

Лекція № 5

Тема № 4: Автоматизований електропривод з спеціальними двигунами

1. Шаговые исполнительные двигатели. Общие сведения.
2. Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением.
3. Шаговые двигатели с постоянными магнитами (активным ротором).
4. Гибридные шаговые двигатели.
5. Биполярные и униполярные шаговые двигатели

1. ШАГОВЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Шаговый двигатель – это электромеханическое устройство, которое преобразует электрические импульсы в дискретное механическое угловое перемещение выходного вала (общий вид ШД представлен на рис. 1). Угол поворота вала, называемый **угловым шагом**, точно соответствует числу и порядку следования управляющих импульсов, поступающих на обмотки статора шагового двигателя.



Рис. 1. Внешний вид шаговых двигателей семейства ДШИ-200.

По принципу работы шаговые двигатели являются синхронными, так как электромагнитный момент, действующий на их ротор, создается силами магнитного притяжения полюсов статора и ротора.

Шаговые двигатели получили наибольшее применение в автоматизированном программном электроприводе.

Существуют три основных типа шаговых двигателей:

- двигатели с переменным магнитным сопротивлением (ШД с пассивным (невозбужденным) ротором или их еще называют *реактивными*);
- двигатели с постоянными магнитами (активным ротором);
- гибридные двигатели.

Достоинства ШД:

- угол поворота ротора определяется числом импульсов, которые поданы на двигатель
- двигатель обеспечивает полный момент в режиме остановки (если обмотки запитаны)
- прецизионное позиционирование и повторяемость. Хорошие шаговые двигатели имеют точность 3-5% от величины шага. Эта ошибка не накапливается от шага к шагу
- возможность быстрого старта/остановки/реверсирования

- высокая надежность, связанная с отсутствием щеток, срок службы шагового двигателя фактически определяется сроком службы подшипников
- однозначная зависимость положения от входных импульсов обеспечивает позиционирование без обратной связи
- возможность получения очень низких скоростей вращения для нагрузки, присоединенной непосредственно к валу двигателя без промежуточного редуктора
- может быть перекрыт довольно большой диапазон скоростей, скорость пропорциональна частоте входных импульсов

Недостатки ШД:

- шаговым двигателем присуще явление резонанса
- возможна потеря контроля положения ввиду работы без обратной связи
- потребление энергии не уменьшается даже без нагрузки
- затруднена работа на высоких скоростях
- невысокая удельная мощность
- относительно сложная схема управления

2. ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ СОПРОТИВЛЕ- НИЕМ

Шаговые двигатели с пассивным ротором. Такие двигатели называют реактивными. Статор реактивного трехфазного шагового двигателя (рис. 2) имеет шесть

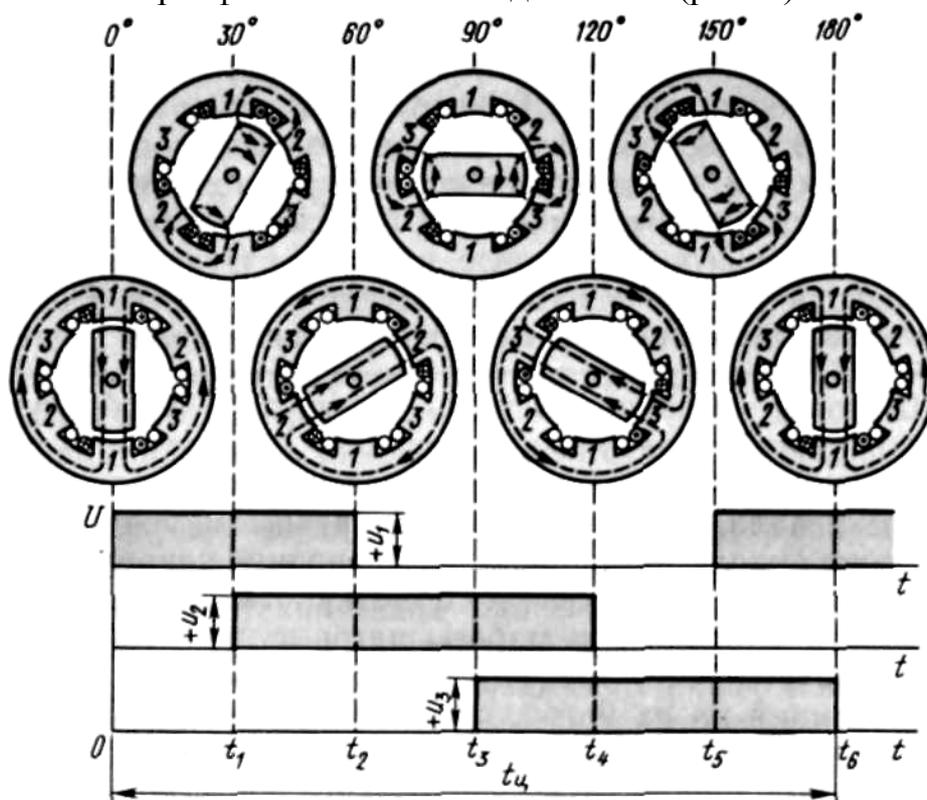


Рис. 2. К принципу действия реактивного шагового двигателя

явно выраженных полюсов (по два полюса на фазу), а ротор – два выступа (невозбужденных полюса). При прохождении импульса тока в обмотке фазы 1 статора ротор занимает положение, при котором его ось совмещается с осью 1–1 полюсов статора. В мо-

мент времени t_1 при появлении импульса тока в фазе 2 на ротор действуют силы магнитного притяжения, обусловленные одновременным намагничиванием полюсов 1–1 и 2–2. В результате ротор повернется на угловой шаг $\alpha_{ш} = 30^\circ$. В момент времени t_2 импульс тока в фазе 1 прекратится и ротор, совершив еще один шаг $\alpha_{ш} = 30^\circ$, займет положение по оси 2–2. В момент t_3 появится импульс тока в фазе 3 и ротор, повернувшись на 30° , займет среднее положение между полюсами 2–2 и 3–3. Суммарный угол поворота ротора составит 90° . В моменты времени t_4 , t_5 и t_6 ротор также будет совершать угловые шаги по 30° и в конце цикла займет положение по оси полюсов статора 1–1, совершив половину оборота (180°). В последующие циклы подачи на обмотку статора управляющих импульсов напряжения u_1 , u_2 и u_3 процессы в шаговом двигателе будут повторяться. Двигатель работает по шеститактной схеме коммутации с раздельно-совместным включением обмоток фазы: $1 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 2 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 3 \rightarrow 3, 1 \rightarrow \dots$

На рис. 3 представлен еще один пример ШД с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала. Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты на рисунке ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг $\alpha_{ш} = 30^\circ$.

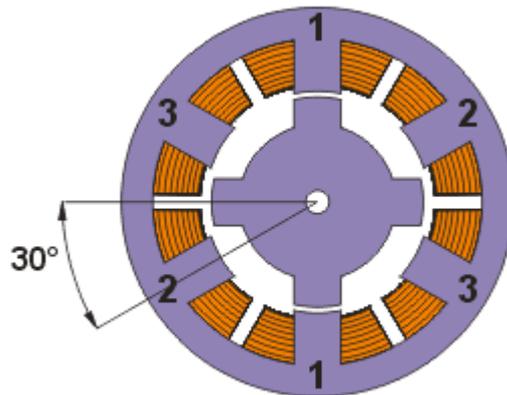


Рис. 3. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

Реактивные шаговые двигатели работают от однополярных импульсов, так как изменение полярности импульса не изменяет направления сил, действующих на невозбужденный ротор. Чтобы изменить направление ротора (реверс) шагового двигателя, необходимо поменять схему коммутации обмоток статора, например, принять $1 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 3 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 2 \rightarrow 2, 1 \rightarrow \dots$

Если в рассматриваемом двигателе принять схему коммутации с раздельным включением обмоток статора: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ то угловой шаг двигателя увеличится в два раза: $\alpha_{ш} = 60^\circ$. В общем случае угловой шаг двигателя:

$$\alpha_{ш} = \frac{360}{2p_2 m_1 k_\phi}, \quad (5.1)$$

где $2p_2$ – число полюсных выступов на роторе;

m_1 – число фаз обмотки статора;

k_ϕ — коэффициент, зависящий от способа включения фаз обмотки статора (при раздельном включении $k_\phi = 1$, при раздельно-совместном $k_\phi = 2$).

Уменьшение углового шага $\alpha_{ш}$ повышает быстродействие, так как сокращается время на перемещение ротора при обработке сигнала и увеличивается точность работы шагового двигателя. Для уменьшения углового шага $\alpha_{ш}$ увеличивают число полюсных выступов на роторе $2p_2$. Если в рассматриваемом двигателе применить ротор крестообразного сечения с $2p_2 = 4$, то при отдельно-совместном включении обмоток фаз статора угловой шаг уменьшится вдвое: $\alpha_{ш} = 15^\circ$. Дальнейшее уменьшение шага возможно при использовании в двигателе принципа редукции скорости. На полюсных наконечниках статора и на поверхности цилиндрического ротора делают открытые пазы, придавая поверхностям этих элементов гребенчатую форму. Пазы на статоре и роторе выполняют с одинаковым шагом. На рис. 8.15 показана конструкция шагового двигателя с числом полюсов на статоре $2p_1 = 8$ и числом пазов на цилиндрическом роторе $Z_2 = 36$. Угловой шаг этого двигателя $\alpha_{ш} = 2,5^\circ$. Возможно и дальнейшее уменьшение шага.

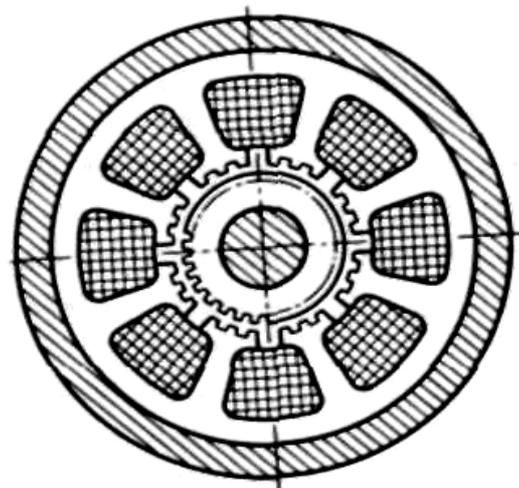


Рис. 4. Магнитная система реактивного ШД с электромагнитной редукцией

Недостаток реактивных шаговых двигателей с электромагнитной редукцией – небольшой вращающий момент.

Один из основных параметров шаговых двигателей — **частота приемистости** $f_{пр}$, представляющая собой наибольшую частоту следования управляющих импульсов, при которой ротор двигателя втягивается в синхронизм с места без потери шага.

Частота приемистости зависит от нагрузки на валу шагового двигателя: в режиме холостого хода частота приемистости наибольшая $f_{пр max}$, а с появлением нагрузки — уменьшается. Частота приемистости при номинальной нагрузке реактивных шаговых двигателей $f_{пр ном} \leq 1000 \div 1200$ Гц. При увеличении углового шага частота приемистости уменьшается.

Шаговый двигатель работает совместно с коммутатором, преобразующим заданную последовательность управляющих импульсов в m_1 -фазную систему импульсов напряжения прямоугольной формы.

3. ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ (АКТИВНЫМ РОТОРОМ)

ШД с активным ротором. Ротор такого двигателя выполнен из постоянного магнита, а статор — такой же, как у реактивных шаговых двигателей, т. е. с сердечником с явно выраженными полюсами и многофазной обмоткой. В шаговом двигателе с активным ротором можно применять двухполярные импульсы напряжения, так как с изменением направления тока в обмотке фазы статора меняется магнитная полярность соответствующих полюсов. Так как ротор двигателя намагничен, то изменение полярности полюсов статора вызывает изменение направления сил взаимодействия между полюсами статора и ротора.

Рассмотрим принцип действия двухфазного двигателя с двухполюсным постоян-

ным магнитом на роторе и четырьмя явно выраженными полюсами на статоре (рис. 5).

При подаче импульса напряжения положительной полярности ($+u_1$) в обмотку 1 фазы два полюса этой фазы приобретают магнитную полярность, как на рис. 5, а, при этом ротор занимает вертикальное положение, обусловленное направлением сил взаимного притяжения полюсов статора и ротора разноименной полярности. В момент времени t_1 (рис. 5, д) импульс в фазе 1 прекращается, поступает положительный импульс ($+u_2$) в фазу 2. При этом обмотка 1 фазы обесточивается, а полюса фазы 2 приобретают магнитную полярность, как на рис. 5, б. В результате ротор поворачивается против часовой стрелки на $\alpha_{\text{ш}}=90^\circ$. В момент времени t_2 на обмотку фазы 1 подается импульс напряжения отрицательной полярности ($-u_1$), а с обмотки 2 фазы импульс напряжения снимается. В результате полюса этой фазы приобретут полярность, как на рис. 5, в, и ротор повернется против часовой стрелки еще на 90° . Затем в момент времени t_3 импульс напряжения отрицательной полярности поступит в обмотку 2 фазы и ротор повернется еще на 90° (рис. 5, г). При подаче импульса напряжения ($+u_1$) на обмотку фазы 1 ротор заканчивает полный оборот и занимает исходное положение (см. рис. 5, а). Работа шагового двигателя соответствует коммутации с раздельным включением обмоток фазы и разнополярными импульсами напряжения $(+u_1) \rightarrow (+u_2) \rightarrow (-u_1) \rightarrow (-u_2) \rightarrow (+u_1)$. Если в рассмотренном двигателе применить коммутацию с раздельно-совместным включением обмоток фазы, тогда:

$(+u_1) \rightarrow (+u_1)(+u_2) \rightarrow (+u_2) \rightarrow (+u_2)(-u_1) \rightarrow (-u_1) \rightarrow (-u_1)(-u_2) \rightarrow (-u_2)(+u_1) \rightarrow (+u_1)$,
то ШД будет работать с угловым шагом $\alpha_{\text{ш}}=45^\circ$, при этом вращающий момент на роторе возрастет примерно в 1,5 раза.

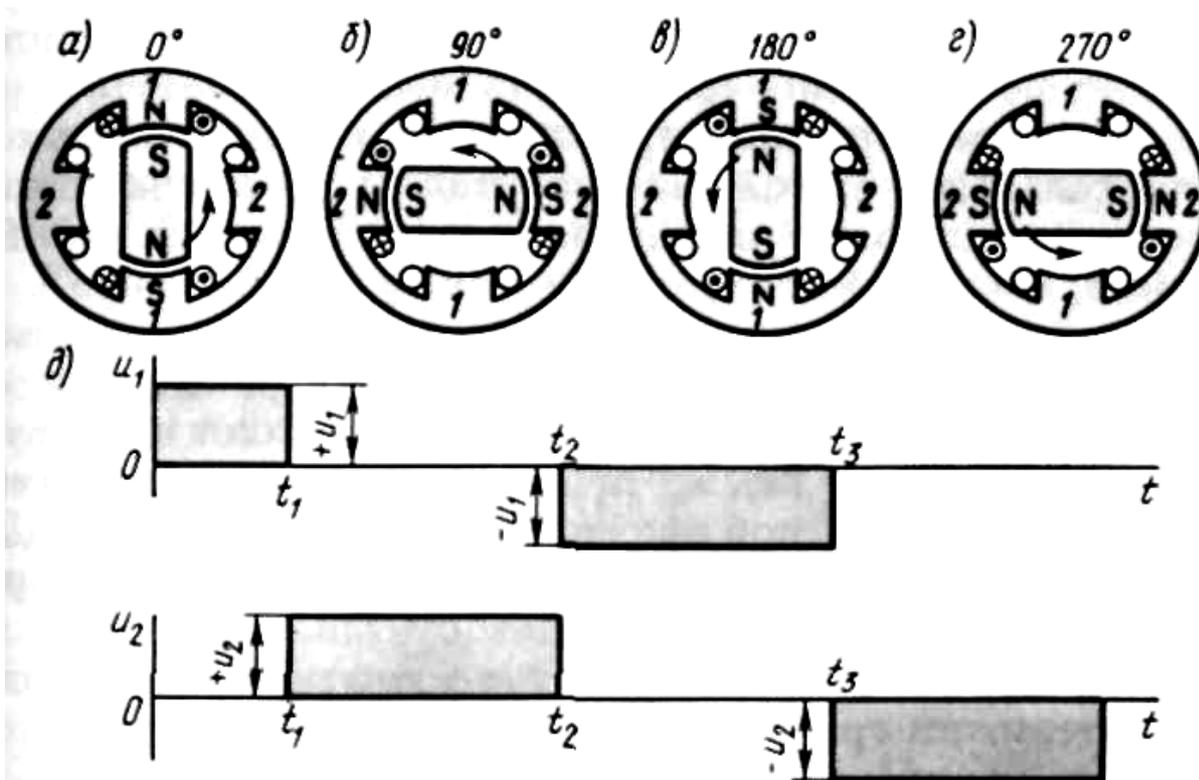


Рис. 5. К принципу действия шагового двигателя с активным ротором

ШД с активным ротором работают также с однополярными импульсами напряжения (что упрощает конструкцию коммутатора), но при этом число обмоток фазы на статоре (и число полюсов) увеличивается.

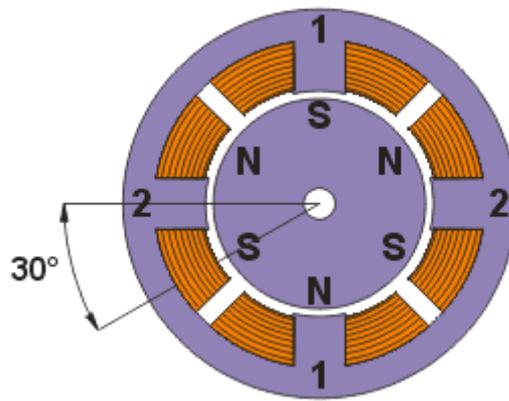


Рис. 5. Двигатель с постоянными магнитами.

Разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами показан на рис. 6.

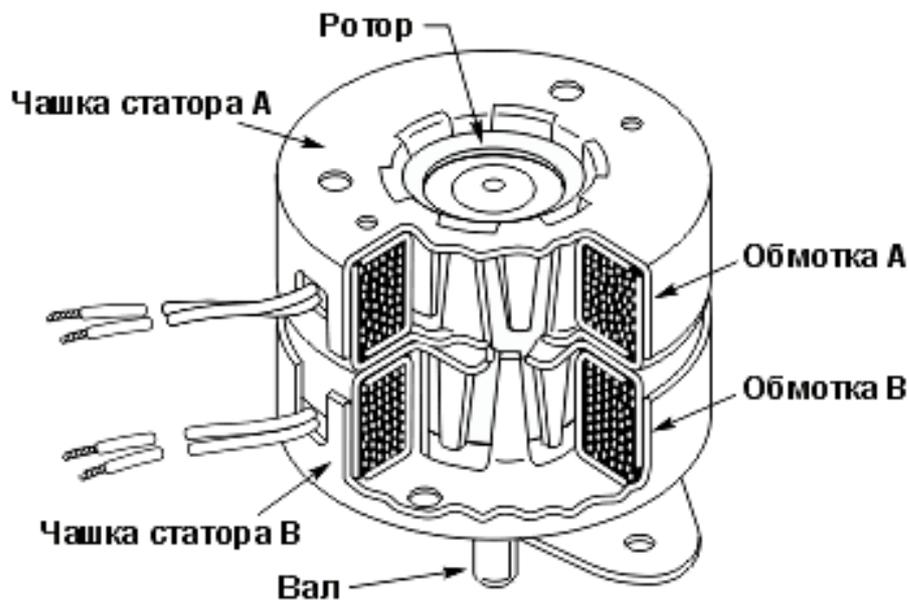


Рис. 6. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами

По сравнению с реактивными ШД с активным ротором создают *большие вращающие моменты, обеспечивают фиксацию ротора* при снятии управляющего сигнала.

Недостаток двигателей с активным ротором – большой угловой шаг (15–90°). Это объясняется технологическими трудностями изготовления ротора с постоянными магнитами при большом числе полюсов. Для уменьшения углового шага увеличивают число фаз в обмотке статора или применяют двухстаторную конструкцию. Двухстаторные двигатели имеют два одинаковых сердечника статора с одинаковыми обмотками, на валу размещены два ротора, при этом сердечники статоров смещены относительно друг друга на половину зубцового деления (роторы расположены соосно). Недостаток таких двигателей – сложность изготовления.

Из-за разнообразных требований, предъявляемых к исполнительным ШД, были созданы специальные шаговые двигатели – линейные, волновые, с катящимся ротором.

Рассматривая принцип действия шагового двигателя, влияние нагрузочного момента на валу двигателя не учитывалось. Если на вал шагового двигателя действует нагрузочный момент M_n , то при переключении управляющего импульса с одной фазы на другую вектор МДС статора повернется на угол $\alpha_{ш}$, ротор двигателя, поворачиваясь за вектором МДС, будет отставать от него на угол $\Delta\theta_c$, называемый углом статической ошибки ШД, эл. град:

$$\Delta\Theta_c = \arcsin\left(\frac{M_n}{M_{max}}\right), \quad (5.2)$$

где M_{max} – максимальный статический момент, соответствующий углу смещения ротора относительно вектора МДС статора $\Theta = 90^\circ$.

Быстродействие ШД определяется скоростью протекания электромагнитных процессов при переключении управляющих импульсов напряжения с одной обмотки фаз статора на другую. Скорость протекания процессов оценивается электромагнитной постоянной времени, с:

$$T_\Theta = \frac{L_\phi}{r_\phi}, \quad (5.3)$$

где L_ϕ – индуктивность обмотки фазы статора, Гн; r_ϕ – активное сопротивление обмотки фазы, Ом.

Для повышения быстродействия ШД в обмотки фаз статора включают последовательно добавочные резисторы $R_{доб}$, тогда:

$$T_\Theta = \frac{L_\phi}{r_\phi + R_{доб}}. \quad (5.4)$$

Энергетический показатель ШД – потребляемая мощность P_1 .

Частота вращения шаговых двигателей регулируется изменением частоты подачи управляющих импульсов напряжения на обмотку статора, в зависимости от которой меняются режимы работы ШД: статический, квазистатический, установившийся и переходные.

Статический режим – режим, при котором по обмоткам фаз статора проходит постоянный ток, создающий неподвижное в пространстве магнитное поле. При этом ротор двигателя находится в состоянии статического равновесия, а прикладываемый к валу нагрузочный момент отклоняет ротор в ту или иную сторону от уравновешенного состояния на $\Delta\Theta_c$, т. е. на угол статической ошибки.

Квазистатический режим – режим работы ШД при единичных угловых шагах, когда к началу последующего шага все переходные процессы, связанные с обработкой предыдущего шага, полностью заканчиваются. Для обеспечения требуемой частоты отработки шагов в квазистатическом режиме применяют различные способы торможения ротора.

Установившийся режим – режим, соответствующий постоянной частоте следования управляющих сигналов. Ротор двигателя в этом режиме имеет постоянную частоту вращения, однако при переходе из одного установившегося состояния в другое могут возникать колебания ротора.

Переходные режимы – это основные режимы работы (пуска, ускорения, реверса) исполнительного ШД, работающего в автоматизированном электроприводе.

Основное требование к ШД в этих режимах – точная отработка частоты следования управляющих сигналов без потери шага при любом характере изменения частоты.

4. ГИБРИДНЫЕ ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Гибридные ШД являются более дорогими, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость.

Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага 3.6 – 0.9 град.). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении (рис. 7).

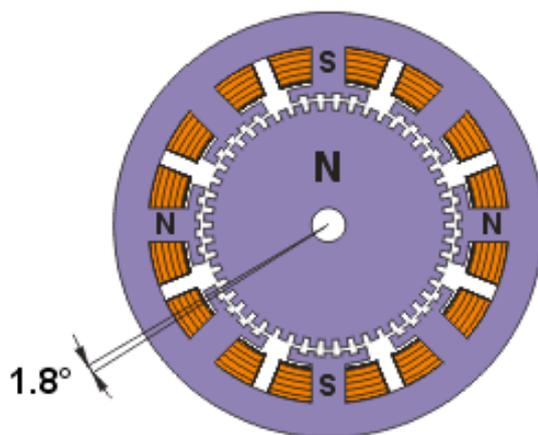


Рис. 7. Гибридный двигатель

Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянным магнит. Таким образом, зубцы верхней половинки ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половинки – южными. Кроме того, верхняя и нижняя половинки ротора повернуты друг относительно друга на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок. Зубчатые полюсные наконечники ротора, как и статор, набраны из отдельных пластин для уменьшения потерь на вихревые токи. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для 3.6 град. двигателей и 8 основных полюсов для 1.8- и 0.9 град. двигателей. 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.

Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными. По сути гибридный двигатель является двигателем с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов. По способу управления такие двигатели одинаковы, дальше будут рассматриваться только такие двигатели. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот, соответственно шаг равен 3.6 грд или 1.8 грд. Большинство контроллеров позволяют работать в полушаговом режиме, где этот угол вдвое меньше, а некоторые контроллеры обеспечивают микрошаговый режим.

5. БИПОЛЯРНЫЕ И УНИПОЛЯРНЫЕ ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В зависимости от конфигурации обмоток двигателя делятся на биполярные и униполярные. Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна реперолюсовываться драйвером. Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рис. 8а).

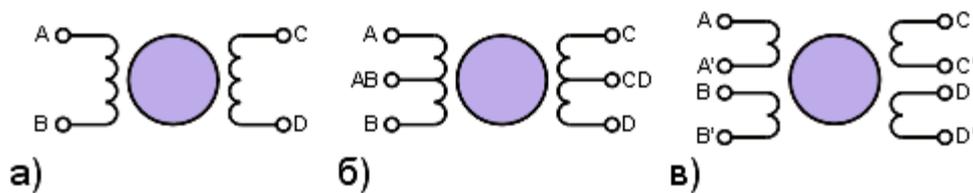


Рис. 8. Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в).

Униполярный двигатель также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема драйвера. Драйвер должен иметь только 4 простых ключа. Таким образом, в униполярном двигателе используется другой способ изменения направления магнитного поля. Средние выводы обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов (рис. 8б). Иногда униполярные двигатели имеют отдельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8 (рис. 8в). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами тоже можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности.

Биполярный или униполярный?

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 омических 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 использование оптимально. В таком двигателе сечение отдельных обмоток вдвое больше, а омическое сопротивление – соответственно вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток в корень из двух раз при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте примерно 40%. Если же повышенного момента не требуется, униполярный 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 драйверы 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.