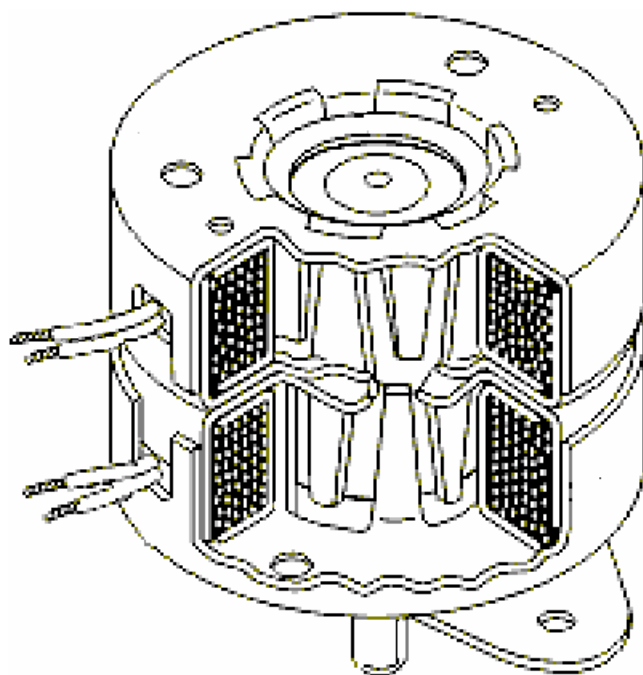




А. В. Емельянов, А. Н. Шилин

ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ



ВОЛГОГРАД 2005

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А. В. Емельянов, А. Н. Шилин

ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Учебное пособие

РПК
“Политехник”
ВОЛГОГРАД
2005

УДК 681. 313

Рецензенты:

зав. кафедрой прикладной физики ВолГУ, д-р техн. наук
В. П. Заярный;

зав. кафедрой “ Энергообеспечение предприятий ” Волжского филиала
МЭИ (ТУ), канд. техн. наук *П. Д. Васильев*

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Емельянов А. В.

Шаговые двигатели: учеб. пособие/ А. В. Емельянов, А. Н. Шилин/
ВолГТУ. – Волгоград, 2005. – 48 с.
ISBN № 5-230-04591-4

Пособие содержит описание основных принципов действия различных типов шаговых двигателей, их устройства и схем коммутации.

Предназначено для студентов изучающих дисциплины: “Электротехника и электроника” и “Электрические машины”.

Ил. 25. Библиогр.: 3 назв.

ISBN № 5-230-04591-4

© Волгоградский государственный
технический университет, 2005

Введение

В современных системах управления широко используются устройства, с цифровой обработкой сигналов. Цифровые системы управления привели к созданию нового типа исполнительных механизмов – шаговых двигателей (ШД). Они широко используются в дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а также в разнообразном промышленном и специальном оборудовании. В настоящее время промышленностью выпускается множество различных типов шаговых двигателей.

Шаговые двигатели – это электромеханические устройства, преобразующие сигнал управления в угловое (или линейное) перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении без устройств обратной связи.

Шаговые двигатели относятся к классу бесколлекторных двигателей постоянного тока, которые имеют высокую надежность и большой срок службы, что позволяет использовать их в системах работающих в тяжелых производственных условиях. Однако в сравнение с обычными двигателями постоянного тока, шаговые двигатели требуют значительно более сложных схем управления, которые должны выполнять коммутации обмоток двигателя при работе. Кроме того, сам шаговый двигатель – дорогостоящее устройство, поэтому там, где не требуется точное позиционирование, обычные коллекторные двигатели имеют заметное преимущество. В тоже время необходимо 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 больше самого двигателя. Однако системы без обратной связи 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, например, концевого выключателя или другого датчика. Системы с обратной связью не имеют подобного недостатка.

При проектировании конкретных систем приходится делать выбор между серводвигателем 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 шагового двигателя может быть использован понижающий редуктор. Решить эту задачу для шаговых двигателей с помощью редуктора не всегда удастся. 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. Поэтому шаговые двигатели с редукторами хотя и выпускаются, но в сравнительно небольшом количестве.

1. Устройство шаговых двигателей

1.1. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением

Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала. Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты изложения на рисунке 1 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° .

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.

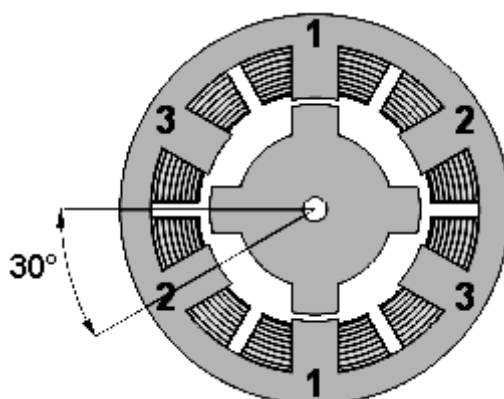


Рис. 1. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

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 значения угла шага, порядка нескольких градусов. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением довольно редко используют в промышленных применениях.

1.2. 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 большой магнитный поток и, как следствие, большой момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением.

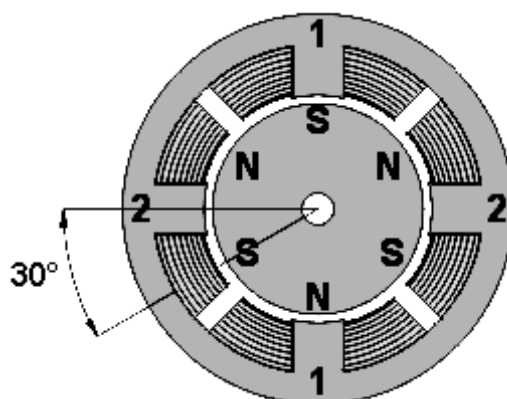


Рис. 2. Двигатель с постоянными магнитами

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° . 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 24 – 48 шагов на оборот (угол шага 15 – 7,5 град). Разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами показан на рис. 3.

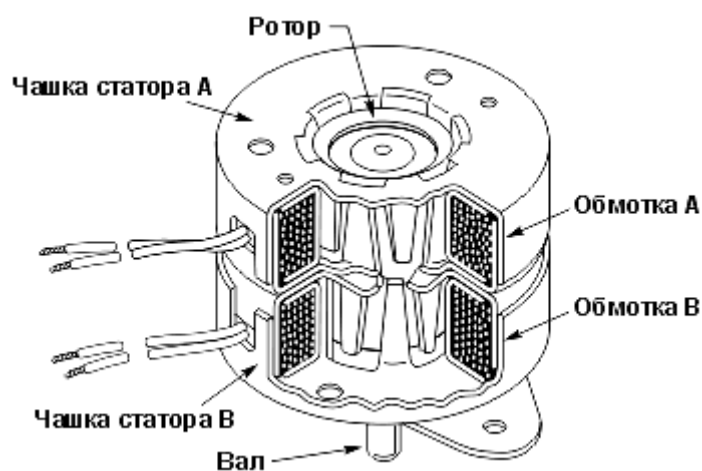


Рис. 3. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами

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. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с переменным магнитным сопротивлением.

1.3. 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 $3.6 - 0.9^\circ$). Гибридные двигатели сочетают в себе преимущество двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении (рис. 4).

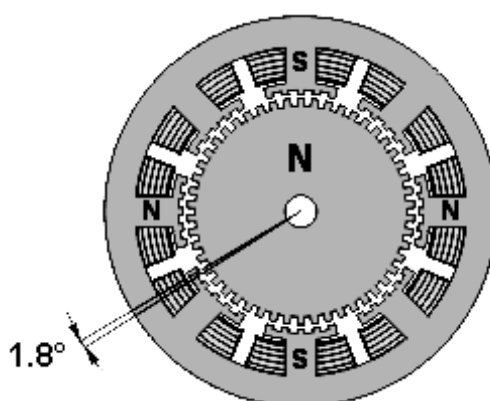


Рис. 4. Гибридный двигатель

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 основных полюса для $3,6^\circ$ двигателей и 8 основных полюсов для $1,8^\circ$ и $0,9^\circ$ 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. Зависимость между числом полюсов ротора, числом эквивалентных полюсов статора и числом фаз определяет угол шага α двигателя:

$$\alpha = \frac{360}{N_{ph}P_h} = \frac{360}{N} \quad (1)$$

где N_{ph} – число эквивалентных полюсов на фазу = число полюсов ротора, P_h – число фаз, N – полное количество полюсов для всех фаз вместе.

Ротор показанного на рисунке 4 двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет 2 фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг, соответственно, $1,8^\circ$.

Продольное сечение гибридного шагового двигателя показано на рис. 5. Стрелками показано направление магнитного потока постоянного магнита ротора. Часть потока (на рисунке показана черной линией) проходит через полюсные наконечники ротора, воздушные зазоры и полюсный наконечник статора. Эта часть не участвует в создании момента.

Как видно из рис. 5, воздушные зазоры у верхнего и нижнего полюсного наконечника ротора разные. Это достигается благодаря повороту полюс-

ных 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 рис. 5 показана штриховой белой линией), которая и создает момент. Часть цепи лежит в плоскости, перпендикулярной рисунку, поэтому не показана.

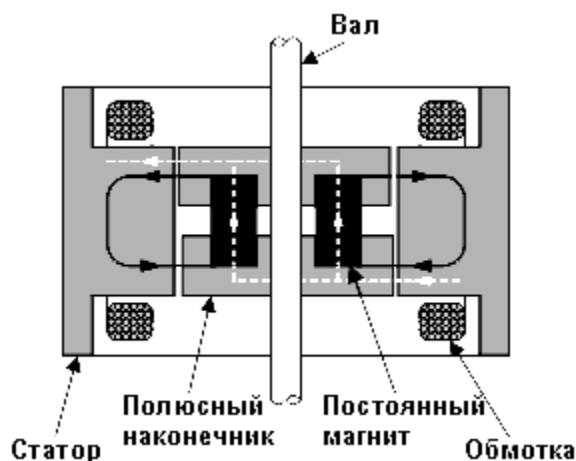


Рис. 5. Продольный разрез гибридного шагового двигателя

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.

Чтобы магнитный поток не замыкался через вал, который проходит внутри магнита, его изготавливают из немагнитных марок стали. 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.

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, далее будут рассматриваться только такие двигатели. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот, соответственно шаг равен $3,6^\circ$ или $1,8^\circ$. Большинство контроллеров позволяют работать в полушаговом режиме, где этот угол вдвое меньше, а некоторые контроллеры обеспечивают микрошаговый режим.

1.4. Биполярные и униполярные шаговые двигатели

Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна переполюсовываться драйвером. Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рис. 6, а).

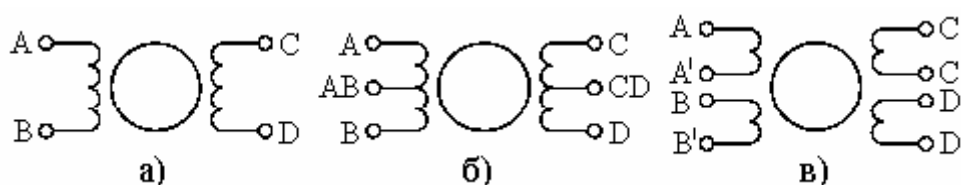


Рис. 6. Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в)

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. 6, б). Иногда униполярные двигатели имеют отдельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выво-

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

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.

2. Способы управления шаговым двигателем

Первый способ обеспечивается попеременной коммутации фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 7, а). Этот способ называют волновой последовательностью “*one phase on*” *full step* или *wave drive mode*. 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.

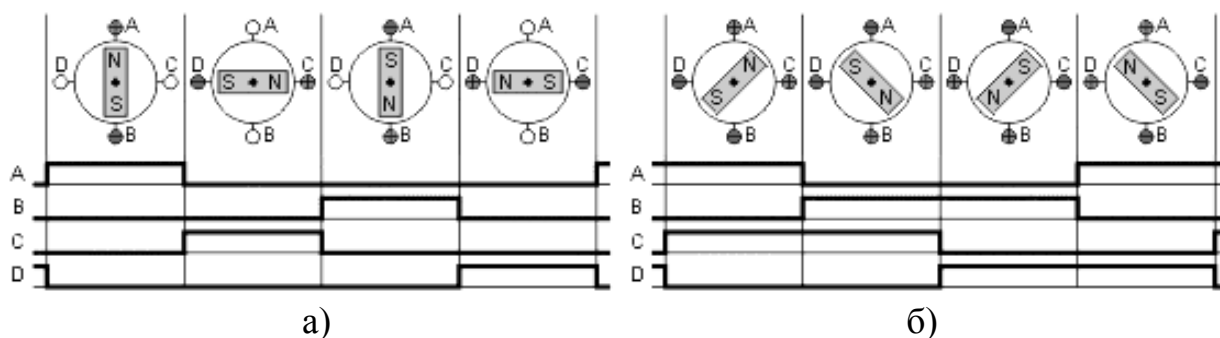


Рис. 7. Последовательности коммутации фаз: а – волновая, б – шаговая

Второй способ – управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. Его называют шаговой последовательностью “*two-phase-on*” *full step* или просто *full step mode*. 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.

В полношаговом режиме с двумя включенными фазами положения точек равновесия ротора смещены на пол-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 полшага. Для того, чтобы он не смещался при остановке, необходимо подавать в обмотки ток удержания. 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 драйверы 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.

Полушаговая последовательность – комбинация двух предыдущих, “*one and two-phase-on*” *half step* или просто *half step mode*, когда двигатель делает шаг в половину основного (рис. 8).

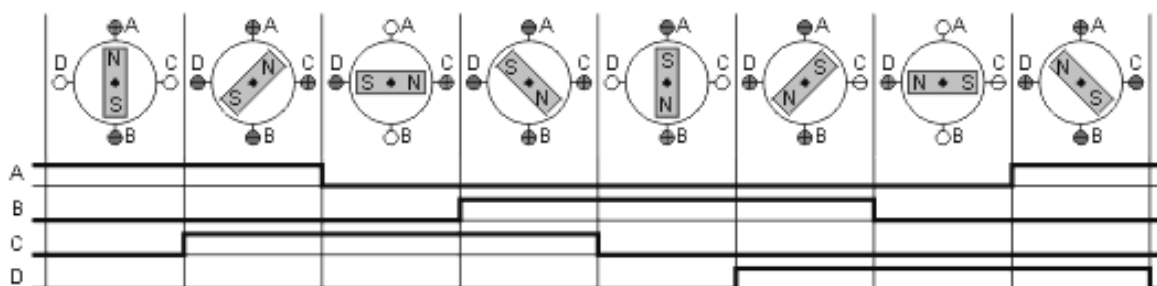


Рис. 8. Полушаговая последовательность

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. 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 драйверы реализуют

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

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 $\alpha = 2\pi/N$, показан на рис. 9.

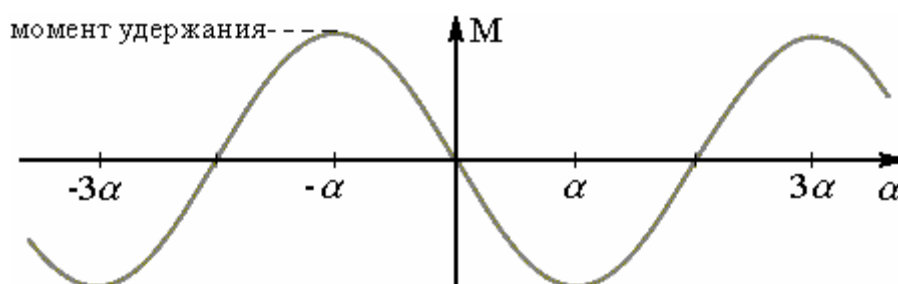


Рис. 9. Зависимость момента от угла поворота ротора для одной запитанной обмотки

Реально характер зависимости может быть несколько другой, что объясняется неидеальностью геометрии ротора и статора. Пиковое значение момента называется моментом удержания. Формула, описывающая зависимость момента от угла поворота ротора, имеет следующий вид:

$$M = -M_h \sin\left(\frac{\pi}{2\alpha}\varphi\right), \quad (2)$$

где M — момент, M_h — момент удержания, α — угол шага, φ — угол поворота ротора.

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. Для приведенных выше формул φ является механическим углом поворота ротора, а электрический угол для двигателя, имеющего 4 шага на периоде кривой момента, равен $\frac{\pi}{2\alpha}\varphi$ или $\frac{N}{4}\varphi$, где N – число шагов на оборот. Электрический угол фактически определяет угол поворота магнитного поля статора и позволяет строить теорию независимо от числа шагов на оборот для конкретного двигателя.

Если запитать одновременно две обмотки двигателя, то момент будет равен сумме моментов, обеспечиваемых обмотками по отдельности (рис. 10).

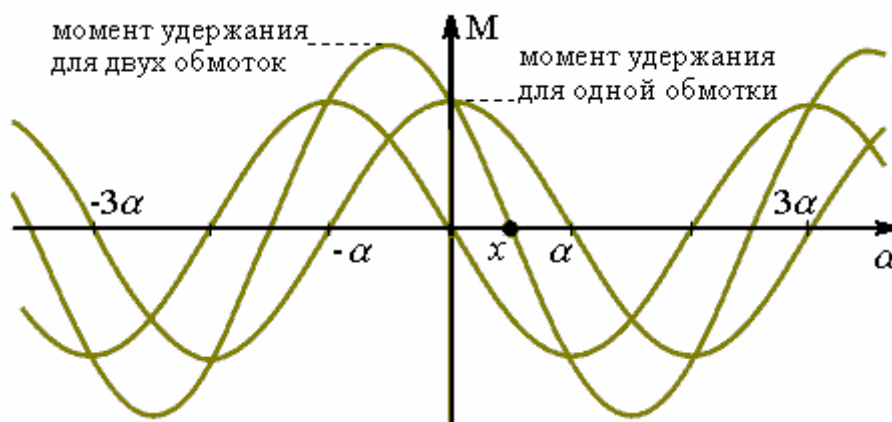


Рис. 10. Зависимость момента от угла поворота ротора для двух запитанных обмоток

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 x 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.

$$M_{h2} = M_{h1} \sqrt{2}, \quad (3)$$

где M_{h2} – момент удержания при двух запитанных обмотках, M_{h1} – момент удержания при одной запитанной обмотке. Именно этот момент обычно и указывается в характеристиках шагового двигателя.

Величина и направление магнитного поля показаны на векторной диаграмме (рис. 11).

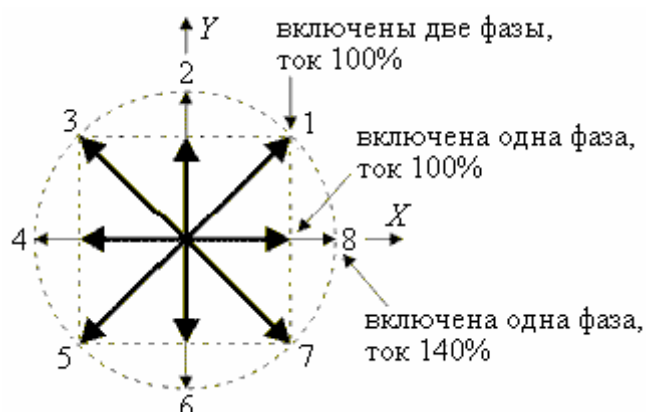


Рис. 11. Величина и направление магнитного поля для разных режимов питания фаз

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 скомбинировать 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 волновой и шаговой последовательностями, полшаговая имеет следующие преимущества:

- более высокая разрешающая способность без применения более дорогих двигателей;

- меньшие проблемы с явлением резонанса. Резонанс 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.

Способом устранения колебаний момента является поднятие момента в положениях с одной включенной фазой и обеспечение таким образом одинакового момента во всех положениях ротора. Это может быть достигнуто путем увеличения тока в этих положениях до уровня примерно 141% от номинального. Нужно отметить, что величина 141% является теоретической, поэтому в приложениях, требующих высокой точности поддержания момента эта величина должна быть подобрана экспериментально для конкретной скорости и конкретного двигателя. Поскольку ток поднимается только в те моменты, когда включена одна фаза, рассеиваемая мощность равна мощности в полношаговом режиме при токе 100% от номинального. Однако такое увеличение тока требует более высокого напряжения питания, что не всегда возможно. Есть и другой подход. Для устранения колебаний момента при работе двигателя в полушаговом режиме можно снижать ток в те моменты, когда включены две фазы. Для получения постоянного момента этот ток должен составлять 70,7% от номинального.

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 на источник питания, который представляет максимальное напряжение, имеющееся в системе, обеспечивается максимально быстрый спад то-

ка. Для получения быстрого спада тока при питании обмоток двигателя H-мостом все транзисторы должны закрываться, при этом обмотка через диоды оказывается подключенной к источнику питания. Скорость спада тока значительно уменьшится, если один транзистор моста оставить открытым и замкнуть обмотку на транзистор и диод. Для увеличения скорости спада тока при управлении униполярными двигателями подавление выбросов ЭДС самоиндукции предпочтительнее осуществлять не диодами, а варисторами или комбинацией диодов и стабилитрона, которые ограничат выброс на большем, но безопасном для транзисторов уровне. 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 драйверы 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.

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.

Если одновременно запитаны две обмотки двигателя, но токи в этих обмотках не равны (рис. 12), то результирующий момент будет $M_h = \sqrt{M_a^2 + M_b^2}$, а точка равновесия ротора сместится в точку

$$x = \frac{2\alpha}{\pi} \arctan\left(\frac{M_b}{M_a}\right), \quad (4)$$

где M_a и M_b – момент, создаваемый первой и второй фазой соответственно, M_h – результирующий момент удержания, x – положение равновесия ротора в радианах, α – угол шага в радианах.

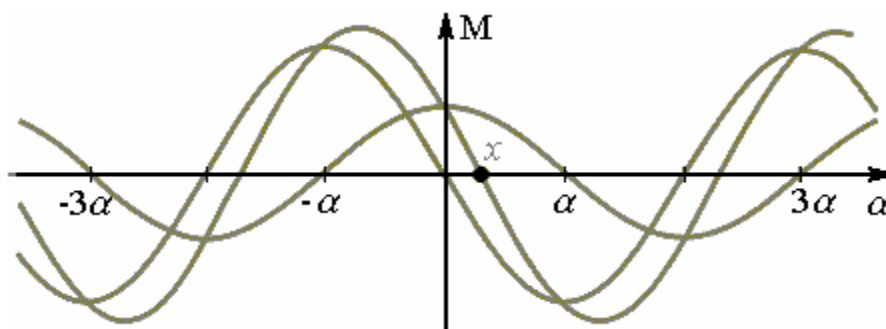


Рис. 12. Зависимость момента от угла поворота ротора в случае разных значений тока фаз

Смещение точки равновесия ротора 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.

Ещё раз нужно отметить, что приведенные выше формулы верны только в том случае, если зависимость момента от угла поворота ротора синусоидальная и если ни одна часть магнитной цепи двигателя не насыщается.

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° .

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 микроконтроллер. 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.

Иногда микрошаговый режим используется для увеличения точности величины шага сверх заявленной производителем двигателя. При этом используется номинальное число шагов. Для повышения точности используется коррекция положения ротора в точках равновесия. Для этого сначала снимают характеристику для конкретного двигателя, а затем, изменяя соотношение токов в фазах, корректируют положение ротора индивидуально для каждого шага.

На практике при осуществлении каждого шага ротор не сразу останавливается в новом положении равновесия, а осуществляет затухающие колебания вокруг положения равновесия. Время установления зависит от характеристик нагрузки и от схемы драйвера. Во многих приложениях такие колебания являются нежелательными. Избавиться от этого явления можно путем

использования микрошагового режима. На рис. 13 показаны перемещения ротора при работе в полношаговом и микрошаговом режимах.

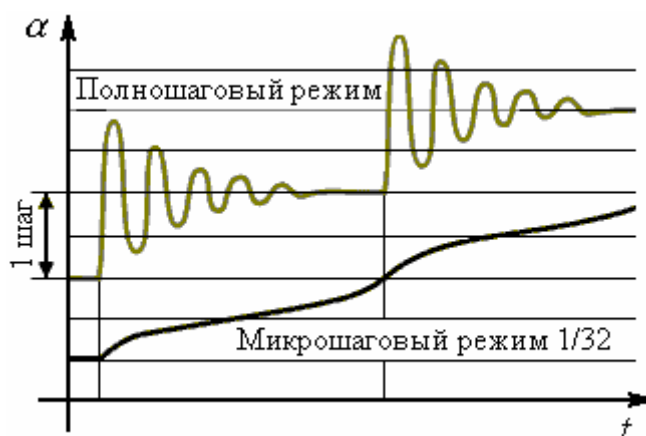


Рис. 13. Перемещения ротора в полношаговом и микрошаговом режимах

Из рис. 13 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.

На практике существуют некоторые факторы, ограничивающие точность работы привода в микрошаговом режиме. Некоторые из них относятся к драйверу, а некоторые непосредственно к двигателю.

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.

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 по-

грешностям 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 возрос. Это приводит к ухудшению точности в микрошаговом режиме. Лучшие результаты 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 сказать, что и в полношаговом режиме момент удержания может колебаться на 10 – 20 % вследствие искажений 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.

Вполне естественно, что любое желаемое увеличение разрешающей способности наталкивается на какие-то физические ограничения. Не стоит думать, что точность позиционирования, например, для $7,2^\circ$ двигателя в микрошаговом режиме не уступает точности $1,8^\circ$ двигателя.

Препятствием являются следующие физические ограничения:

- нарастание момента в зависимости от угла поворота у $7,2$ градусного двигателя в четыре раза более пологое, чем у настоящего $1,8$ -градусного двигателя. Вследствие действия момента трения или момента инерции нагрузки точность позиционирования уже будет хуже;
- 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 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 так-

же способен уменьшить время установления механической системы, так как в отличие от полношагового режима отсутствуют выбросы и осцилляции. Однако в большинстве случаев для обычных двигателей нельзя гарантировать точного позиционирования в микрошаговом режиме.

3. Зависимость момента от скорости, влияние нагрузки

Момент, создаваемый шаговым двигателем, зависит от скорости, тока в обмотках и схемы драйвера. На рис. 14, а показана зависимость момента от угла поворота ротора.

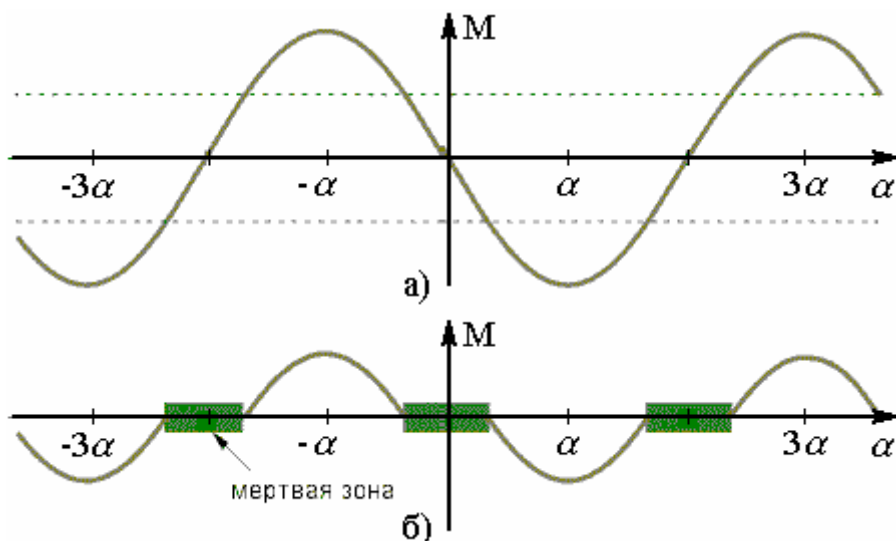


Рис. 14. Возникновение мертвых зон в результате действия трения

У идеального шагового двигателя эта зависимость синусоидальная. Точки α являются положениями равновесия ротора для негруженого 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 .

$$\varphi = \frac{N}{2\pi} \sin\left(\frac{M_a}{M_h}\right), \quad (5)$$

где φ – угловое смещение, N – количество шагов двигателя на оборот, M_a – внешний приложенный момент, M_h – момент удержания.

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 распределены на две категории: статическое трение или трение покоя, для преодоления которого требуется постоянный момент и динамическое трение или вязкое трение, которое зависит от скорости. Рассмотрим статическое трение. Предположим, что для его преодоления требуется момент в половину от пикового. На рис. 14, 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. 14, б):

$$d = 2 \frac{2\alpha}{\pi} \arcsin\left(\frac{M_T}{M_h}\right) = \frac{4\alpha}{\pi} \arcsin\left(\frac{M_T}{M_h}\right), \quad (6)$$

где d – ширина мертвой зоны в радианах, α – угол шага в радианах, M_T – момент трения, M_h – момент удержания.

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 величиной 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 α радиан. При этом минимальный момент имеет в место, когда ротор находится ровно между соседними положениями равновесия (рис. 15).

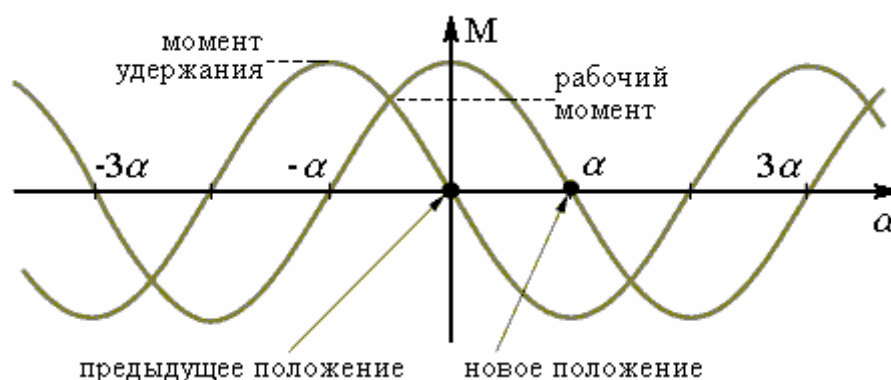


Рис. 15. Момент удержания и рабочий момент шагового двигателя

Этот момент называют рабочим моментом M_p , он означает, какой наибольший момент может преодолевать двигатель при вращении с малой скоростью. При синусоидальной зависимости момента от угла поворота ротора, этот момент $M_p = M_h / \sqrt{2}$. 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 драйвера. При конструировании высокоскоростных драйверов 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. 16, а) время нарастания и спада тока не способно сильно повлиять на момент, однако на высоких скоростях момент падает. Связано это с тем, что на высоких скоростях ток в обмотках двигателя не успевает достигнуть номинального значения (рис. 16, б).

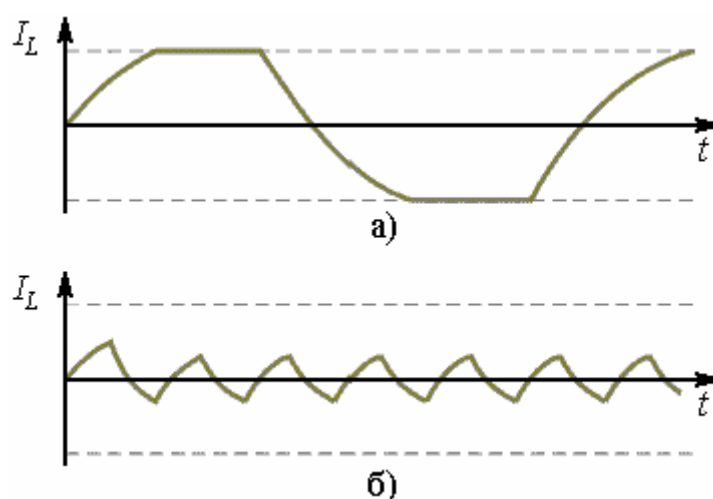


Рис. 16. Форма тока в обмотках двигателя на разных скоростях работы

Для того чтобы момент падал как можно меньше, необходимо обеспечить высокую скорость нарастания тока в обмотках двигателя, что достигается применением специальных схем для их питания.

При увеличении частоты коммутации фаз начиная с некоторой частоты среза, момент монотонно падает. Обычно для шагового двигателя приводятся две кривые зависимости момента от скорости вращения ротора n (рис. 17).

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, назы-

ваемой максимальной частотой старта или частотой приемистости. Она определяет максимальную скорость, на которой ненагруженный двигатель может тронуться. На практике эта величина лежит в пределах 200 – 500 полных шагов в секунду.

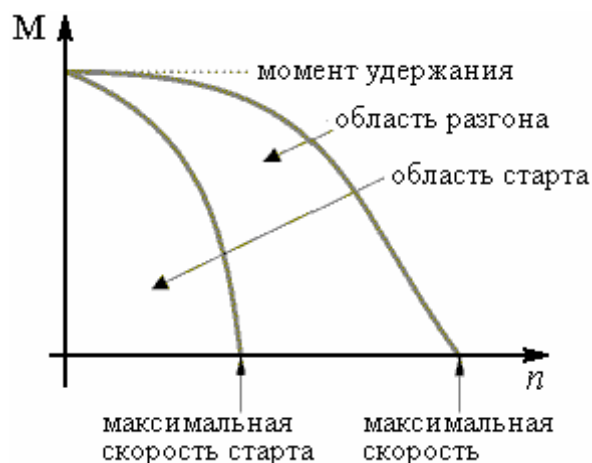


Рис. 17. Зависимость момента от скорости

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.

4. Разгон шагового двигателя

Для того, чтобы работать на большой скорости из области разгона (см. рис. 17), 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 значительно больших скоростей – в промышленных применениях 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.

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.

5. Резонанс шагового двигателя

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. Дело в том, что систему ротор – магнитное поле – статор можно рассматривать как пружинный маятник, частота колебаний которого зависит от момента инерции ротора (плюс

нагрузки) и величины магнитного поля. 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, которая вычисляется по формуле:

$$F_0 = \frac{\sqrt{\frac{NM_H}{J_R + J_L}}}{4\pi}, \quad (7)$$

где F_0 – резонансная частота, N – число полных шагов на оборот, M_H – момент удержания для используемого способа управления и тока фаз, J_R – момент инерции ротора, J_L – момент инерции нагрузки.

Необходимо заметить, что резонансную частоту определяет момент инерции собственно ротора двигателя и момент инерции нагрузки, подключенной к валу двигателя. Поэтому резонансная частота ротора ненагруженного двигателя, которая иногда приводится среди параметров, имеет маленькую 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 замкнуть обмотки, которые на данном шаге не используются, это приведет к демпфированию резонанса.

И, наконец, существуют методы борьбы с резонансом на уровне алгоритма работы драйвера. Например, можно использовать тот факт, что при работе с двумя включенными фазами резонансная частота примерно на 20% выше, чем с одной включенной фазой. 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.

Самой эффективной мерой для борьбы с резонансом является применение микрошагового режима.

6. Способы питания 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 несколько сложнее и требуется уже минимум 4 сигнала. Все сигналы управления шаговым двигателем можно сформировать программно, однако это вызовет большую загрузку микроконтроллера. Поэтому чаще применяют специальные микросхемы драйверов шагового двигателя, которые уменьшают количество требуемых от процессора динамических сигналов. Типично эти микросхемы требуют тактовую частоту, которая является частотой повторения шагов и статический сигнал, который задает направление. 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.

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

Схема драйвера 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.

6.1. Способы изменения направления тока

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. 18).

В биполярных двигателях направление меняется путем переплюсовки выводов обмоток. Для такой переплюсовки требуется полный Н-мост (рис. 19). 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, и как будет показано в дальнейшем, он существенно ограничивает возможности двигателя.

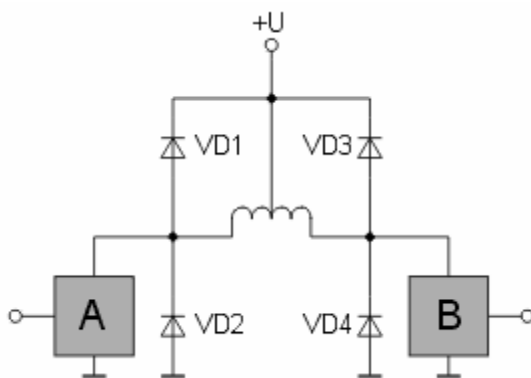


Рис. 18. Питание обмотки униполярного двигателя

Нужно отметить, что при отдельном управлении транзисторами Н-моста возможны ситуации, когда источник питания закорочен ключами. По-

этому логическая схема управления должна быть построена таким образом, чтобы исключить эту ситуацию даже в случае сбоев управляющего микроконтроллера.

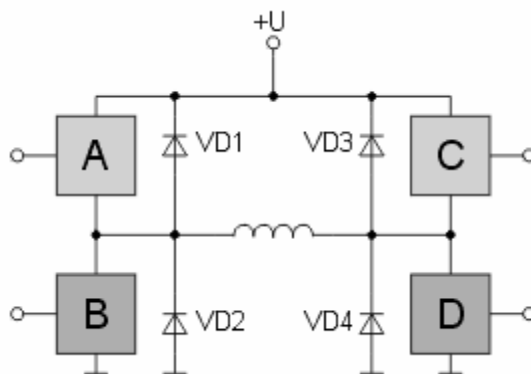


Рис. 19. Питание обмотки биполярного двигателя

Обмотки двигателя представляют собой индуктивность, а это значит, что ток не может бесконечно быстро нарастать или бесконечно быстро спадать без привлечения бесконечной разности потенциалов. При подключении обмотки к источнику питания ток будет с некоторой скоростью нарастать, а при отключении обмотки произойдет выброс напряжения. Этот выброс способен повредить ключи, в качестве которых используются биполярные или полевые транзисторы. Для ограничения этого выброса устанавливают специальные защитные цепочки.

На рис. 18 и рис. 19 эти цепочки образованы диодами, значительно реже применяют конденсаторы или их комбинацию с диодами. Применение конденсаторов вызывает появление электрического резонанса, что может вызвать увеличение момента на некоторой скорости.

На рис. 18 потребовалось 4 диода по той причине, что половинки обмоток униполярного двигателя расположены на общем сердечнике и сильно 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. Нужно отметить, что в случае применения быстродействующих ключей тре-

буются сравнимые по быстродействию диоды. В случае применения медленных диодов требуется их шунтирование небольшими конденсаторами.

6.2. Стабилизация тока

Для регулировки момента требуется регулировать силу тока в обмотках. В любом случае, ток должен быть ограничен, чтобы не превысить рассеиваемую мощность на омическом сопротивлении обмоток. Более того, в полшаговом режиме ещё требуется в определенные моменты обеспечивать нулевое значение тока в обмотках, а в микрошаговом режиме вообще требуется задание разных значений тока.

Для каждого двигателя производителем указывается номинальное рабочее напряжение обмоток. Поэтому простейший способ питания обмоток – это использование источника постоянного напряжения. В этом случае ток ограничен омическим сопротивлением обмоток и напряжением источника питания (рис. 20, а), поэтому такой способ питания называют L/R -питанием.

Ток в обмотке нарастает по экспоненциальному закону со скоростью, определяемой индуктивностью, активным сопротивлением обмотки и приложенным напряжением. При повышении частоты ток не достигает номинального значения и момент падает. Поэтому такой способ питания пригоден только при работе на малых скоростях и используется на практике только для маломощных двигателей.

При работе на больших скоростях требуется увеличивать скорость нарастания тока в обмотках, что возможно путем повышения напряжения источника питания. При этом максимальный ток обмотки должен быть ограничен с помощью дополнительного резистора. Например, если используется напряжение питания в 5 раз большее номинального, то требуется такой дополнительный резистор, чтобы общее сопротивление составило $5R$, где R – омическое сопротивление обмотки ($L/5R$ -питание). Этот способ питания обеспечивает более быстрое нарастание тока и как следствие, больший момент (рис. 20, б). Однако он имеет существенный недостаток: на резисторе

рассеивается дополнительная мощность. Большие габариты мощных резисторов, необходимость отвода тепла и повышенная необходимая мощность источника питания – всё это делает такой метод неэффективным и ограничивает область его применения небольшими двигателями мощностью 1 – 2 ватта.

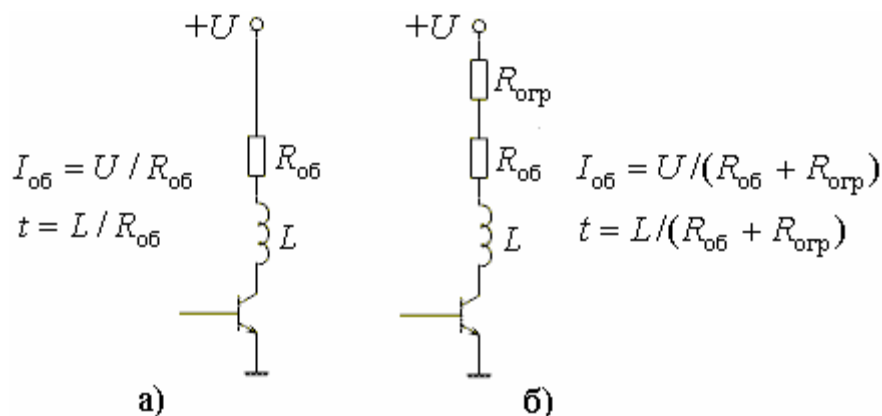


Рис. 20. Питание обмотки номинальным напряжением (а) и использование ограничительного резистора (б)

Следует заметить, что до начала 80-х годов прошлого века параметры шаговых двигателей, приводимые производителями, относились именно к такому способу питания.

Еще более быстрое нарастание тока можно получить, если использовать для питания двигателя генератор тока. Нарастание тока будет происходить линейно, это позволит быстрее достигать номинального значения тока. Тем более, что пара мощных резисторов может стоить дороже, чем пара мощных транзисторов вместе с радиаторами. Как и в предыдущем случае, генератор тока будет рассеивать дополнительную мощность, что делает эту схему питания неэффективной.

Существует еще одно решение, обеспечивающее высокую скорость нарастания тока и низкую мощность потерь. Основано оно на применении двух источников питания.

В начале каждого шага кратковременно обмотки подключаются к более высоковольтному источнику, который обеспечивает быстрое нарастание тока (рис. 21). Затем напряжение питания обмоток уменьшается (момент времени

t_1 на рис. 21). Недостатком этого метода является необходимость двух ключей, двух источников питания и более сложной схемы управления. В системах, где такие источники уже есть, метод может оказаться достаточно дешёвым.

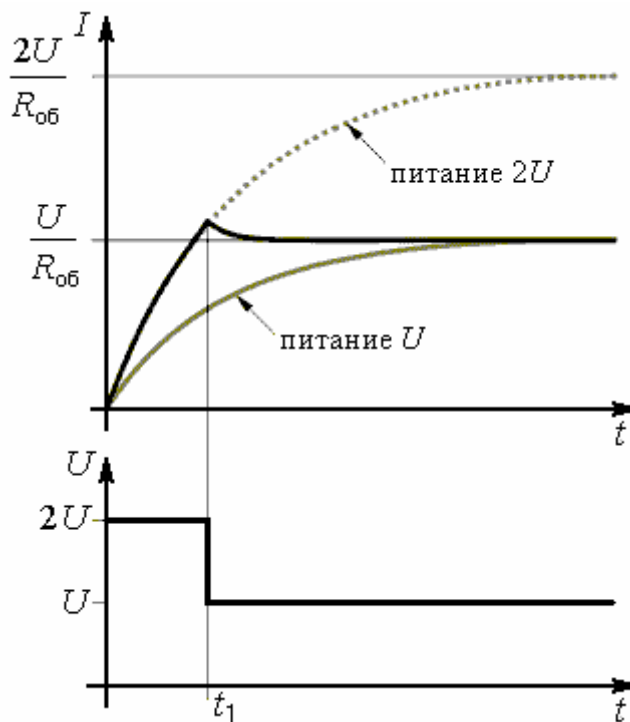


Рис. 21. Питание обмотки двигателя ступенчатым напряжением

Еще одной трудностью является невозможность определения момента времени t_1 для общего случая. Для двигателя с меньшей индуктивностью обмоток скорость нарастания тока выше и при фиксированном t_1 средний ток может оказаться выше номинального, что приведет к перегреву двигателя.

Еще одним методом стабилизации тока в обмотках двигателя является ключевое (широтно-импульсное) регулирование. Современные драйверы шаговых двигателей используют именно этот метод. Ключевой стабилизатор обеспечивает высокую скорость нарастания тока в обмотках вместе с простотой его регулирования и очень низкими потерями. Еще одним преимуществом схемы с ключевой стабилизацией тока является и то, что она поддерживает момент двигателя постоянным, независимо от колебаний напряжения питания. Это позволяет использовать простые и дешевые нестабилизированные источники питания.

Для обеспечения высокой скорости нарастания тока используют напряжение источника питания, в несколько раз превышающее номинальное. Путем регулировки скважности импульсов, среднее напряжение и ток поддерживаются на номинальном для обмотки уровне. Поддержание производится в результате действия обратной связи. Последовательно с обмоткой включается резистор – датчик тока R (рис. 22, а).

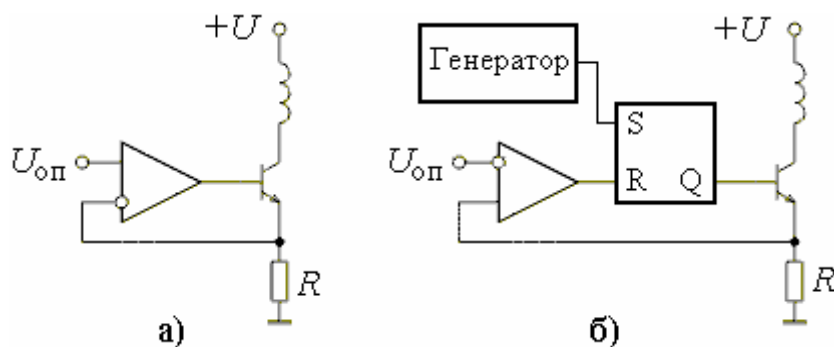


Рис. 22. Различные схемы ключевой стабилизации тока

Падение напряжения на этом резисторе пропорционально току в обмотке. Когда ток достигает установленного значения, ключ выключается, что приводит к падению тока. Когда ток спадает до нижнего порога, ключ снова включается. Этот процесс повторяется периодически, поддерживая среднее значение тока постоянным.

Управляя величиной $U_{оп}$ можно регулировать ток фазы, например, увеличивать его при разгоне и торможении и снижать при работе на постоянной скорости. Можно также задавать его с помощью ЦАП в форме синусоиды, реализуя таким образом микрошаговый режим. Такой способ управления ключевым транзистором обеспечивает постоянную величину пульсаций тока в обмотке, которая определяется гистерезисом компаратора. Однако частота переключений будет зависеть от скорости изменения тока в обмотке, в частности, от ее индуктивности и от напряжения питания. Кроме того, две такие схемы, питающие разные фазы двигателя, не могут быть засинхронизированы, что может явиться причиной дополнительных помех.

От указанных недостатков свободна схема с постоянной частотой переключения (рис. 22, б). Ключевым транзистором управляет триггер, кото-

рый устанавливается специальным генератором. Когда триггер устанавливается, ключевой транзистор открывается и ток фазы начинает расти. Вместе с ним растет и падение напряжения на датчике тока. Когда оно достигает опорного напряжения, компаратор переключается, сбрасывая триггер. Ключевой транзистор при этом выключается и ток фазы начинает спадать до тех пор, пока триггер не будет вновь установлен генератором.

Такая схема обеспечивает постоянную частоту коммутации, однако величина пульсаций тока не будет постоянной. Частота генератора обычно выбирается не менее 20кГц, чтобы двигатель не создавал слышимого звука. В то же время слишком высокая частота переключений может вызвать повышенные потери в сердечнике двигателя и потери на переключениях транзисторов. Хотя потери в сердечнике с повышением частоты растут не так быстро ввиду уменьшения амплитуды пульсаций тока с ростом частоты. Пульсации порядка 10% от среднего значения тока обычно не вызывают проблем с потерями.

На рис. 23 показана форма тока в обмотках двигателя для трех способов питания.

Наилучшим в смысле момента является ключевой метод. К тому же он обеспечивает высокий КПД и позволяет просто регулировать величину тока.

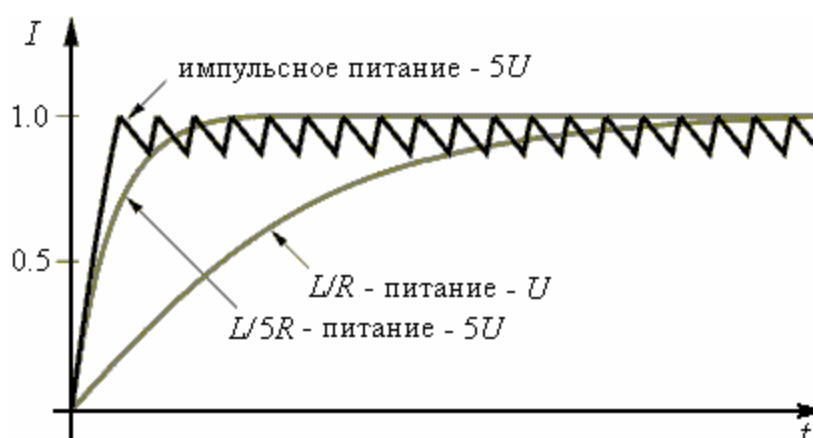


Рис. 23. Форма тока в обмотках двигателя для различных способов питания

6.3. Скорость спада тока в обмотках

На рис. 19 были показаны конфигурации ключей в H-мосту для включения разных направлений тока в обмотке. Для выключения тока можно выключить все ключи H-моста или же оставить один ключ включенным (рис. 24). Эти две ситуации различаются по скорости спада тока в обмотке. После отключения индуктивности от источника питания ток не может мгновенно прекратиться. Возникает ЭДС самоиндукции, имеющая противоположное источнику питания направление.

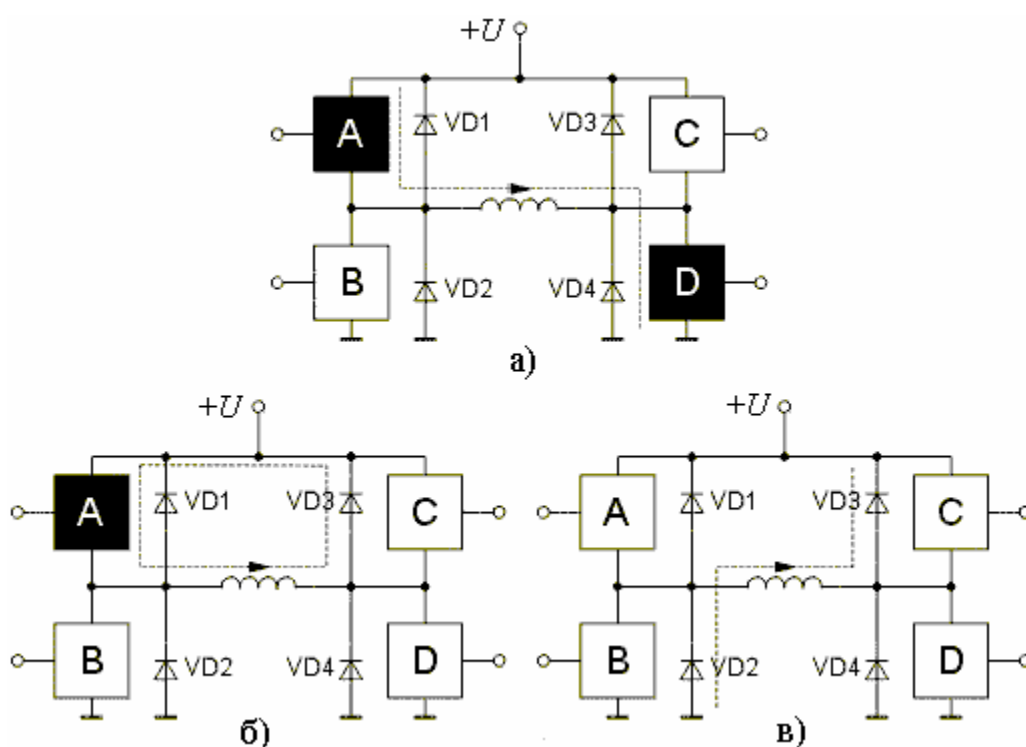


Рис. 24. Медленный и быстрый спад тока

При использовании транзисторов в качестве ключей необходимо использовать шунтирующие диоды, чтобы обеспечить проводимость в обе стороны. Скорость изменения тока в индуктивности пропорциональна приложенному напряжению. Это справедливо как для нарастания тока, так и для его спада. Только в первом случае источником энергии является источник питания, а во втором сама индуктивность отдает запасенную энергию. Этот процесс может происходить при разных условиях.

На рис. 24, а показано состояние ключей Н-моста, когда обмотка включена. Включены ключи А и D, направление тока показано стрелкой. На рис. 24, б обмотка выключена, но ключ А включен. ЭДС самоиндукции закорачивается через этот ключ и диод VD3. В это время на выводах обмотки будет небольшое напряжение, равное прямому падению на диоде плюс падение на ключе (напряжение насыщения транзистора). Так как напряжение на выводах обмотки мало, малой будет и скорость изменения тока. Соответственно малой будет и скорость спада магнитного поля. А это значит, еще некоторое время статор двигателя будет создавать магнитное поле, которого в это время быть не должно. На вращающийся ротор это поле будет оказывать тормозящее воздействие. При высоких скоростях работы двигателя этот эффект может серьезно помешать нормальной работе двигателя. Быстрый спад тока при выключении является очень важным для высокоскоростных контроллеров, работающих в полушаговом режиме.

Возможен и другой способ отключения тока обмотки, когда размыкаются все ключи Н-моста (рис. 24, в). При этом ЭДС самоиндукции закорачивается через диоды VD2, VD3 на источник питания. Это значит, что во время спада тока на обмотке будет напряжение, равное сумме напряжения источника питания и прямого падения на двух диодах. По сравнению с первым случаем, это значительно большее напряжение. Соответственно, более быстрым будет спад тока и магнитного поля. Такое решение, использующее напряжение источника питания для ускорения спада тока является наиболее простым, но не единственным.

Следует отметить, что в ряде случаев на источнике питания могут появиться выбросы, для подавления которых понадобятся специальные демпферные цепочки. Безразлично, каким способом обеспечивается на обмотке повышенное напряжение во время спада тока. Для этого можно применить стабилитроны или варисторы. Однако на этих элементах будет рассеиваться дополнительная мощность, которая в первом случае отдавалась обратно в источник питания.

Для униполярного двигателя ситуация более сложная. Дело в том, что половинки обмотки, или две отдельных обмотки одной фазы сильно связаны между собой. В результате этой связи на закрывающемся транзисторе будут иметь место выбросы повышенной амплитуды. Поэтому транзисторы должны быть защищены специальными цепочками. Эти цепочки для обеспечения быстрого спада тока должны обеспечивать довольно высокое напряжение ограничения. Чаще всего применяются диоды вместе со стабилитронами или варисторы. Один из способов схемотехнической реализации показан на рис. 25.

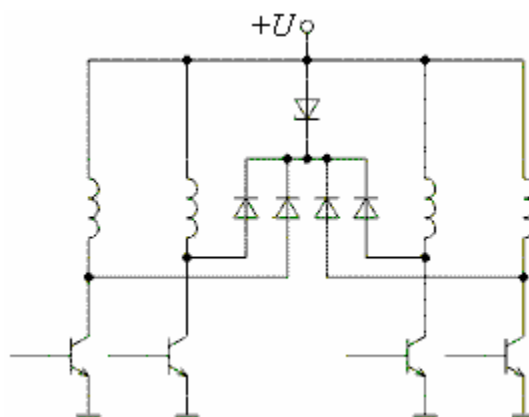


Рис. 25. Пример реализации быстрого спада тока для униполярного двигателя

При ключевом регулировании величина пульсаций тока зависит от скорости его спада. Если обеспечить закорачивание обмотки диодом, будет реализован медленный спад тока. Это приводит к уменьшению амплитуды пульсаций тока, что является весьма желательным, особенно при работе двигателя в микрошаговом режиме. Для данного уровня пульсаций медленный спад тока позволяет работать на более низких частотах ШИМ, что уменьшает нагрев двигателя. По этим причинам медленный спад тока широко используется.

Однако существует несколько причин, по которым медленное нарастание тока не всегда является оптимальным:

- из-за отрицательной обратной ЭДС, ввиду малого напряжения на обмотке во время спада тока, реальный средний ток обмотки может оказаться завышенным;

– когда требуется резко уменьшить ток фазы (например, в полушаговом режиме), медленный спад не позволит сделать это быстро;

– когда требуется установить очень низкое значение тока фазы, регулирование может нарушиться из-за существования ограничения на минимальное время включенного состояния ключей.

Высокая скорость спада тока, которая реализуется путем замыкания обмотки на источник питания, приводит к повышенным пульсациям. Вместе с тем, устраняются недостатки, свойственные медленному спаду тока. Однако при этом точность поддержания среднего тока меньше, также больше потери.

7. Выводы

Таким образом, к **достоинствам шаговых двигателей** можно отнести следующие их особенности:

- 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 от 3 до 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 шаговых двигателей:

- 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;

Рекомендуемая литература

1. Арменский Е.В., Прокофьев П.А., Фалк Г.Б. Автоматизированный электропривод. – М.: Высшая школа, 1987.
2. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

Содержание

Введение	3
1. Устройство шаговых двигателей	4
1.1. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением	4
1.2. Двигатели с постоянными магнитами	5
1.3. Гибридные двигатели	7
1.4. Биполярные и униполярные шаговые двигатели	10
2. Способы управления шаговым двигателем	12
3. Зависимость момента от скорости, влияние нагрузки	24
4. Разгон шагового двигателя	28
5. Резонанс шагового двигателя	29
6. Способы питания шагового двигателя	32
6.1. Способы изменения направления тока	33
6.2. Стабилизация тока	35
6.3. Скорость спада тока в обмотках	40
7. Выводы	43
Рекомендуемая литература	44

У ч е б н о е и з д а н и е

Алексей Викторович **Емельянов**
Александр Николаевич **Шилин**

ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Учебное пособие

Редактор Е.А. Пичугина

Темплан 2005 г., поз. № 73

Лицензия ИД № 04790 от 18.05.2001 г.

Подписано в печать 20.09.2005 г. Формат 60×84 1/16. Бумага газетная.

Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,23

Тираж 150 экз. Заказ 665.

Волгоградский государственный технический университет
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28.

РПК “Политехник”
Волгоградского государственного технического университета
400131, г. Волгоград, ул. Советская, 35.