

(Продолжение. Начало в №6—7/2001)

Раз шажок, два шажок...

Зависимость момента от скорости, влияние нагрузки

Момент, создаваемый шаговым двигателем, зависит от нескольких факторов:

- скорости;
- тока в обмотках;
- схемы драйвера.

На рис. 14, а показана зависимость момента от угла поворота ротора. У идеального шагового двигателя эта зависимость синусоидальная. Точки S являются положениями равновесия ротора для ненагруженного двигателя и соответствуют нескольким последо-



Рис. 14. Возникновение мертвых зон в результате действия трения

вательным шагам. Если к валу двигателя приложить внешний момент, меньший момента удержания, то угловое положение ротора изменится на некоторый угол

$$\Phi = (N/(2p)) \cdot \sin(Ta/Th),$$

где Φ – угловое смещение, N – количество шагов двигателя на оборот, Ta – внешний приложенный момент, Th – 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 разделены 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):

$$d = 2(S/(p/2)) \arcsin(Tf/Th) = (S/(p/4)) \arcsin(Tf/Th),$$

где d – ширина мертвой зоны в радианах, S – угол шага в радианах, Tf – момент трения, Th – 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.

Отсутствие 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. Это весьма приятный факт.

Каждый раз, когда шаговый двигатель осуществляет шаг, ротор поворачивается на S радиан. При этом минимальный момент имеет место, когда ротор находится ровно между соседними положениями равновесия (рис. 15). Этот момент называют рабочим моментом, он показывает, какой наибольший момент может преодолевать двигатель при вращении с малой скоростью. При синусоидальной зависимости момента от угла поворота ротора, этот момент $T_r = Th/(2^{0.5})$. 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



Рис. 15. Момент удержания и рабочий момент шагового двигателя

двигателя, метода управления фазой и схемы драйвера. При конструировании высокоскоростных драйверов шаговых двигателей нужно учитывать, что их обмотки представляют собой индуктивность, которая 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). 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.

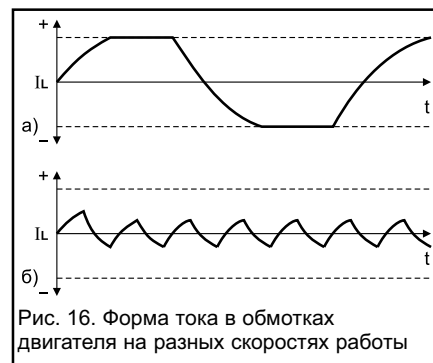


Рис. 16. Форма тока в обмотках двигателя на разных скоростях работы

Поведение момента при увеличении частоты коммутации фаз примерно таково: начиная с некоторой частоты среднего момента монотонно падает. Обычно для шагового двигателя приводятся две кривые зависимости момента от скорости (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, называемой максимальной частотой старта или частотой приемистости. Она определяет максимальную скорость, на



Рис. 17. Зависимость момента от скорости

которой ненагруженный двигатель может тронуться. На практике эта величина лежит в пределах 200–500 полных шагов в секунду. Инерционность нагрузки сильно влияет на вид внутренней кривой. Большая инерционность соответствует меньшей области под кривой, которая называется областью старта. Внешняя кривая (кривая разгона, или pull-out curve) показывает, при каком максимальном моменте трения для данной скорости шаговый двигатель способен поддерживать вращение без пропуска шагов. Эта кривая пересекает ось скоростей в точке, называемой максимальной частотой разгона. Она показывает максимальную скорость для данного двигателя без нагрузки. При измерении максимальной скорости нужно иметь в виду, что из-за явления резонанса момент равен нулю еще и на резонансной частоте. Область, которая лежит между кривыми, называется областью разгона.

Нужно отметить, что схема драйвера в значительной степени влияет на ход кривой момент-скорость, но этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Разогнать!

Для того чтобы работать на большой скорости из области разгона (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 из-за перегрева ротора. Однако высокая скорость кратковременно может быть использована при осуществлении позиционирования.

При разгоне двигатель проходит ряд скоростей, при этом на одной из них

можно столкнуться с неприятным явлением резонанса. Для нормального разгона желательно иметь нагрузку, момент инерции которой как минимум равен моменту инерции ротора. На ненагруженном двигателе явление резонанса проявляется наиболее сильно. Подробно методы борьбы с этим явлением будут описаны ниже.

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

Реализация закона, по которому будет производиться ускорение или торможение двигателя, обычно осуществляется программно управляющим микроконтроллером, так как именно микроконтроллер обычно является источником тактовой частоты для драйвера шагового двигателя, хотя раньше для этих целей применялись управляемые напряжением генераторы или программируемые делители частоты. Для генерации тактовой частоты удобно использовать аппаратный таймер, который имеется в составе практически любого микроконтроллера. Когда двигатель вращается с постоянной скоростью, достаточно загрузить в таймер постоянное значение периода повторения шагов (длительность шага). Если же двигатель разгоняется или тормозится, этот период меняется с каждым новым шагом. При разгоне или торможении с постоянным ускорением частота повторения шагов должна изменяться линейно. Соответственно значение периода, которое необходимо загружать в таймер, должно меняться по гиперболическому закону.

Для наиболее общего случая требуется знать зависимость длительности шага от текущей скорости. Количество шагов, которое осуществляет двигатель при разгоне за время t равно:

$$N = 1/2At^2 + Vt,$$

где N – число шагов, t – время, V – скорость, выраженная в шагах в единицу времени, A – ускорение, выраженное в шагах, деленных на время в квадрате.

Для одного шага $N = 1$, тогда длительность шага

$$t_1 = T = (-V + (V^2 + 2A)^{0.5})/A.$$

В результате осуществления шага скорость становится равной

$$V_{new} = (V^2 + 2A)^{0.5}.$$

Вычисления по приведенным формулам довольно трудоемки и требуют зна-

чительных затрат процессорного времени. Однако они позволяют изменять значение ускорения в произвольный момент. Расчеты можно существенно упростить, если потребовать постоянства ускорения во время разгона и торможения. В этом случае можно записать зависимость длительности шага от времени разгона:

$$V = V_0 + At,$$

где V – текущая скорость, V_0 – начальная скорость (минимальная скорость, с которой начинается разгон), A – ускорение;

$$1/T = 1/T_0 + At,$$

где T – длительность шага, T_0 – начальная длительность шага, t – текущее время. Отсюда получаем

$$T = T_0 / (1 + T_0 At).$$

Производить вычисления по этой формуле проще. Однако, для того чтобы поменять значение ускорения, требуется остановить двигатель.

Резонанс

Как уже было сказано выше 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. Этот эффект проявляется в том случае, когда 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 нагрузка) и величины магнитного поля. Ввиду сложной конфигурации магнитного поля, резонансная частота ротора зависит от амплитуды колебаний. При уменьшении амплитуды частота растет, приближаясь к малоамплитудной частоте, которая вычисляется количественно. Эта частота зависит от угла шага и отношения момента удержания к моменту инерции ротора. Большой момент удержания и меньший момент инерции приводят к увеличению резонансной частоты.

Резонансная частота вычисляется по формуле

$$F_0 = (N \cdot T_H / (J_R + J_L))^{0.5} / 4 \cdot \rho,$$

где F_0 – резонансная частота, N – число полных шагов на оборот, T_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 плюс момент инерции нагрузки, подключенной к валу двигателя. Поэтому резонансная частота ротора ненагруженного двигателя, которая иногда приводится среди параметров, имеет малую 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 пройти резонансную частоту при разгоне. В любом случае, явление резонанса способно существенно ухудшить точностные характеристики привода.

В системах с низким демпфированием существует опасность потери шагов, либо 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, равным 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.

Однако самой эффективной мерой борьбы с резонансом является применение микрошагового режима.

Чем же его кормить?

Для питания обычного двигателя постоянного тока требуется лишь источник постоянного напряжения, а необходимые коммутации обмоток выполняются коллектором. С шаговым двигателем дело обстоит 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°. Направление вращения зависит от того, какая фаза опережает. Скорость определяется частотой следования импульсов.

В полушаговом режиме все несколько сложнее и требуется уже как минимум четыре 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 динамических сигналов, требуемых от процессора. Эти микросхемы требуют подачи тактовой частоты, которая является частотой повторения шагов, и статического сигнала, который задает направление вращения. Дополнительно используется сигнал включения полушагового режима. Для микросхем драйверов, которые работают в микрошаговом режиме, требуется большее количество сигналов. Весьма распространен случай, когда необходимые последовательности сигналов управления фазами формируются с помощью одной микросхемы, а необходимые токи фаз обеспечивает другая микросхема. Хотя в последнее время появляется все больше драйверов, реализующих все функции в одной микросхеме.

Мощность, которая требуется от драйвера, зависит от размеров двигателя и составляет доли ватта для маленьких двигателей и до 10–20 Вт для больших двигателей. Максимальный уровень рассеиваемой мощности ограничен нагревом двигателя. Максимальная рабочая температура обычно указывается производителем, но можно

приблизительно считать, что нормальной является температура корпуса 90°C. Поэтому при конструировании устройств с шаговыми двигателями, непрерывно работающими на максимальном токе, необходимо принимать меры, исключающие касание корпуса двигателя обслуживающим персоналом. В отдельных случаях возможно применение охлаждающего радиатора. Иногда это позволяет применить двигатель меньших размеров и добиться лучшего соотношения мощность/стоимость.

Для данного размера шагового двигателя место, занимаемое обмотками, ограничено. Поэтому очень важно сконструировать драйвер так, чтобы для заданных 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.

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, либо имеются две отдельные обмотки для каждой фазы. Направление магнитного поля меняется путем переключения полюсов 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 переполюсовки выводов обмоток. Для такой переполюсовки требуется полный Н-мост (рис. 19). Управление ключами в любом 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. Нужно отметить, что при раздельном управлении транзисторами Н-моста возможны ситуации, когда источник питания закорочен ключами. Поэтому логическая схема управления должна быть построена таким образом, чтобы исключить эту ситуацию даже в случае сбоя управляющего микроконтроллера.

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 ее отключении произойдет выброс напряжения. Этот выброс способен повредить ключи, в качестве которых используются биполярные или полевые транзисторы. Для ограничения выброса устанавливают специальные защитные цепочки. На схемах (рис. 18 и 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 четыре 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, у которых внутри уже имеются диоды, то достаточно только двух внешних диодов. В интегральных микросхемах, содержащих мощные выходные каскады с открытым коллектором, также часто имеются такие диоды. Кроме того, некоторые микросхемы, такие как ULN2003, ULN2803 и подобные, имеют внутри оба защитных диода для каждого транзистора. Нужно отметить, что в случае применения быстродействующих ключей требуются сравнимые по быстродействию диоды. В случае применения медленных диодов требуется их шунтирование небольшими конденсаторами.

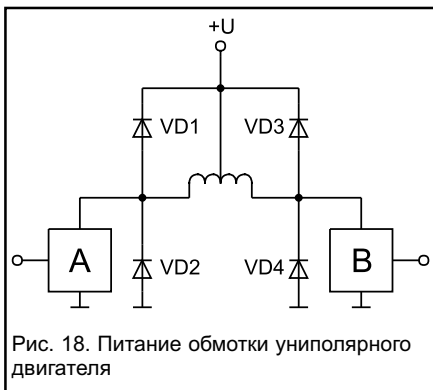


Рис. 18. Питание обмотки униполярного двигателя

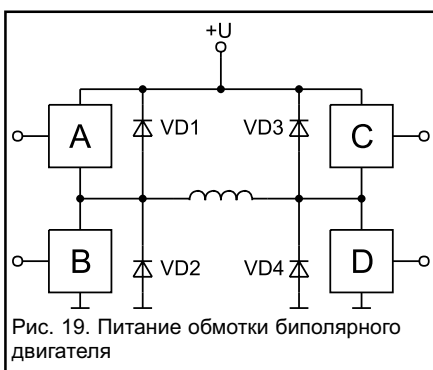


Рис. 19. Питание обмотки биполярного двигателя

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 необходимо 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 пять раз превышающее номинальное, то требуется 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 дополнитель-

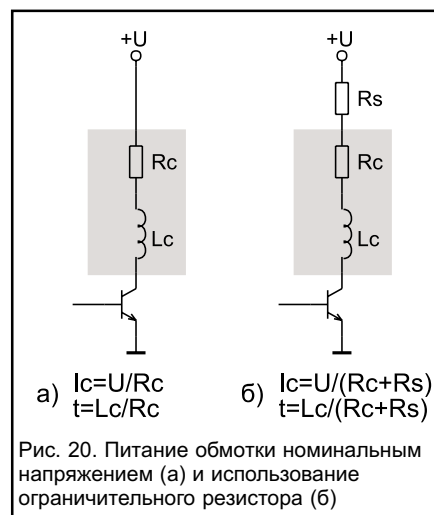


Рис. 20. Питание обмотки номинальным напряжением (а) и использование ограничительного резистора (б)

ная мощность. Большие габариты мощных резисторов, необходимость отвода тепла и повышенная необходимая мощность источника питания – все это делает такой метод неэффективным и ограничивает область его применения небольшими двигателями мощностью 1–2 Вт. Нужно сказать, что до начала 80-х годов прошлого века шаговые двигатели, использовали именно такой способ питания.

Еще более быстрое нарастание тока можно получить, если использовать для питания двигателя генератор тока. Нарастание тока будет происходить линейно, что позволит быстрее достигать номинального значения тока. Тем более, что пара мощных резисторов может стоить дороже, чем пара мощных транзисторов вместе с радиаторами. Но, 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 небольшую потерю мощности. Основано оно на применении двух источников питания. В начале каждого шага обмотки кратковременно 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 дешевым. 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

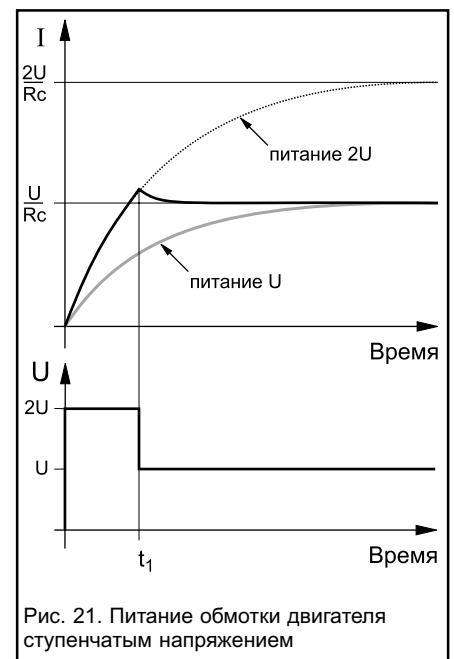


Рис. 21. Питание обмотки двигателя ступенчатым напряжением

оказаться выше номинального, что чревато перегревом 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 при простоте регулирования и очень низких потерях. 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 регулирования скважности импульсов, среднее напряжение и ток поддерживаются на номинальном для обмотки уровне в результате действия обратной связи. Последовательно с обмоткой включается резистор – датчик тока R (рис. 22, а). 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

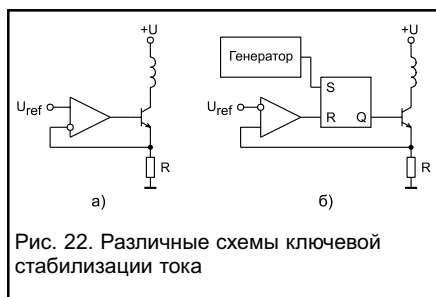


Рис. 22. Различные схемы ключевой стабилизации тока

порога, ключ снова включается. Этот процесс повторяется периодически, поддерживая среднее значение тока постоянным. Управляя величиной U_{ref} 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 стать причиной дополнительных помех.

От указанных недостатков свободна схема с постоянной частотой переключения (рис. 22, б). Ключевым транзистором управляет триггер, который 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 20 кГц, 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.

Подобная схема реализована внутри микросхемы L297 фирмы ST Microelectronics (SGS-Thomson), применение которой сводит к минимуму количество внешних компонентов. Ключевое регулирование реализовано и в других специализированных микросхемах.

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 регулировать величину тока.

Быстрый и медленный спад тока

На рис. 19 были показаны конфигурации ключей в Н-мосте для включе-

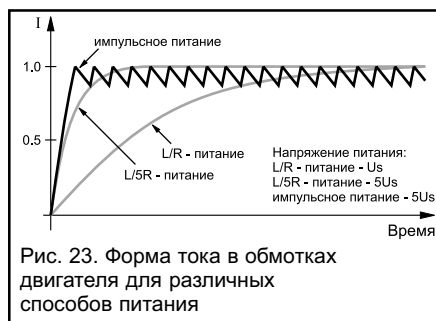


Рис. 23. Форма тока в обмотках двигателя для различных способов питания

ния разных направлений тока в обмотке. Для выключения тока можно выключить все ключи Н-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. При использовании транзисторов в качестве ключей необходимо применять шунтирующие диоды, чтобы обеспечить проводимость в обе стороны. Скорость изменения тока в индуктивности пропорциональна приложенному напряжению. Это справедливо как для на-

растания 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, при включенной обмотке. 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

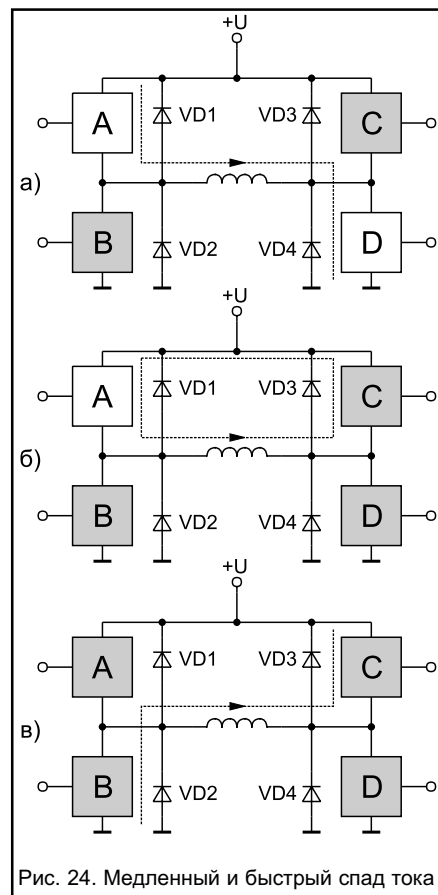


Рис. 24. Медленный и быстрый спад тока

пряжению, равное прямому падению напряжения 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 убывания магнитного поля. Следовательно, статор двигателя еще некоторое время 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 его нормальной работе. Быстрый спад тока при выключении является очень важным для высокоскоростных контроллеров, работающих в полшаговом режиме.

В случае, когда размыкаются все ключи Н-моста (рис 24, в), 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. Нужно сказать, 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 большой амплитуды. Поэтому транзисторы должны быть защищены специальными цепочками. Эти цепочки для обеспечения быстрого спада тока должны иметь довольно высокое напряжение ограничения. Чаще всего применяются диоды вместе со стабилитронами или варис-

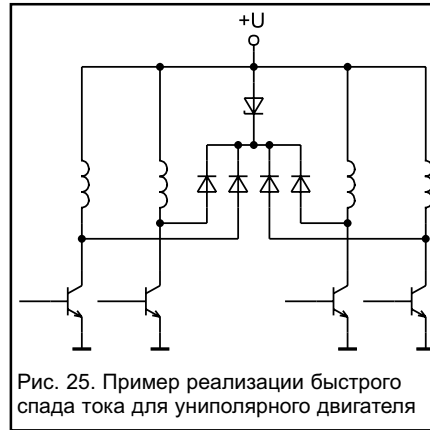


Рис. 25. Пример реализации быстрого спада тока для униполярного двигателя

торы. Один из способов схемотехнической реализации показан на рис. 25.

При ключевом регулировании величина пульсаций тока зависит от скорости его спада. Здесь возможны разные варианты. 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. 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 это не всегда является оптимальным. Во-первых, из-за отрицательной обратной ЭДС

ввиду малого напряжения на обмотке во время спада тока реальный средний ток обмотки может оказаться завышенным. Во-вторых, когда требуется резко уменьшить ток фазы (например, в полушаговом режиме), медленный спад не позволит сделать это быстро и, в-третьих, когда требуется установить очень низкое значение тока фазы, регулирование может нарушиться ввиду 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, а также больше величина потерь.

Наиболее совершенные микросхемы драйверов обеспечивают возможность регулировки скорости спада тока.

Полезные ссылки

1. <http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step>
2. <http://eio.com/jasstep.htm>
3. http://www.euclidres.com/apps/stepper_motor/stepper.html
4. http://www.ericsson.se/microe/apn_ind.html
5. <http://www.motionex.com/cmotor/engref.htm>

Леонид Ридико,
wubblick@yahoo.com

Продолжение следует