

Лабораторная работа № 5

УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Цель работы: Изучить устройство, принцип действия, основные параметры шаговых двигателей и способы управления их обмотками.

1. Общие сведения

Шаговый двигатель (ШД) – это электромеханическое устройство, которое преобразует электрические импульсы в дискретные механические перемещения. Внешне он практически ничем не отличается от двигателей других типов. Чаще всего это круглый корпус, вал, несколько выводов. Однако шаговые двигатели обладают некоторыми уникальными свойствами, что делает их исключительно удобными для применения или даже незаменимыми в некоторых областях.

Шаговые двигатели относятся к классу бесколлекторных двигателей постоянного тока. Как и любые бесколлекторные двигатели, они имеют высокую надежность и большой срок службы, что позволяет использовать их в критичных к надежности применениях. По сравнению с обычными двигателями постоянного тока, шаговые двигатели требуют значительно более сложных схем управления, которые должны выполнять все коммутации обмоток при работе двигателя. Кроме того, сам шаговый двигатель – дорогостоящее устройство, поэтому там, где точное позиционирование не требуется, обычные коллекторные двигатели имеют заметное преимущество. Следует отметить, что в последнее время для управления коллекторными двигателями все чаще применяют контроллеры, которые по сложности практически не уступают контроллерам шаговых двигателей.

Одним из главных преимуществ шаговых двигателей является возможность осуществлять точное позиционирование и регулировку скорости без датчика обратной связи. Это очень важно, так как такие датчики могут стоить намного больше самого двигателя. Однако это подходит только для систем, которые работают при малом ускорении и с относительно постоянной нагрузкой. В то же время системы с обратной связью способны работать с большими ускорениями и даже при переменном характере нагрузки. Если нагрузка шагового двигателя превысит его момент, то информация о положении ротора теряется и система требует калибровки с помощью, например, концевого выключателя или другого датчика. Системы с обратной связью не имеют подобного недостатка.

При проектировании конкретных систем приходится делать выбор между обычным 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 меньшую максимальную скорость по сравнению с коллекторными двигателями, что ограничивает максимальное передаточное число и, соответственно, увеличение момента с помощью редуктора. Готовые шаговые двигатели с редукторами выпускаются промышленностью в малых объемах. Еще одним фактом, ограничивающим применение редуктора, является присущий ему люфт.

Возможность получения низкой частоты вращения часто является причиной того, что разработчики, будучи не в состоянии спроектировать редуктор, применяют шаговые двигатели неоправданно часто. В то же время 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. Приводы на основе коллекторных двигателей очень часто применяются в технике военного назначения, а это косвенно говорит о хороших параметрах и высокой надежности таких приводов. Да и в современной бытовой технике, автомобилях, промышленном оборудовании, коллекторные двигатели распространены достаточно

широко. Тем не менее, для шаговых двигателей имеется своя, хотя и довольно узкая, сфера применения, где они незаменимы.

ШД обладают следующими особенностями:

1. Угол поворота ротора определяется числом импульсов, которые поданы на двигатель;
2. Двигатель обеспечивает полный момент в режиме остановки (если обмотки запитаны);
3. Прецизионное позиционирование и повторяемость. Хорошие шаговые двигатели имеют точность 3-5% от величины шага. Эта ошибка не накапливается от шага к шагу;
4. Возможность быстрого старта/остановки/реверсирования;
5. Высокая надежность, связанная с отсутствием щеток, срок службы шагового двигателя фактически определяется сроком службы подшипников;
6. Однозначная зависимость положения от входных импульсов обеспечивает позиционирование без обратной связи;
7. Возможность получения очень низких скоростей вращения для нагрузки, присоединенной непосредственно к валу двигателя без промежуточного редуктора;
8. Может быть перекрыт довольно большой диапазон скоростей, скорость пропорциональна частоте входных импульсов.

Шаговые двигатели также имеют *недостатки*:

1. Им присуще явление резонанса;
2. Возможна потеря контроля положения ввиду работы без обратной связи;
3. Потребление энергии не уменьшается даже без нагрузки;
4. Затруднена работа на высоких скоростях;
5. Невысокая удельная мощность;
6. Относительно сложная схема управления.

2. Типы шаговых двигателей

Существуют **три основных типа** шаговых двигателей:

1. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением;
2. Двигатели с постоянными магнитами;
3. Гибридные двигатели.

Определить тип двигателя можно “на ощупь”: при вращении вала обесточенного двигателя с постоянными магнитами (или гибридного) чувствуется переменное сопротивление вращению, двигатель вращается как бы со щелчками. В то же время вал обесточенного двигателя с переменным магнитным сопротивлением вращается свободно. Гибридные двигатели являются дальнейшим усовершенствованием двигателей с постоянными магнитами и по способу управления ничем от них не отличаются. Определить тип двигателя можно также по конфигурации обмоток. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением обычно имеют три (реже четыре) обмотки с одним общим выводом. Двигатели с постоянными магнитами чаще всего имеют две независимые обмотки. Эти обмотки могут иметь отводы от середины. Иногда двигатели с постоянными магнитами имеют 4 отдельных обмотки.

В шаговом двигателе вращающий момент создается магнитными потоками статора и ротора, которые соответствующим образом ориентированы друг относительно друга. Статор изготовлен из материала с высокой магнитной проницаемостью и имеет несколько полюсов. Полюс можно определить как некоторую область намагниченного тела, где магнитное поле сконцентрировано. Полюса имеют как статор, так и ротор. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы собраны из отдельных пластин, подобно сердечнику трансформатора. Вращающий момент пропорционален величине магнитного поля, которая пропорциональна току в обмотке и количеству витков. Таким образом, момент зависит от параметров обмоток. Если хотя бы одна обмотка шагового двигателя запитана, ротор принимает определенное положение. Он будет находиться в этом положении до тех пор, пока внешний приложенный момент не превысит некоторого значения, называемого моментом удержания. После этого ротор повернется и будет стараться принять одно из следующих положений равновесия.

Двигатели с переменным магнитным сопротивлением. Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала (рис. 1). 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 30 градусов.

При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять положение, когда магнитный поток замкнут, т.е. зубцы ротора будут находиться напротив тех полюсов, на которых находится запитанная обмотка. Если затем выключить 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 нечувствителен к направлению тока в обмотках. Реальный двигатель может иметь большее количество полюсов статора и большее количество зубцов ротора, что соответствует большему количеству шагов на оборот. Иногда поверхность каждого полюса статора выполняют зубчатой, что вместе с соответствующими зубцами ротора обеспечивает очень маленькое значения угла шага, порядка нескольких градусов. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением довольно редко используют в промышленных применениях.

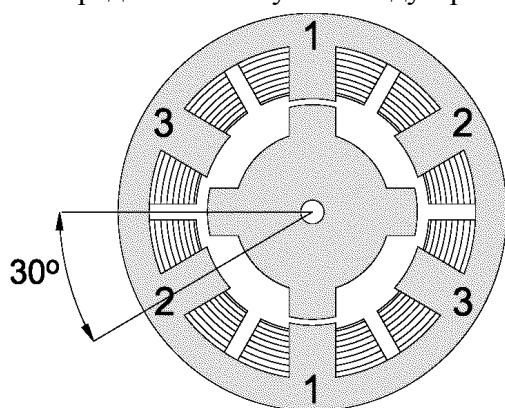


Рис. 1. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

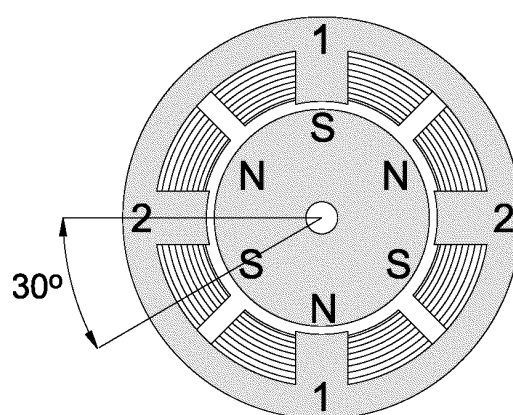


Рис. 2. Двигатель с постоянными магнитами

Двигатели с постоянными магнитами. Двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 2). 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 переменным магнитным сопротивлением.

Показанный на рисунке двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полюсов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель, как и рассмотренный ранее двигатель с переменным магнитным сопротивлением, имеет величину шага 30 градусов. При включении 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 магнитами обычно имеют 48 – 24 шага на оборот (угол шага 7,5 – 15 градусов).

Разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами показан на рис. 3.

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.

Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость.

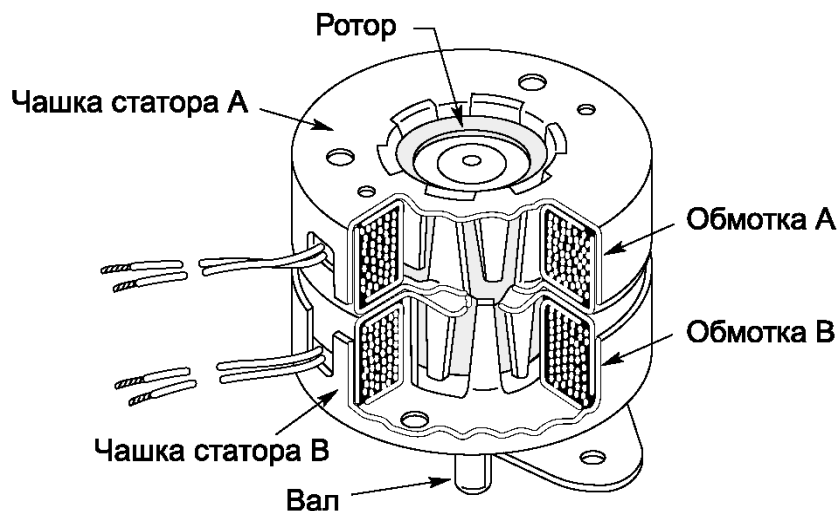


Рис. 3. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами

Гибридные двигатели. Гибридные двигатели 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 градуса). 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. 4).

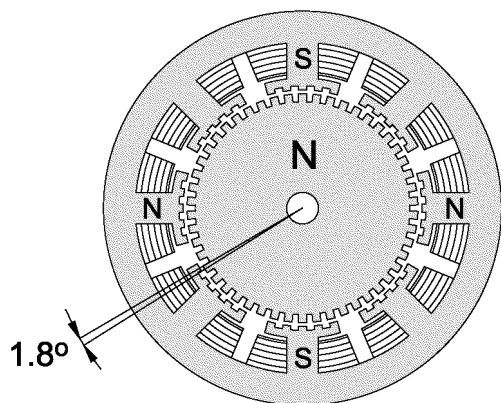


Рис. 4. Гибридный шаговый двигатель

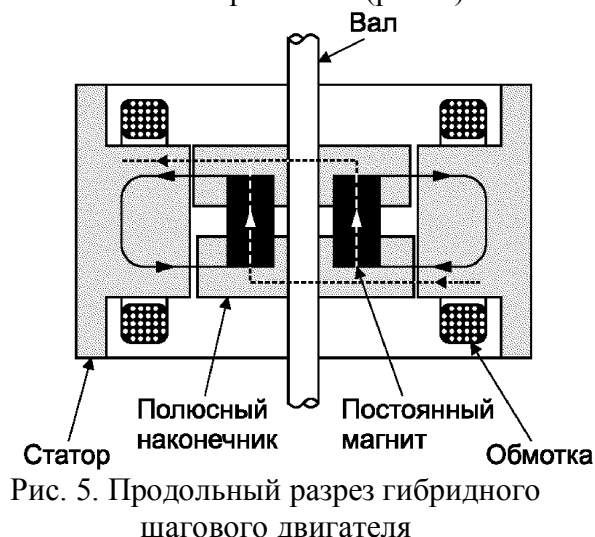


Рис. 5. Продольный разрез гибридного шагового двигателя

Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный 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 и 8 основных полюсов. 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. Зависимость между числом полюсов ротора, числом эквивалентных полюсов статора и числом фаз определяет угол шага двигателя.

Ротор показанного на рисунке двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет 2 фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг, соответственно, 1,8 градуса.

Продольное сечение гибридного шагового двигателя показано на рис. 5. 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.

Как видно, воздушные зазоры у верхнего и нижнего полюсного наконечника ротора разные. Это достигается благодаря повороту полюсных наконечников на половину шага зубьев. Поэтому существует другая магнитная цепь, которая содержит минимальные воздушные зазоры и, как следствие, обладает минимальным магнитным сопротивлением. По этой цепи замыкается другая часть потока (на рисунке показана штриховой черной линией), которая и создает момент. Часть цепи лежит в плоскости, перпендикулярной рисунку и поэтому не показана. В этой же плоскости создают магнитный поток катушки статора. В гибридном двигателе этот поток частично замыкается полюсными наконечниками ротора, и постоянный магнит его «видит» слабо. Поэтому в отличие от двигателей постоянного тока, магнит гибридного двигателя невозможно размагнитить ни при какой величине тока обмоток.

Величина зазора между зубцами ротора и статора очень небольшая – обычно около 100 мкм. Это требует высокой точности при сборке, поэтому шаговый двигатель не стоит разбирать ради удовлетворения любопытства, иначе на этом его срок службы может закончиться. Чтобы магнитный поток не замыкался через вал, который проходит внутри магнита, его изготавливают из немагнитных марок стали. Они обычно обладают повышенной хрупкостью, поэтому с валом, особенно малого диаметра, следует обращаться с осторожностью.

Для получения больших моментов необходимо увеличивать как поле, создаваемое статором, так и поле постоянного магнита. При этом требуется больший диаметр ротора, что ухудшает 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 ухудшается.

Существуют и другие конструкции шаговых двигателей. Например, двигатели с дисковым намагниченным ротором. Такие двигатели имеют малый момент инерции ротора, что в ряде случаев важно.

Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными. По сути, такой двигатель является двигателем с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот, соответственно шаг равен 3,6 или 1,8 градуса. Большинство контроллеров позволяют работать в полушаговом режиме, где этот угол вдвое меньше, а некоторые контроллеры обеспечивают микрошаговый режим.

Биполярные и униполярные шаговые двигатели. В зависимости от конфигурации обмоток двигатели делятся на биполярные и униполярные. Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна переполюсовываться коммутатором, называемым также драйвером ШД. Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двуполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рис. 6, а).

Униполярный двигатель (рис. 6, б) 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 коммутатора, который 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. 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. 6, в). 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.

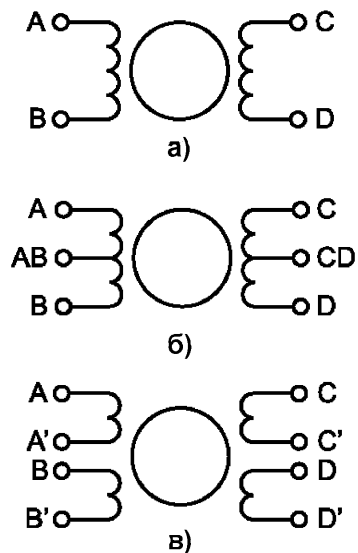


Рис. 6. Схемы обмоток шаговых двигателей:
 а) биполярный; б) униполярный;
 в) четырехобмоточный

Этот факт 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 их сопротивление – соответственно вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток в корень из двух раз при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте около 40%. На практике все же часто применяют униполярные двигатели, так как они требуют значительно более простых схем управления обмотками.

3. Управление фазами шаговых двигателей

Существует несколько способов управления фазами шагового двигателя.

Первый способ обеспечивается попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, а в один момент времени включена только одна фаза (рис 7, а). Этот способ называют “one phase on” full step или wave drive mode (полношаговый режим, включена одна фаза). Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с “естественными” точками равновесия ротора у незапитанного 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.

Второй способ – управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. Его называют “two-phase-on” full step или просто full step mode (полношаговый режим, включены две фазы или просто – полношаговый режим). При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рис. 7, 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 пол-шага.

Третий способ является комбинацией первых двух и называется полушаговым режимом, “one and two-phase-on” half step или просто half step mode, когда 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. 7, 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 коммутаторы реализуют модифицированный полушаговый

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. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности ШД.

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 потерь в обмотках.

режим, в котором двигатель обеспечивает практически полный момент, при этом рассеиваемая мощность не превышает номинальной.

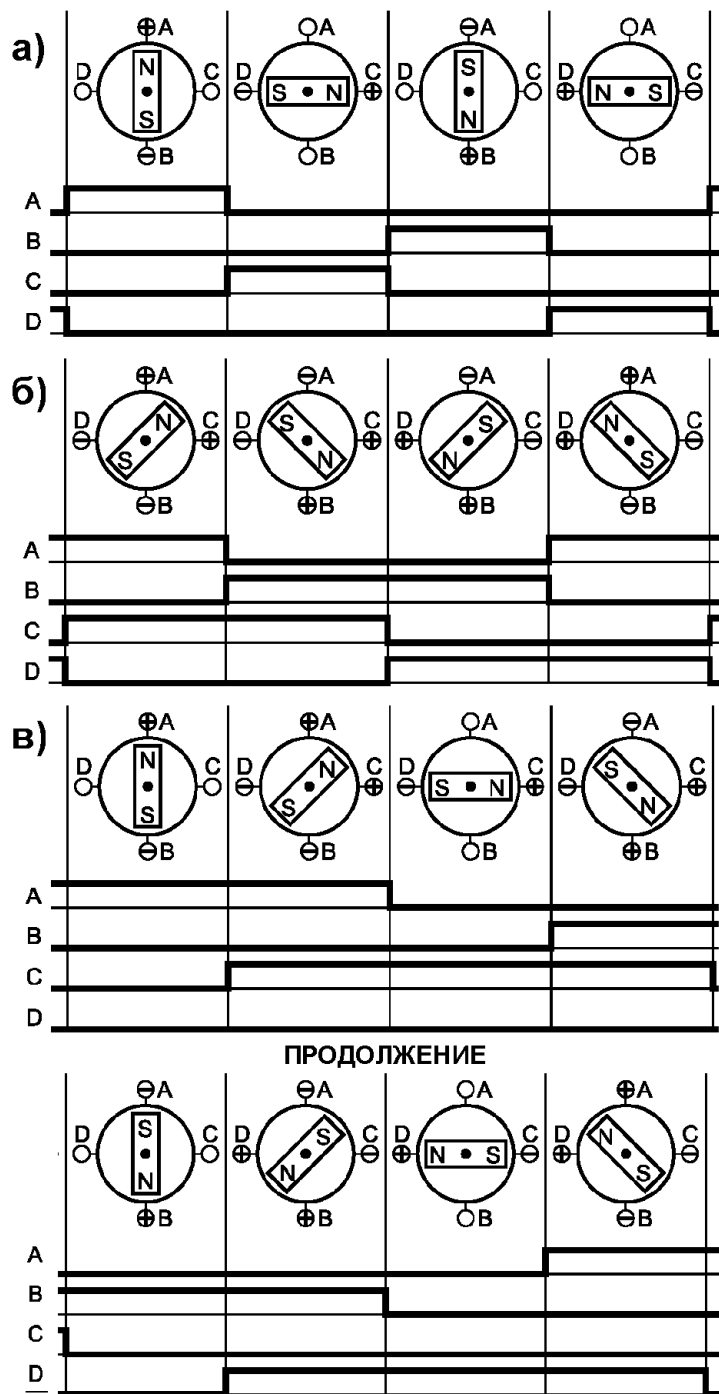


Рис. 7. Способы управления фазами шагового двигателя:
 а) полношаговый однофазный; б) полношаговый двухфазный; в) полушаговый.

Еще один способ управления называется микрошаговым режимом или *micro stepping mode*. При этом способе управления ток в фазах нужно менять небольшими шагами, обеспечивая таким образом 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 разрешающей способности, микрошаговый режим имеет и другие преимущества, которые будут описаны ниже. Вместе с тем, для реализации микрошагового режима требуются значительно более сложные схемы управления, позволяющие задавать ток в обмотках с необходимой дискретностью. Полушаговый режим является частным случаем микрошагового режима, но он не требует формирования ступенчатого тока питания обмоток, поэтому часто реализуется.

В полношаговом режиме с двумя включенными фазами положения точек равновесия ротора смещены на половину шага. 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 пол-шага. 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 большую, 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 коммутаторы 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 или ЭВМ.

Полушаговый режим

Основным принципом работы шагового двигателя является создание вращающегося магнитного поля, которое заставляет ротор поворачиваться. Вращающееся магнитное поле создается статором, обмотки которого соответствующим образом запитываются.

Для двигателя, у которого запитана одна обмотка, зависимость момента от угла поворота ротора относительно точки равновесия является приблизительно синусоидальной. Эта зависимость для двухобмоточного двигателя, который имеет N шагов на оборот (угол шага в радианах $S = 2\pi/N$), показана на рис. 8.

Реально характер зависимости может быть несколько другой, что объясняется неидеальностью геометрии ротора и статора.

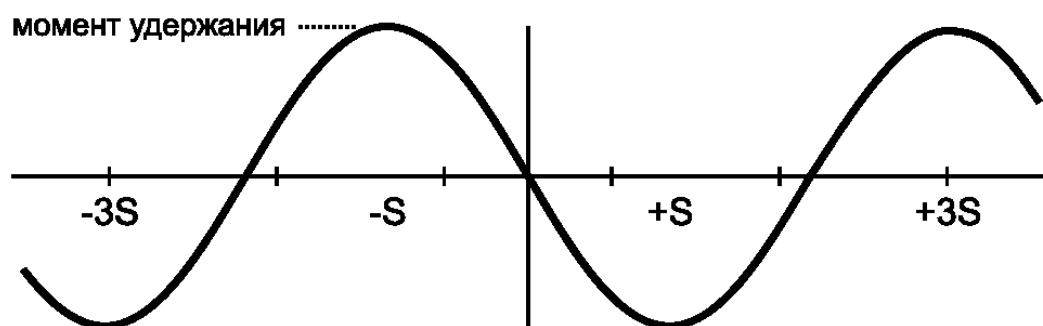


Рис. 8. Зависимость момента от угла поворота ротора для одной запитанной обмотки

Если к ротору приложить внешний момент, который превышает момент удержания, ротор провернется. Если внешний момент не превышает момента удержания, то ротор будет находиться в равновесии в пределах угла шага. Нужно отметить, что у обесточенного двигателя момент удержания не равен нулю вследствие действия постоянных магнитов ротора. Этот момент обычно составляет около 10% максимального момента, обеспечиваемого двигателем.

Иногда используют термины «механический угол поворота ротора» и «электрический угол поворота ротора». Механический угол вычисляется исходя из того, что полный оборот ротора составляет 2π радиан. При вычислении электрического угла принимается, что один оборот соответствует одному периоду угловой зависимости момента. Электрический угол фактически определяет угол поворота магнитного поля статора.

Если запитать одновременно две обмотки двигателя, то момент будет равен сумме моментов, обеспечиваемых обмотками по отдельности (рис. 9).

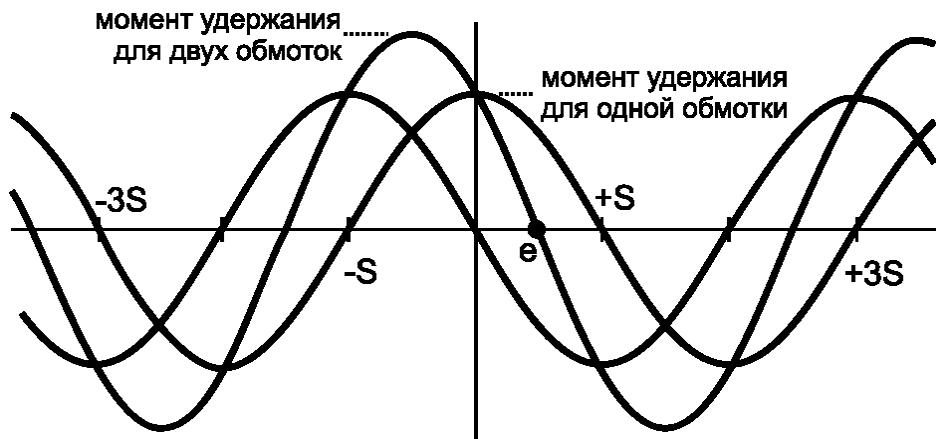


Рис. 9. Зависимость момента от угла поворота ротора для двух запитанных обмоток

При этом, если токи в обмотках одинаковы, то точка максимума момента будет смещена на половину шага. На половину шага сместится и точка равновесия ротора (точка *e* на рисунке). Этот факт и положен в основу реализации полушагового режима. Пиковое значение момента (момент удержания) при этом будет в корень из двух раз больше, чем при одной запитанной обмотке. Именно этот момент обычно и указывается в характеристиках шагового двигателя.

Величина и направление магнитного поля показаны на векторной диаграмме (рис. 10).

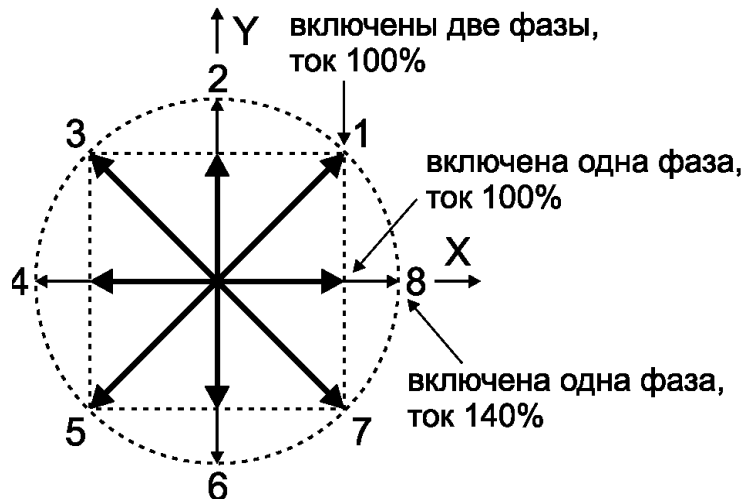


Рис. 10. Величина и направление магнитного поля для разных режимов питания фаз

Оси *X* и *Y* совпадают с направлением магнитного поля, создаваемого обмотками первой и второй фазы двигателя. Когда двигатель работает с одной включенной фазой, ротор может занимать положения 1, 3, 5, 7. Если включены две фазы, то ротор может занимать положения 2, 4, 6, 8. К тому же, в этом режиме больше момент, так как он пропорционален длине вектора на рисунке. Оба эти метода управления обеспечивают полный шаг, но положения равновесия ротора смещены на пол шага. Если комбинировать два этих метода и подать на обмотки соответствующие последовательности импульсов, то можно заставить ротор последовательно занимать положения 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, что соответствует половинному шагу.

По сравнению с полношаговым режимом, полушаговый режим имеет следующие преимущества: более высокая разрешающая способность без применения более дорогих двигателей; меньшие проблемы с явлением резонанса. Резонанс в таком режиме приводит лишь к частичной потере момента, что обычно не мешает нормальной работе привода.

Недостатком полушагового режима является довольно значительное колебание момента от шага к шагу. В тех положениях ротора, когда запитана одна фаза, момент составляет примерно 70% от полного, когда запитаны две фазы. Эти колебания могут явиться причиной повышенных вибраций и шума, хотя они всё равно остаются меньшими, чем в полношаговом режиме.

Для полушагового режима очень важным является переход в состояние с одной выключенной фазой. Чтобы заставить ротор принять соответствующее положение, ток в отключенной фазе

должен быть уменьшен до нуля как можно быстрее. Длительность спада тока зависит от напряжения на обмотке в то время, когда она теряет свою запасенную энергию. Замыкая в это время обмотку может обеспечивается максимально быстрый спад тока.

Микрошаговый режим

Микрошаговый режим обеспечивается путем получения поля статора, вращающегося более плавно, чем в полно- или полушаговом режимах. В результате обеспечиваются меньшие вибрации и практически бесшумная работа вплоть до нулевой частоты. К тому же меньший угол шага способен обеспечить более точное позиционирование. Существует много различных микрошаговых режимов, с величиной шага от $1/3$ полного шага до $1/32$ и даже меньше.

Шаговый двигатель является синхронным электродвигателем. Это значит, что положение равновесия неподвижного ротора совпадает с направлением магнитного поля статора. При повороте поля статора ротор тоже поворачивается, стремясь занять новое положение равновесия.

Чтобы получить нужное направление магнитного поля, необходимо выбрать не только правильное направление токов в катушках, но и правильное соотношение этих токов.

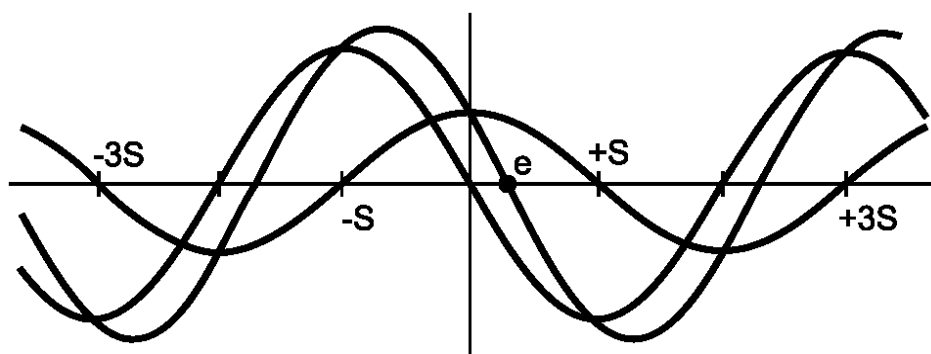


Рис. 11. Зависимость момента от угла поворота ротора в случае разных значений тока фаз

Смещение точки равновесия ротора «e» (рис. 11) говорит о том, что ротор можно зафиксировать в любой произвольной позиции. Для этого нужно лишь правильно установить отношение токов в фазах. Именно этот факт используется при реализации микрошагового режима.

В пределе, шаговый двигатель может работать как синхронный электродвигатель в режиме непрерывного вращения. Для этого токи его фаз должны быть синусоидальными, сдвинутыми друг относительно друга на 90 градусов.

Результатом использования микрошагового режима является намного более плавное вращение ротора на низких частотах. На частотах в $2 - 3$ раза выше собственной резонансной частоты ротора и нагрузки, микрошаговый режим дает незначительные преимущества по сравнению с полу- или полношаговыми режимами. Причиной этого является фильтрующее действие инерции ротора и нагрузки. Система с шаговым двигателем работает подобно фильтру нижних частот. В микрошаговом режиме можно осуществлять только разгон и торможение, а основное время работать в полношаговом режиме. К тому же, для достижения высоких скоростей в микрошаговом режиме требуется очень высокая частота повторения микрошагов, которую не всегда может обеспечить управляющий контроллер. Для предотвращения переходных процессов и потери шагов, переключения режимов работы двигателя (из микрошагового режима в полношаговый и т.п.) необходимо производить в те моменты, когда ротор находится в положении, соответствующем одной включенной фазе.

Во многих приложениях, где требуются малые относительные перемещения и высокая разрешающая способность, микрошаговый режим способен заменить механический редуктор. Часто простота системы является решающим фактором, даже если при этом придется применить двигатель больших габаритов. Несмотря на то, что коммутатор, обеспечивающий микрошаговый режим, намного сложнее обычного, всё равно система может оказаться более простой и дешевой, чем шаговый двигатель плюс редуктор.

Иногда микрошаговый режим используется для увеличения точности величины шага сверх заявленной производителем двигателя. Для повышения точности используется коррекция положения ротора в точках равновесия. Для этого сначала снимают характеристику конкретного

двигателя, а затем, изменяя соотношение токов в фазах, корректируют положение ротора индивидуально для каждого шага. Такой метод требует предварительной калибровки и дополнительных ресурсов управляющего контроллера. Кроме того, требуется датчик начального положения ротора для синхронизации его положения с таблицей корректирующих коэффициентов.

На практике при осуществлении каждого шага ротор не сразу останавливается в новом положении равновесия, а осуществляет затухающие колебания вокруг положения равновесия. Время установления стационарного состояния системы зависит от характеристик нагрузки и от схемы коммутатора. Во многих приложениях такие колебания являются нежелательными. Избавиться от этого явления можно путем использования микрошагового режима. На рис. 12 показаны перемещения ротора при работе в полношаговом и микрошаговом режимах.

Видно, что в полношаговом режиме наблюдаются выбросы и колебания, в то время как в микрошаговом режиме их нет. Однако и в этом режиме график положения ротора отличается от прямой линии. Эта погрешность объясняется погрешностью геометрии деталей двигателя и может быть уменьшена путем проведения калибровки и последующей компенсации путем корректировки токов фаз.

Обычно производители шаговых двигателей указывают такой параметр, как точность шага. Точность шага указывается для положений равновесия ротора при двух включенных фазах, токи которых равны. Это соответствует полношаговому режиму с перекрытием фаз. Для микрошагового режима, когда токи фаз не равны, никаких данных обычно не приводится.

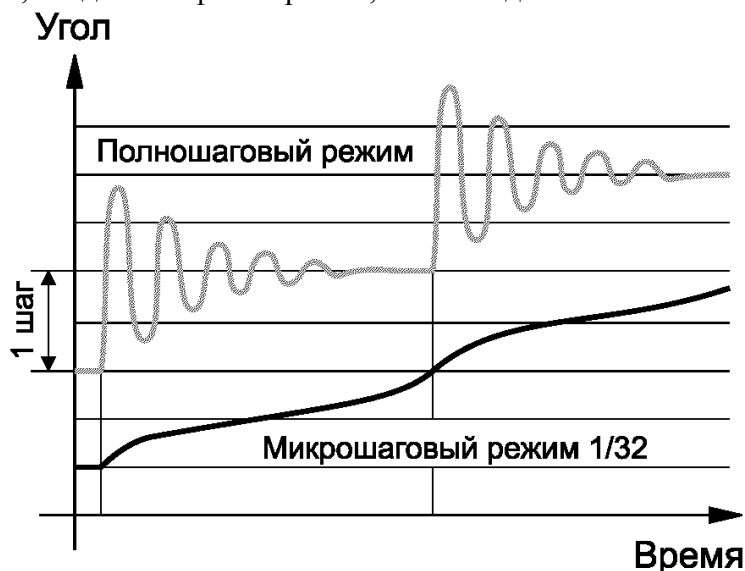


Рис. 12. Перемещения ротора в полношаговом и микрошаговом режимах

Идеальный шаговый двигатель при питании фаз синусоидальным и косинусоидальным током должен вращаться с постоянной скоростью. У реального двигателя в таком режиме будут наблюдаться некоторые колебания скорости. Связано это с нестабильностью воздушного зазора между полюсами ротора и статора, наличием магнитного гистерезиса, что приводит к погрешностям величины и направления магнитного поля и т.д. Поэтому положения равновесия и момент имеют некоторые отклонения. Эти отклонения зависят от погрешности формы зубцов ротора и статора и от примененного материала магнитопроводов.

Конструкция некоторых двигателей оптимизирована для наилучшей точности в полношаговом режиме и максимального момента удержания. Специальная форма зубцов ротора и статора спроектирована так, чтобы в положении равновесия для полношагового режима магнитный поток сильно возрастал. Это приводит к ухудшению точности в микрошаговом режиме. Лучшие результаты в микрошаговом режиме позволяют получить двигатели, у которых момент удержания в обесточенном состоянии меньше.

Отклонения можно разделить на два вида: отклонения величины магнитного поля, которые приводят к отклонениям момента удержания в микрошаговом режиме и отклонения направления магнитного поля, которые приводят к отклонениям положения равновесия. Отклонения момента удержания в микрошаговом режиме обычно составляют 10...30% от максимального момента.

Нужно отметить, что и в полношаговом режиме момент удержания может колебаться на 10...20 % вследствие неидеальной геометрии ротора и статора.

Если измерить положения равновесия ротора при вращении двигателя по и против часовой стрелки, то получатся несколько разные результаты. Этот гистерезис связан в первую очередь с магнитным гистерезисом материала сердечника, хотя свой вклад вносит и трение. Магнитный гистерезис приводит к тому, что магнитный поток зависит не только от тока обмоток, но и от предыдущего его значения. Погрешность, создаваемая гистерезисом может быть равна нескольким микрошкагам. Поэтому в высокоточных приложениях при движении в одном из направлений нужно проходить за желаемую позицию, а затем возвращаться назад, чтобы подход к нужной позиции всегда осуществлялся в одном направлении.

Естественно, что любое желаемое увеличение разрешающей способности наталкивается на какие-то физические ограничения. Как будет показано ниже, если в системе есть трение, то вследствие появления мертвых зон точность позиционирования будет ограничена.

Большинство коммерческих двигателей не обладают прецизионной конструкцией и зависимость между моментом и углом поворота ротора не является в точности синусоидальной. Вследствие этого зависимость между фазой синусоидального тока питания и углом поворота вала будет нелинейной. В результате ротор двигателя будет точно проходить положения каждого шага и полушага, а между этими положениями будут наблюдаться довольно значительные отклонения.

Эти проблемы наиболее ярко выражены для двигателей с большим количеством полюсов. Существуют двигатели, ещё на этапе разработки оптимизированные для работы в микрошаговом режиме. Полюса ротора и статора таких двигателей менее выражены благодаря специально скошенной форме зубцов.

Иногда контроллеры шаговых двигателей позволяют корректировать форму выходного сигнала путем добавления или вычитания из синуса его третьей гармоники. Однако такая подстройка должна производиться индивидуально под конкретный двигатель, характеристики которого должны быть перед этим измерены.

Из-за этих ограничений микрошаговый режим используется в основном для обеспечения плавного вращения (особенно на очень низких скоростях), для устранения шума и явления резонанса. Микрошаговый режим также способен уменьшить время установления стационарного состояния механической системы, так как в отличие от полношагового режима отсутствуют осцилляции ротора. Однако в большинстве случаев для обычных двигателей нельзя гарантировать точного позиционирования в микрошаговом режиме.

Синусоидальный ток фаз может быть обеспечен применением специальных схем коммутации. Некоторые из них содержат ЦАП и требуют от микроконтроллера или ЭВМ только управляющих цифровых кодов. Другие же требуют внешних опорных напряжений синусоидальной формы, которые должен формировать микроконтроллер или ЭВМ с помощью ЦАП. Нужно сказать, что слишком большое количество дискретов синусоидального сигнала не приводит к повышению точности позиционирования, так как начинает доминировать ошибка, связанная с неидеальностью геометрии полюсов двигателя. Тем более, в этом случае отсчеты должны следовать с большой частотой, что может быть проблемой при их программном формировании. При работе на больших скоростях разрешающую способность ЦАП можно уменьшить.

Более того, при очень больших скоростях вообще рекомендуется работать в обычном полношаговом режиме, так как управление гармоническим сигналом теряет преимущества. Происходит это по причине того, что обмотки двигателя представляют индуктивность, соответственно любая конкретная схема коммутатора обеспечивает вполне определенную максимальную скорость нарастания тока. Из-за этого при повышении частоты управляющих импульсов на обмотках форма тока начинает отклоняться от синусоидальной и на очень больших частотах становится треугольной.

4. Зависимость момента от скорости. Влияние нагрузки

Момент, создаваемый шаговым двигателем, зависит от нескольких факторов: скорости; тока в обмотках; схемы коммутатора. На рис. 13, а показана зависимость момента от угла поворота ротора.

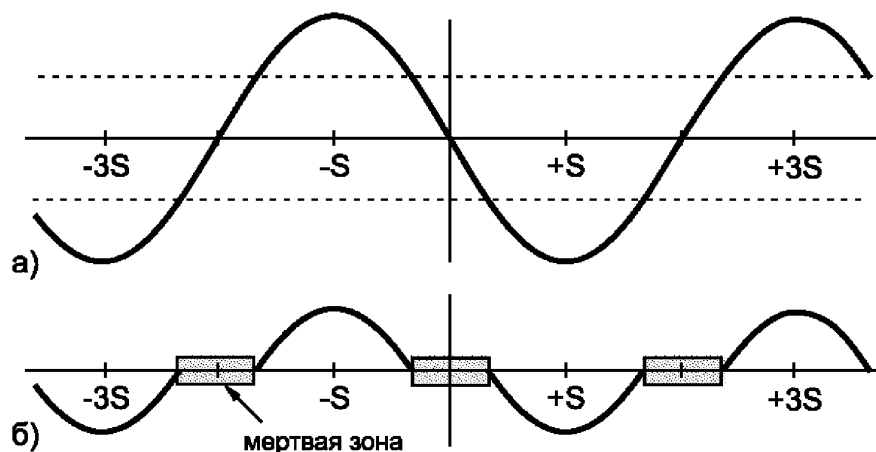


Рис. 13. Возникновение мертвых зон в результате действия трения

У идеального шагового двигателя эта зависимость синусоидальная. Точки S являются положениями равновесия ротора для ненагруженного двигателя и соответствуют нескольким последовательным шагам. Если к валу двигателя приложить внешний момент, меньший момента удержания, то угловое положение ротора изменится на некоторый угол Φ , зависящий от внешнего приложенного момента и от момента удержания двигателя.

Угловое смещение Φ является ошибкой позиционирования нагруженного двигателя. Если к валу двигателя приложить момент, превышающий момент удержания, то под действием этого момента вал провернется. В таком режиме положение ротора является неконтролируемым.

На практике всегда имеется приложенный к двигателю внешний момент, хотя бы потому, что двигателю приходится преодолевать трение. Силы трения могут быть разделены на две категории: статическое трение или трение покоя, для преодоления которого требуется постоянный момент и динамическое трение (вязкое трение), которое зависит от скорости. Рассмотрим статическое трение. Предположим, что для его преодоления требуется момент в половину от пикового. На рис. 13, а штриховыми линиями показан момент трения. Таким образом, для вращения ротора остается только момент, лежащий на графике за пределами штриховых линий. Отсюда следуют два вывода: трение снижает момент на валу двигателя и появляются мертвые зоны вокруг каждого положения равновесия ротора (рис. 13, б).

Мертвые зоны ограничивают точность позиционирования. Например, наличие статического трения в половину от пикового момента двигателя с шагом 90° вызовет наличие мертвых зон в 60° . Это означает, что шаг двигателя может колебаться от 30° до 150° в зависимости от того, в какой точке мертвой зоны остановится ротор после очередного шага.

Наличие мертвых зон является очень важным для микрошагового режима. Если, например, имеются мертвые зоны величиной d , то микрошаг менее d вообще не сдвинет ротор с места. Поэтому для систем с использованием микрошагов очень важно минимизировать трение покоя.

Когда двигатель работает под нагрузкой, всегда существует некоторый сдвиг между угловым положением ротора и ориентацией магнитного поля статора. Особенно неблагоприятной является ситуация, когда двигатель начинает торможение и момент нагрузки реверсируется. Нужно отметить, что запаздывание или опережение относится только к положению, но не к скорости. В любом случае, если синхронность работы двигателя не потеряна, это запаздывание или опережение не может превышать величины двух полных шагов.

Каждый раз, когда шаговый двигатель осуществляет шаг, ротор поворачивается на S радиан. При этом минимальный момент имеет место, когда ротор находится ровно между соседними положениями равновесия.

Этот момент называют рабочим моментом, он показывает, какой наибольший момент может преодолевать двигатель при вращении с малой скоростью. Если двигатель делает шаг с двумя запитанными обмотками, то рабочий момент равен моменту удержания для одной запитанной обмотки.

Параметры привода на основе шагового двигателя сильно зависят от характеристик нагрузки. Кроме трения, реальная нагрузка обладает инерцией. Инерция препятствует изменению скорости.

Инерционная нагрузка требует от двигателя больших моментов на разгоне и торможении, ограничивая таким образом максимальное ускорение. С другой стороны, увеличение инерционности нагрузки увеличивает стабильность скорости.

Такой параметр шагового двигателя, как зависимость момента от скорости является важнейшим при выборе типа двигателя, выборе метода управления фазами и выборе схемы коммутатора. При конструировании высокоскоростных коммутаторов шаговых двигателей нужно учитывать, что обмотки двигателя представляют собой индуктивность. Эта индуктивность определяет время нарастания и спада тока. Поэтому если к обмотке приложено напряжение прямоугольной формы, форма тока не будет прямоугольной. При низких скоростях (рис. 14, а) время нарастания и спада тока не способно сильно повлиять на момент, однако на высоких скоростях момент падает. Связано это с тем, что ток в обмотках двигателя не успевает достигнуть номинального значения (рис. 14, б). Для того, чтобы момент падал как можно меньше, необходимо обеспечить высокую скорость нарастания тока в обмотках, что достигается применением специальных схем для их питания.

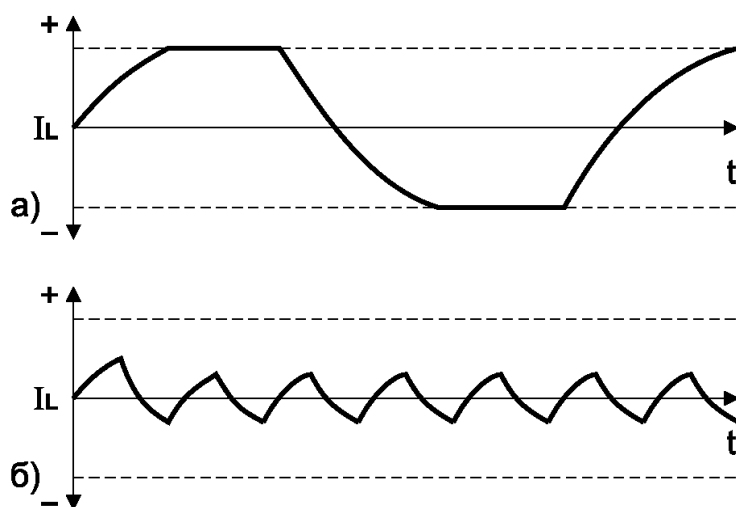


Рис. 14. Форма тока в обмотках двигателя на разных скоростях работы

Поведение момента при увеличении частоты коммутации фаз примерно таково: начиная с некоторой частоты момент монотонно падает. Обычно для шагового двигателя приводятся две кривые зависимости момента от скорости (рис. 15).

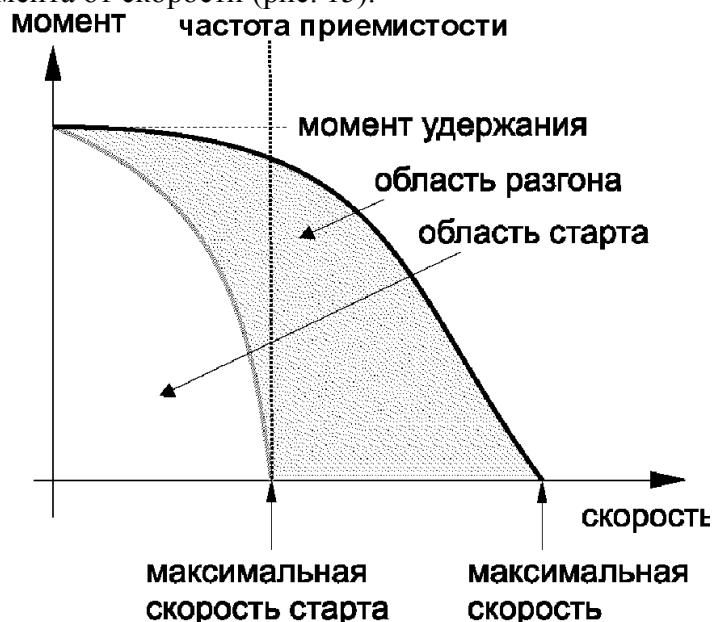


Рис. 15. Зависимость момента шагового двигателя от скорости

Внутренняя кривая (кривая старта, или pull-in curve) показывает, при каком максимальном моменте трения для данной скорости шаговый двигатель способен тронуться. Эта кривая пересекает ось скоростей в точке, называемой максимальной частотой старта или *частотой*

приемистости. Она определяет максимальную скорость, на которой ненагруженный двигатель может тронуться. На практике эта величина лежит в пределах 100 – 500 полных шагов в секунду. Инерционность нагрузки сильно влияет на вид внутренней кривой. Большая инерционность соответствует меньшей области под кривой. Эта область называется областью старта. Внешняя кривая (кривая разгона, или pull-out curve) показывает, при каком максимальном моменте трения для данной скорости шаговый двигатель способен поддерживать вращение без пропуска шагов. Эта кривая пересекает ось скоростей в точке, называемой максимальной частотой разгона. Она показывает максимальную скорость для данного двигателя без нагрузки. При измерении максимальной скорости нужно иметь в виду, что из-за явления резонанса момент равен нулю еще и на резонансной частоте. Область, которая лежит между кривыми, называется областью разгона.

Нужно отметить, что схема коммутатора в значительной степени влияет на ход кривой момент-скорость.

Разгон двигателя

Для того, чтобы работать на большой скорости из области разгона (рис. 15), необходимо стартовать на низкой скорости из области старта, а затем выполнить разгон. При остановке нужно действовать в обратном порядке: сначала выполнить торможение, и только войдя в область старта можно прекратить подачу управляющих импульсов. В противном случае произойдет потеря синхронности и положение ротора будет утеряно. Использование разгона и торможения позволяет достичь больших скоростей – используются скорости до 10000 полных шагов в секунду. Необходимо отметить, что непрерывная работа шагового двигателя на высокой скорости не всегда допустима ввиду нагрева ротора. Однако высокая скорость кратковременно может быть использована при осуществлении позиционирования.

При разгоне двигатель проходит ряд скоростей, при этом на одной из скоростей можно столкнуться с неприятным явлением резонанса. Для нормального разгона желательно иметь нагрузку, момент инерции которой как минимум равен моменту инерции ротора. На ненагруженном двигателе явление резонанса проявляется наиболее сильно. Подробно методы борьбы с этим явлением будут описаны ниже.

При осуществлении разгона или торможения важно правильно выбрать закон изменения скорости и максимальное ускорение. Ускорение должно быть тем меньше, чем выше инерционность нагрузки. Критерий правильного выбора режима разгона – это осуществление разгона до нужной скорости для конкретной нагрузки за минимальное время. На практике чаще всего применяют разгон и торможение с постоянным ускорением.

Реализация закона, по которому будет производиться ускорение или торможение двигателя, обычно производится программно управляющим контроллером, так как именно он является источником тактовой частоты для коммутатора обмоток шагового двигателя.

Для генерации тактовой частоты удобно использовать аппаратный таймер, который имеется в составе практически любого микроконтроллера. Когда двигатель вращается с постоянной скоростью, достаточно загрузить в таймер постоянное значение периода повторения шагов (длительность шага). Если же двигатель разгоняется или тормозится, этот период меняется с каждым новым шагом. При разгоне или торможении с постоянным ускорением частота повторения шагов должна изменяться линейно, соответственно значение периода, которое необходимо загружать в таймер, должно меняться по гиперболическому закону.

4. Явление резонанса

Шаговым двигателям свойственен нежелательный эффект, называемый резонансом. Эффект проявляется в виде внезапного падения момента на некоторых скоростях. Это может привести к пропуску шагов и потере синхронности. Эффект проявляется в том случае, если частота шагов совпадает с собственной резонансной частотой ротора двигателя.

Когда двигатель совершает шаг, ротор не сразу устанавливается в новую позицию, а совершает затухающие колебания. Систему ротор – магнитное поле – статор можно рассматривать как пружинный маятник, частота колебаний которого зависит от момента инерции ротора (плюс нагрузки) и величины магнитного поля. Ввиду сложной конфигурации магнитного поля,

резонансная частота ротора зависит от амплитуды колебаний. При уменьшении амплитуды частота растет, приближаясь к так называемой малоамплитудной частоте, которая достаточно просто вычисляется количественно. Эта частота зависит от угла шага и от отношения момента удержания к моменту инерции ротора. Большой момент удержания и меньший момент инерции приводят к увеличению резонансной частоты.

Необходимо заметить, что резонансную частоту определяет момент инерции собственно ротора двигателя плюс момент инерции нагрузки, подключенной к валу двигателя. Поэтому резонансная частота ротора ненагруженного двигателя, которая иногда приводится среди параметров, имеет невысокую практическую ценность, так как любая нагрузка, подсоединенная к двигателю, изменит эту частоту.

На практике эффект резонанса приводит к трудностям при работе на частоте, близкой к резонансной. Момент на частоте резонанса равен нулю и без принятия специальных мер шаговый двигатель не может при разгоне пройти резонансную частоту. В любом случае, явление резонанса способно существенно ухудшить точностные характеристики привода.

В системах с низким демпфированием существует опасность потери шагов или повышения шума, когда двигатель работает вблизи резонансной частоты. В некоторых случаях проблемы могут возникать и на гармониках частоты основного резонанса.

Когда используется не микрошаговый режим, основной причиной появления колебаний является прерывистое вращение ротора. При осуществлении шага ротору толчком сообщается некоторая энергия. Этот толчок возбуждает колебания. Энергия, которая сообщается ротору в полушаговом режиме, составляет около 30% от энергии полного шага. Поэтому в полушаговом режиме амплитуда колебаний существенно меньше. В микрошаговом режиме с шагом 1/32 основного при каждом микрошаге сообщается всего около 0.1% от энергии полного шага. Поэтому в микрошаговом режиме явление резонанса практически незаметно.

Для борьбы с резонансом можно использовать различные методы. Например, применение эластичных материалов при выполнении механических муфт связи с нагрузкой. Эластичный материал способствует поглощению энергии в резонансной системе, что приводит к затуханию паразитных колебаний. Другим способом является применение вязкого трения. Выпускаются специальные демпферы, где внутри полого цилиндра, заполненного вязкой кремнийорганической смазкой, может вращаться металлический диск. При вращении этой системы с ускорением диск испытывает вязкое трение, что эффективно демпфирует систему.

Существуют электрические методы борьбы с резонансом. Колеблющийся ротор приводит к возникновению в обмотках статора ЭДС. Если закоротить обмотки, которые на данном шаге не используются, это приведет к подавлению резонанса.

И, наконец, существуют методы борьбы с резонансом на уровне алгоритма работы драйвера. Если резонансная частота точно известна, то ее можно проходить, меняя режим работы. Если это возможно, при старте и остановке нужно использовать частоты выше резонансной. Увеличение момента инерции системы ротор-нагрузка уменьшает резонансную частоту. Однако, самой эффективной мерой для борьбы с резонансом является применение микрошагового режима.

5. Питание обмоток шагового двигателя

Для питания обычного двигателя постоянного тока требуется лишь источник постоянного напряжения, а необходимые коммутации обмоток выполняются коллектором. С шаговым двигателем всё сложнее. Все коммутации должен выполнять внешний контроллер. В настоящее время примерно в 95% случаев для управления шаговыми двигателями используются микроконтроллеры. В простейшем случае для управления шаговым двигателем в полношаговом режиме требуются всего два сигнала, сдвинутые по фазе на 90 градусов. Направление вращения зависит от того, какая фаза опережает. Скорость определяется частотой следования импульсов.

В полушаговом режиме всё немного сложнее и требуется уже минимум 4 сигнала. Все сигналы управления шаговым двигателем можно сформировать программно, однако это вызовет большую загрузку управляющего микропроцессора контроллера. Поэтому чаще применяют специальные микросхемы драйверов шагового двигателя, которые уменьшают количество требуемых от процессора динамических сигналов. Типично эти микросхемы требуют сигнал

тактовой частоты, которая является частотой повторения шагов и статический сигнал, который задает направление вращения. Иногда еще присутствует сигнал включения полушагового режима. Для микросхем драйверов, которые работают в микрошаговом режиме, требуется большее количество сигналов. Распространенным является случай, когда необходимые последовательности сигналов управления фазами формируются с помощью одной микросхемы, а необходимые токи фаз обеспечивает другая микросхема. Хотя в последнее время появляется все больше драйверов, реализующих все функции в одной микросхеме.

Мощность, которая требуется от коммутатора, зависит от размеров двигателя и составляет доли ватта для маленьких двигателей и до 10-20 ватт для больших двигателей. Максимальный уровень рассеиваемой мощности ограничен нагревом двигателя. Рабочая температура ШД обычно указывается производителем, но общепринято, что нормальной является температура корпуса 90 градусов. Поэтому при конструировании устройств с шаговыми двигателями, непрерывно работающими на максимальном токе, необходимо принимать меры, исключающие касание корпуса двигателя обслуживающим персоналом. В отдельных случаях возможно применение охлаждающего радиатора. Иногда это позволяет применить двигатель меньших размеров и добиться лучшего отношения мощность/стоимость.

Для данного размера шагового двигателя место, занимаемое обмотками, ограничено. Поэтому очень важно сконструировать коммутатор так, чтобы для заданных параметров обмоток обеспечить наилучшую эффективность.

Схема коммутатора должна выполнять три главных задачи: иметь возможность включать и выключать ток в обмотках, а также менять его направление; поддерживать заданное значение тока; обеспечивать как можно более быстрое нарастание и спад тока для хороших скоростных характеристик

6. Способы изменения направления тока в обмотках

При работе шагового двигателя требуется изменение направления магнитного поля независимо для каждой фазы. Изменение направления магнитного поля может быть выполнено разными способами. В униполярных двигателях обмотки имеют отвод от середины или имеются две отдельные обмотки для каждой фазы. Направление магнитного поля меняется путем переключения половинок обмоток или целых обмоток. В этом случае требуются только два простых ключа А и В для каждой фазы (рис. 16).

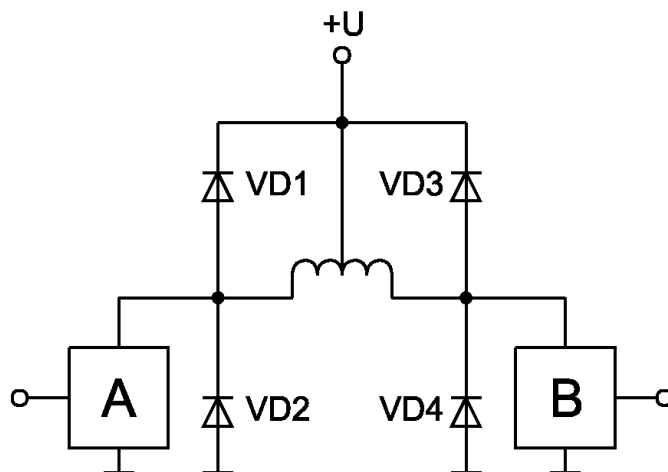


Рис. 16. Питание обмотки униполярного двигателя

В биполярных двигателях направление тока меняется путем переплюсовки выводов обмоток. Для такой переплюсовки требуется полный Н-мост (рис. 17). Управление ключами в том и другом случае должно осуществляться логической схемой, реализующей нужный алгоритм работы. Предполагается, что источник питания схем имеет номинальное для обмоток двигателя напряжение. Это простейший способ управления током обмоток биполярного двигателя.

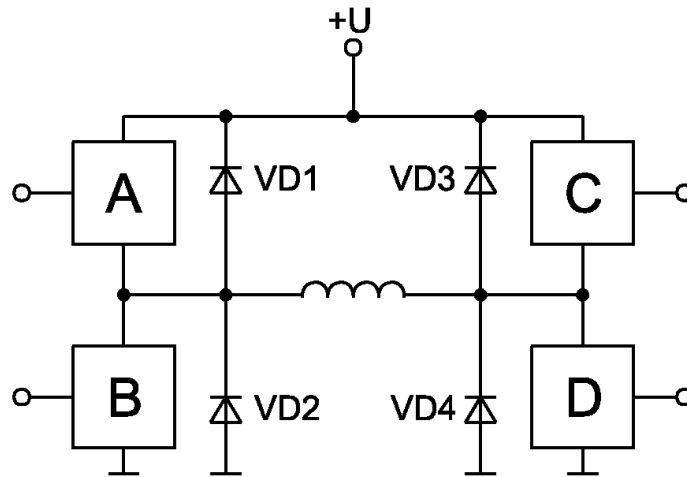


Рис. 17. Питание обмотки биполярного двигателя

Нужно отметить, что при раздельном управлении транзисторами моста возможны ситуации, когда источник питания закорочен ключами. Поэтому логическая схема управления должна быть построена таким образом, чтобы исключить эту ситуацию даже в случае сбоев управляющего контроллера.

Обмотки двигателя представляют собой индуктивность. При подключении обмотки к источнику питания ток будет с некоторой скоростью нарастать, а при отключении обмотки произойдет выброс напряжения, обусловленного ЭДС самоиндукции. Этот выброс способен повредить ключи, в качестве которых используются биполярные или полевые транзисторы. Для ограничения этого выброса устанавливают специальные защитные цепочки. На схемах рис. 16 и 17 эти цепочки образованы диодами, значительно реже применяют конденсаторы или их комбинацию с диодами. Применение конденсаторов может привести к появлению электрического резонанса, что иногда приводит к увеличению момента на некоторой скорости.

На рис. 16 потребовалось 4 диода по той причине, что половинки обмоток униполярного двигателя расположены на общем сердечнике и магнитно связаны между собой. Они работают как автотрансформатор и выбросы возникают на выводах обеих обмоток. Если в качестве ключей применены МОП-транзисторы, то достаточно только двух внешних диодов, так как у них внутри уже имеются диоды (включенные параллельно каналу сток – исток). В интегральных микросхемах, содержащих мощные выходные каскады с открытым коллектором или открытым стоком, также часто имеются такие диоды.

7. Контрольные вопросы

- 1) Что такое шаговый двигатель?
- 2) Область применения шаговых двигателей?
- 3) Перечислить достоинства и недостатки ШД.
- 4) Какие виды шаговых двигателей?
- 5) Как устроен ШД с переменным магнитным сопротивлением?
- 6) Как устроен ШД с постоянными магнитами?
- 7) Какие шаговые двигатели называются гибридными?
- 8) В чем различие между биполярными и униполярными ШД?
- 9) Какие способы управления фазами ШД?