двигателе используются четыре плоских

магнита из SmCo_5 .

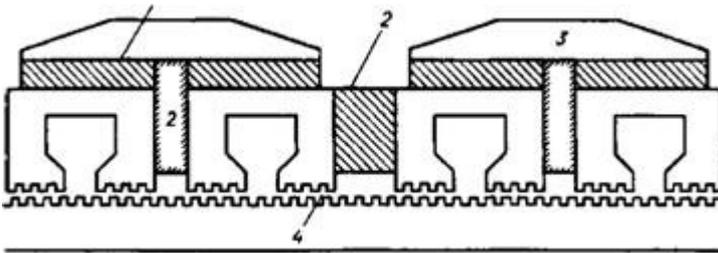


Рис. 2.50. Структура линейного ШД с постоянными магнитами, используемого в автоматическом чертежном устройстве: 1 - постоянный магнит SmCo_5 ; 2 — прокладка; 3 - хомут; 4 - неподвижные зубцы.

2.2.8. Обычные и бифилярные обмотки.

Теперь рассмотрим типы обмоток, используемых в ШД. Соленоидные катушки применяют в многопакетных реактивных ШД, двигателях с постоянными магнитами и когтеобразными полюсами. С другой стороны, для гибридных ШД и однопакетных реактивных двигателей выбирают обычную или бифилярную обмотку. В первом из них провод навивается несколько раз на простой полюс. Во втором — два сложенных провода наматывают, как показано на рис. 2.51, но отделяют один от другого, чтобы использовать независимо друг от друга. Если один провод принадлежит фазе 1, то другой - фазе 3. Аналогично, если один — фазе 2, то другой — фазе 4.

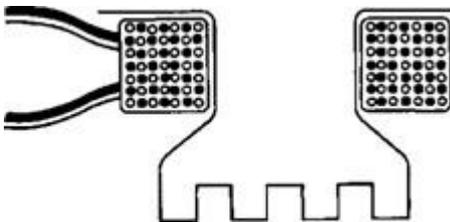


Рис. 2.51. Бифилярная обмотка

Одна из целей бифилярной обмотки — это намагничивание полюса статора в противоположных направлениях. Возбуждение фазы может быть выполнено по одной из трех схем, приведенных на рис. 2.52.

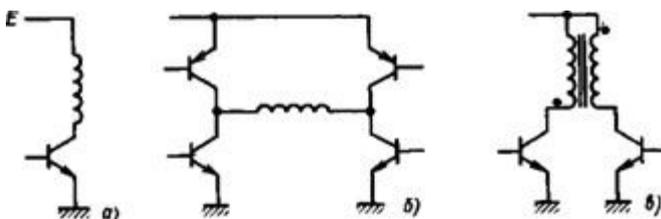


Рис. 2.52. Три основные схемы возбуждения:

а - обычная обмотка, однополупериодное возбуждение; б — обычная обмотка, двухполупериодное возбуждение; в - бифилярная обмотка, двухполупериодное возбуждение.

В обычном случае (рис.2.52, а) полярность полюса при возбуждении обмотки может быть всегда либо северной, либо южной и исключает возможность обратного переключения. Этот способ возбуждения называется одноименно полюсным возбуждением. В цепи (рис. 2.52, б) направление тока в обмотке с помощью инвертора может переключаться на противоположное. Однако для каждой фазы требуются четыре транзистора. Это возможно при бифилярном возбуждении. Схема (рис. 2.52, в) включает пару бифилярных обмоток, при возбуждении которых полюс статора намагничивается в любом направлении. Если возбуждена одна из обмоток, получается северный магнитный полюс, если другая — южный. Две катушки, намотанные по бифилярной схеме, являются сцепленными по магнитному потоку, если какая-либо из них возбуждена. Если вместо бифилярных обмоток взять две независимые катушки, между ними возникает перепад индуктивностей, а точность позиционирования уменьшится.

В основном эффективность двигателей с постоянными магнитами, действующих в режиме переменной полярности, выше, чем получаемая в однополярном режиме.

Преимущества использования бифилярных обмоток в однопакетных реактивных ШД рассмотрены в 2.3.5.