

Раз шажок, два шажок...

Шаговые двигатели уже давно и успешно применяются в самых разнообразных устройствах. Их можно встретить в дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а также в разнообразном промышленном и специальном оборудовании. В настоящее время выпускается множество различных типов шаговых двигателей на все случаи жизни. Однако правильно выбрать тип двигателя – это еще полдела. Не менее важно правильно выбрать схему драйвера и алгоритм его работы, который зачастую определяется программой микроконтроллера. Цель этой статьи – систематизировать сведения об устройстве шаговых двигателей, способах управления ими, схемах драйверов и алгоритмах. В качестве примера приведена практическая реализация простого и дешевого драйвера шагового двигателя на основе микроконтроллера семейства AVR.

Что это, и зачем это нужно?

Шаговый двигатель – это электромеханическое устройство, которое преобразует электрические импульсы в дискретные механические перемещения. Наверное, каждый видел, как выглядит шаговый двигатель внешне: он практически ничем не отличается от двигателей других типов. Чаще всего это круглый корпус, вал, несколько выводов (рис. 1). Однако шаговые двигатели обладают некоторыми уникальными свойствами, что делает их порой исключительно удобными или даже незаменимыми для применения.

Связано это с тем, что шаговые двигатели характеризуются следующими особенностями:

- 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, причем 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;
- скорость пропорциональна частоте входных импульсов, таким образом может быть перекрыт довольно большой диапазон скоростей.

Однако шаговые двигатели обладают также некоторыми недостатками:

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

Что выбрать?

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, например, промышленных применениях. По сравнению с обычными двигателями постоянного тока, шаговые двигатели требуют значительно более сложных схем управления, кото-

рые способны обеспечить коммутацию обмоток при работе двигателя. Кроме того, сам шаговый двигатель – дорогостоящее устройство, поэтому там, где точное позиционирование не требуется, обычные коллекторные двигатели имеют заметное преимущество.

Одним из главных преимуществ шаговых двигателей является возможность осуществить 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 базирования с помощью концевого выключателя или другого датчика. Системы с обратной связью не имеют подобного недостатка.

При проектировании конкретных систем приходится делать выбор между сервомотором и шаговым двигателем. Когда требуется прецизионное позиционирование и точное управление скоростью, а требуемый момент и скорость не выходят за допустимые пределы, то шаговый двигатель является наиболее экономичным решением. Шаговые двигатели, по сравнению с коллекторными, имеют меньший момент. Как и в обычных двигателях, для повышения момента может быть использован понижающий редуктор, однако этот метод 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 хотя и существуют, однако являются экзотикой. 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 способен обеспечить тот же диапазон скоростей, что и шаговый двигатель. К тому же, он обеспечивает и значительно больший крутящий момент. Приводы на основе



Рис. 1. Внешний вид шаговых двигателей

коллекторных двигателей очень часто применяются в технике военного назначения, а это косвенно говорит об их хороших параметрах и высокой надежности. Да и в современной бытовой технике, автомобилях, промышленном оборудовании коллекторные двигатели довольно сильно распространены. Тем не менее, для шаговых двигателей имеется своя, хотя и довольно узкая, сфера применения, где они незаменимы.

Типы шаговых двигателей

Существуют три основных типа шаговых двигателей:

- двигатели с переменным магнитным сопротивлением;
- двигатели с постоянными магнитами;
- гибридные двигатели.

Определить тип двигателя можно даже на ощупь: при вращении вала обесточенного двигателя с постоянными магнитами (или гибридного) чувствуется переменное сопротивление вращению, двигатель вращается как бы щелчками. В то же время вал обесточенного двигателя с переменным магнитным сопротивлением вращается свободно. Гибридные двигатели являются 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 четыре раздельных 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, в которой сконцентрировано магнитное поле. 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, и, соответственно, току в обмотке и количеству витков. Таким образом, вращающий 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. 2). Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты на рисунке ротор имеет четыре зубца, а статор имеет шесть полюсов. Двигатель имеет три независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух

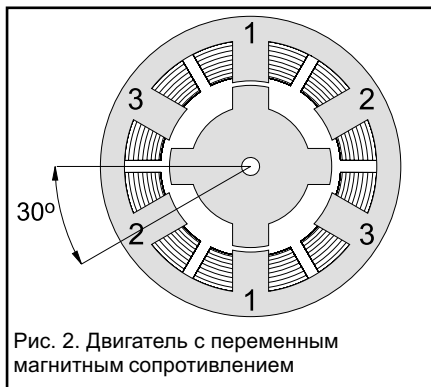


Рис. 2. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг, равный 30°. 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 не чувствителен 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 значение угла шага – порядка нескольких градусов. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением довольно редко используют в промышленных применениях.

Двигатели с постоянными магнитами

Эти двигатели состоят из статора, который имеет об-

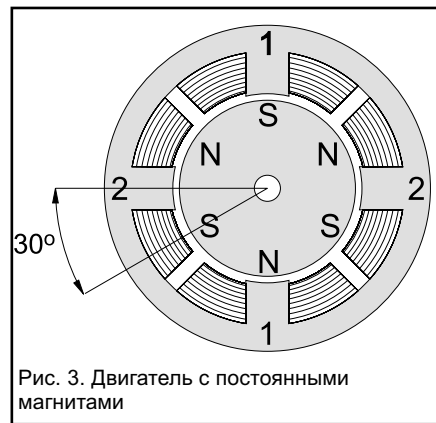


Рис. 3. Двигатель с постоянными магнитами

мотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 3). 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 рис. 3 двигатель имеет три пары полюсов ротора, две пары полюсов статора, две 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°. 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 от 24 до 48 шагов на оборот (угол шага 7,5...15°).

Разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами показан на рис. 4. 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

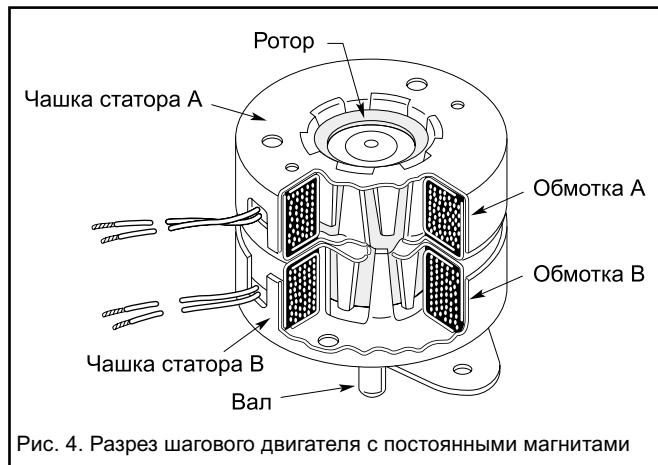


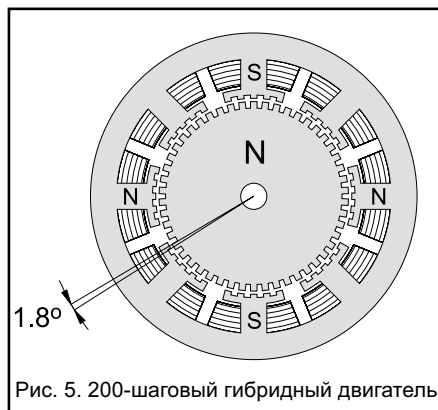
Рис. 4. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами

цилиндрический многополюсный постоянный магнит.

Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с переменным магнитным сопротивлением.

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°). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двух предыдущих типов двигателей. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении (рис. 5). Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, зубцы верхней половины ротора являются северными полю-



сами, а зубцы нижней половины – южными. Кроме того, верхняя и нижняя половины ротора повернуты друг относительно друга на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половин. Зубчатые полюсные наконечники ротора, как и статор, набраны из отдельных пластин для уменьшения потерь на вихревые токи. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая тем самым большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются четыре основных полюса для 3,6-градусных двигателей и восемь основных полюсов для 1,8- и 0,9-градусных 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. Зависи-

мость между числом полюсов ротора, числом эквивалентных полюсов статора и числом фаз определяет угол шага S двигателя:

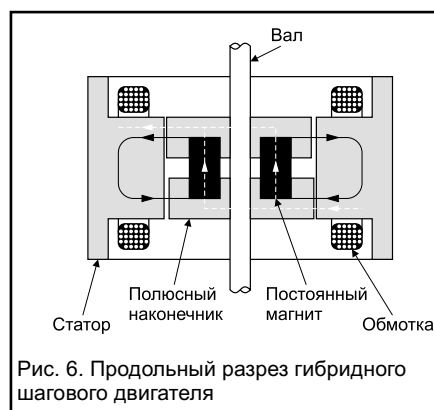
$$S = 360 / (N_{ph} \cdot Ph) = 360 / N,$$

где N_{ph} – число эквивалентных полюсов на фазу, равное числу полюсов ротора; Ph – число фаз; N – полное количество полюсов для всех фаз вместе.

Ротор двигателя имеет 100 полюсов, т. е. 50 пар (см. рис. 5), двигатель имеет две фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг, соответственно, – 1,8°.

Продольное сечение гибридного шагового двигателя показано на рис. 6. Стрелками показано направление магнитного потока постоянного магнита ротора. Часть потока проходит через полюсные наконечники ротора, воздушные зазоры и полюсный наконечник статора. Эта часть не участвует в создании момента. Как видно из рис. 6, воздушные зазоры у верхнего и нижнего полюсного наконечника ротора разные. Это достигается благодаря повороту полюсных наконечников на половину шага зубцов. 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 рис. 6 показана штриховой линией), которая и создает момент. Часть цепи лежит в плоскости, перпендикулярной рисунку, 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 – типовая величина 0,1 мм. 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 осторожно.

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, гибридный двигатель представляет собой двигатель с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов. По способу управления такие двигатели одинаковы, и дальше будут рассматриваться только они. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот с шагом, соответственно равным 3,6 или 1,8°. 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 двигателя делятся на биполярные и униполярные. Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна переполюсовываться драйвером. Для такого типа двигателя требуется мостовой или полумостовой драйвер с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рис. 7а). 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 четыре 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 пять или шесть выводов (рис. 7б). Иногда униполярные двига-

тели имеют четыре отдельные обмотки, по этой причине их ошибочно называют 4-фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего их восемь (рис. 7в). 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 демонст-

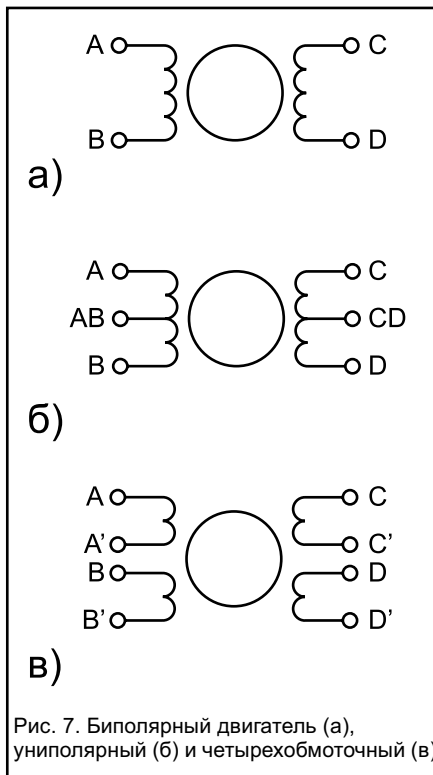


Рис. 7. Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в)

рирует 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 на выходе ОУ DA1.1 $\sqrt{2}$ раз при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте примерно на 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. Это, например, микросхемы L293E, L298N и L6202 фирмы SGS-Thomson, PBL3770, PBL3774 фирмы Ericsson, NJM3717, NJM3770, NJM3774 фирмы JRC, A3957 фирмы Allegro, LMD18T245 фирмы National Semiconductor.

Леонид Ридико,
wubblick@yahoo.com

Продолжение следует