

(Окончание. Начало — № 6/2001)

Раз шажок, два шажок...

Диаграммы, диаграммы, а я маленький такой...

Существует несколько способов управления фазами шагового двигателя.

Первый способ обеспечивается попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 8, а). Этот способ называют "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.

Второй способ — управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. Его называют "two-phase-on full step" или просто "full step mode". При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рис. 8, 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 половину шага.

Третий способ, когда двигатель делает шаг в половину основного, является комбинацией первых двух и называется полушаговым режимом, "one and two-phase-on half step", или просто "half step mode". Этот метод управле-

ния достаточно распространен, так как двигатель с меньшим шагом стоит дороже, и очень заманчиво получить от 100-шагового двигателя 200 шагов на оборот. Каждый второй шаг запитана лишь одна фаза, а в остальных случаях запитаны две (рис. 8, в). В результате угловое перемещение ротора составляет половину угла шага для первых двух способов управления. Кроме уменьшения размера шага, этот способ управления позволяет частично избавиться от явления резонанса. Полушаговый режим обычно не позволяет получить полный момент, хотя наиболее совершенные драйверы реализуют модифицированный полушаговый режим, в котором двигатель обеспечивает практически полный момент, при этом рассеиваемая мощность не превышает номинальной.

Еще один способ управления называется микрошаговым режимом, или "micro stepping mode". При этом способе управления ток в фазах нужно менять небольшими шагами, обеспечивая таким образом дробление половинного шага на еще меньшие микрошаги. Когда одновременно включены две фазы, но их токи не равны, то положение равновесия ротора будет лежать не в середине шага, а в другом месте, определяемом соотношением токов фаз. Меняя это соотношение, можно обеспечить некоторое количество микрошагов внутри одного шага. Кроме увеличения разрешающей способности, микрошаговый режим имеет и другие преимущества, которые будут описаны ниже. Вместе с тем, для реализации микрошагового

режима требуются значительно более сложные драйверы, позволяющие задавать ток в обмотках с необходимой дискретностью. Полушаговый режим является частным случаем микрошагового режима, но он не требует формирования ступенчатого тока питания катушек, поэтому часто реализуется.

Держи его!

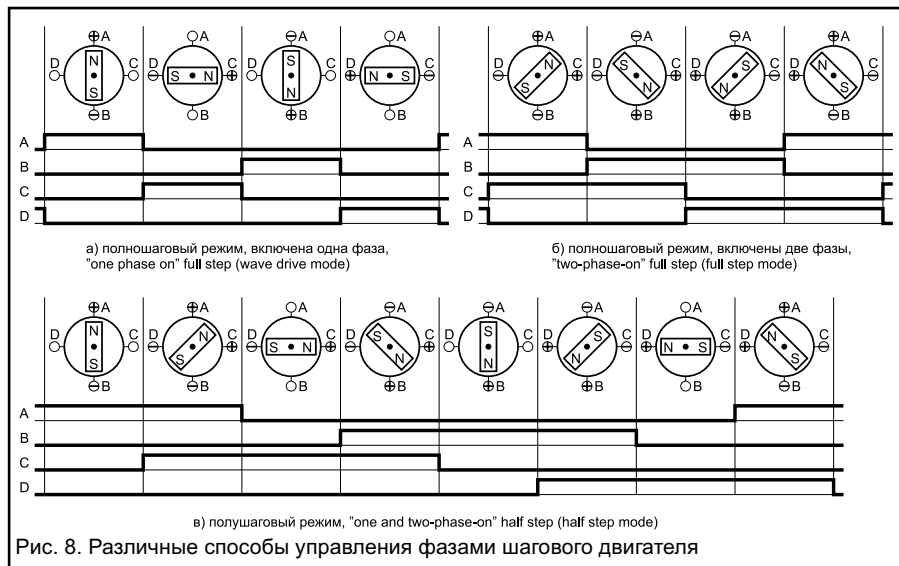
В полношаговом режиме с двумя включенными фазами положения точек равновесия ротора смещены на половину шага. Нужно отметить, что эти положения ротор принимается при работе двигателя, но они не могут сохраняться после выключения тока обмоток. Поэтому при включении и выключении питания двигателя ротор будет смещаться на половину шага. Для того чтобы он не смещался при остановке, необходимо подавать в обмотки ток удержания. Это справедливо и для полушагового и микрошагового режимов. Следует отметить, что если в выключенном состоянии ротор двигателя поворачивался, то при включении питания возможно смещение ротора и на большую, чем половина шага, величину.

Ток удержания может быть меньше номинального, так как от двигателя с неподвижным ротором обычно не требуется большого момента. Однако есть применения, когда в остановленном состоянии двигатель должен обеспечивать полный момент, что для шагового двигателя возможно. Это свойство шагового двигателя позволяет в таких ситуациях обходиться без механических тормозных систем. Поскольку современные драйверы позволяют регулировать ток питания обмоток двигателя, задание необходимого тока удержания обычно не представляет проблем. Задача обычно заключается в соответствующей программной поддержке для управляющего микроконтроллера.

Полушаговый режим

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

Для двигателя, у которого запитана одна обмотка, зависимость момента от угла поворота ротора относительно точки равновесия является приблизительно синусоидальной. Эта зависимость для двухобмоточного двигателя, который имеет N шагов на оборот (угол шага в радианах $S = (2\pi)/N$), показана на рис. 9. Реально характер зависимости может быть несколько другим, что объясняется неидеальностью геометрии ротора и статора. Пиковое значение момента называется моментом удержания. Формула, описывающая зависимость момента от угла поворота ротора, имеет следующий вид:



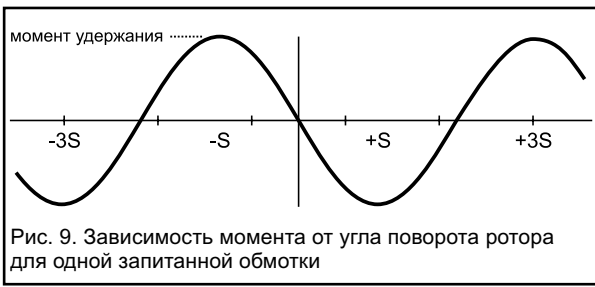


Рис. 9. Зависимость момента от угла поворота ротора для одной запитанной обмотки

$$T = -Th \cdot \sin((\pi/2)/S) \cdot \Phi,$$

где T – момент, Th – момент удержания, S – угол шага, Φ – угол поворота ротора.

Если к ротору приложить внешний момент, который превышает момент удержания, ротор повернется. 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 четыре шага на периоде кривой момента, равен ((π/2)/S)·Φ или (N·4)·Φ, 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). При этом, если токи в обмотках одинаковы, то точка максимума момента будет смещена на половину шага. На половину шага сместится и точка равновесия ротора (т. е. на



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

рис. 10). Этот факт и положен в основу реализации полушагового режима. Пиковое значение момента (момент удержания) при этом будет в $\sqrt{2}$ раз больше, чем при одной запитанной обмотке:

$$Th_2 = 2^{0.5} \cdot Th_1,$$

где Th₂ – момент удержания при двух запитанных обмотках, Th₁ – 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). Оси X и Y совпадают с направлениями 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 половину 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 полношаговым режимом, полушаговый режим имеет более высокую разрешающую способность без применения более дорогих двигателей. Кроме того, у двигателей, работающих в полушаговом режиме меньше 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 стать причиной повышенных вибраций и шума, хотя они все равно остаются меньшими, чем в полношаговом режиме.

Способом устранения колебаний момента может быть поднятие момента в положениях с одной включенной фазой и обеспечение таким образом одинакового момента во всех положениях ротора. Это достигается путем увеличения тока в этих положениях до уровня примерно 141% от номинального. Некоторые драйверы, такие как PBL 3717/2 и PBL 3770A фирмы Ericsson, имеют логические входы для изменения величины тока. Нужно отметить, что величина 141% является теоретической, поэтому в приложениях, требующих высокой точности поддержания момента, она должна быть подобрана экспериментально для конкретного двигателя и конкретной скорости. 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

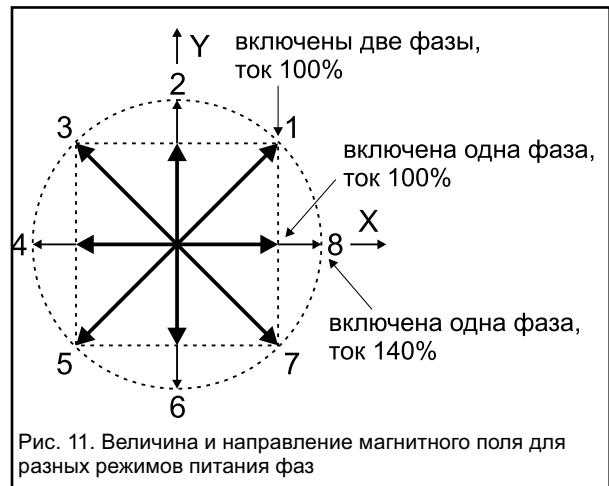


Рис. 11. Величина и направление магнитного поля для разных режимов питания фаз

снижать ток в те моменты, когда включены две фазы. Для получения постоянного момента этот ток должен составлять 70,7% от номинального. Таким образом реализует полушаговый режим, например, микросхема драйвера A3955 фирмы Allegro.

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. Если замкнуть в это время обмотку на источник питания, который представляет максимальное напряжение, имеющееся в системе, обеспечивается максимально быстрый спад тока. Для получения быстрого спада тока при питании обмоток двигателя H-мостом все транзисторы должны закрываться, при этом обмотка через

диоды оказываются подключенной к источнику питания. Скорость спада тока значительно уменьшится, если один транзистор моста оставить открытым и закоротить 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.

Микрошаговый режим

Микрошаговый режим обеспечивается путем получения поля статора, вращающегося более плавно, чем в полно- или полушаговом режиме. 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), результирующий момент будет равным

$$Th = (aI + bI)^{0,5},$$

а точка равновесия ротора сместится в точку

$$x = (S/(\pi/2)) \arctg(b/a),$$

где a и b – моменты, создаваемые первой и второй фазой соответственно, Th – результирующий момент удержания, x – положение равновесия ротора в радианах, S – угол шага в радианах.

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.

Еще раз нужно отметить, что приве-

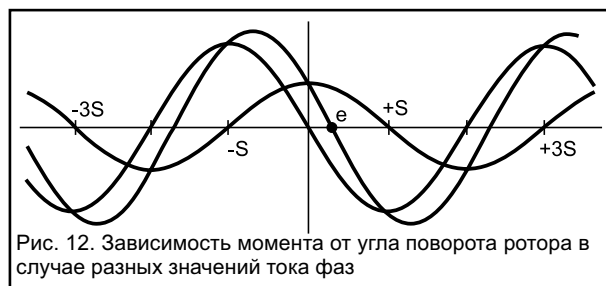


Рис. 12. Зависимость момента от угла поворота ротора в случае разных значений тока фаз

денные 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 превышающих собственную резонансную частоту 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. Некоторые микросхемы драйверов микрошагового режима имеют специальный сигнал, который информирует о таком положении ротора. Это, например, драйвер A3955 фирмы Allegro.

Во многих приложениях, где требуются малые относительные перемещения и высокая разрешающая способность, микрошаговый режим способен заменить механический редуктор. Часто простота системы является решающим фактором, даже если при этом придется применить двигатель больших габаритов. Несмотря на то что драйвер, обеспечивающий микрошаговый режим, намного сложнее обычного, все равно система может оказаться более простой и дешевой, чем шаговый двигатель плюс редуктор. Современные микроконтроллеры иногда имеют встроенные ЦАП, которые можно использовать для реализации микрошагового режима взамен специаль-

ных контроллеров. Это позволяет сделать практически одинаковой стоимость оборудования для полношагового и микрошагового режимов.

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. С этой целью сначала снимают характеристику для конкретного двигателя, а затем, изменяя соотношение токов в фазах, корректируют положение ротора индивидуально для каждого шага. Такой метод требует предварительной калибровки и дополнительных ресурсов управляющего микроконтроллера. Кроме того, нужен датчик начального положения ротора для синхронизации его положения с таблицей корректирующих коэффициентов.

На практике при осуществлении каждого шага ротор не сразу останавливается в новом положении равновесия, а осуществляет затухающие колебания вокруг положения равновесия. Время установления зависит от характеристик нагрузки и от схемы драйвера. Во многих приложениях такие колебания явля-

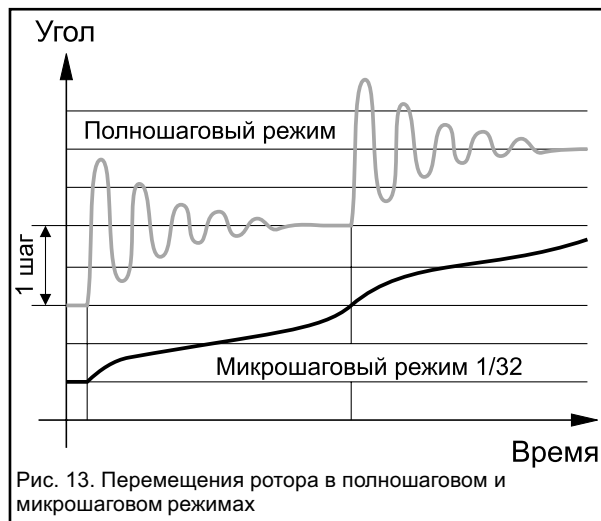


Рис. 13. Перемещения ротора в полношаговом и микрошаговом режимах

ются нежелательными. Избавиться от этого явления можно путем использования микрошагового режима. На рис. 13 показаны перемещения ротора при работе в полношаговом и микрошаговом режимах. Видно, что в полношаговом режиме наблюдаются выбросы и колебания, в то время как в микрошаговом режиме их нет. Однако и в микрошаговом режиме график положения ротора отличается от прямой линии. Эта погрешность объясняется неточностью геометрии деталей двигателя и может быть уменьшена проведением 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.

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

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

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 в пределах 10–20% вследствие искажений геометрии ротора и статора.

Если измерить положения равновесия ротора при вращении двигателя по часовой стрелке и против нее, 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 микрошагам. 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 для 7,2-градусного двигателя в микрошаговом режиме не уступает точности 1,8-градусного 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 1,8-градусного двигателя; вследствие действия момента трения или момента инерции нагрузки точность позиционирования будет хуже;
- если в системе есть трение, точность позиционирования будет ограничена вследствие появления мертвых зон;
- 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 однако двигатели, еще на этапе разработки оптимизированные для работы в микрошаговом режиме. Полюса ротора и статора таких двигателей менее выражены благодаря скошенной форме зубцов.

Еще один источник погрешности позиционирования – это ошибка квантования ЦАП, с помощью которого формируются токи фаз. Дело в том, что ток должен формироваться по синусоидальному закону, поэтому для минимизации погрешности линейный ЦАП должен иметь повышенную разрядность. Существуют специализированные драйверы со встроенным нелинейным ЦАПом, который позволяет сразу получать отсчеты функции \sin . Примером может служить драйвер A3955 фирмы Allegro, который имеет встроенный 3-разрядный ЦАП, обеспечивающий следующие значения тока фаз: 100%, 92,4%, 83,1%, 70,7%, 55,5%, 38,2%, 19,5%, 0%. Это позволяет работать в микрошаговом режиме с величиной шага 1/8, при этом погрешность установки тока фаз не превышает 2%. Кроме того, этот драйвер имеет возможность управлять скоростью спада тока обмоток двигателя во время работы, что позволяет произвести “тонкую подстройку” драйвера под конкретный двигатель для получения наименьшей погрешности позиционирования.

Даже если ЦАП точно сформировал синусоидальное опорное напряжение, его нужно усилить и превратить в сину-

соидальный ток обмоток. Многие драйверы имеют значительную нелинейность вблизи нулевого значения тока, что вызывает искажения формы и, как следствие, ошибки позиционирования. Если используются высококачественные драйверы, например RVМ3960 и PBL3771 фирмы Ericsson, погрешность, связанная с драйвером, ничтожно мала по сравнению с погрешностью двигателя.

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. В этом режиме возможно также уменьшение времени 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.

Синусоидальный ток фаз, как уже было сказано выше, обеспечивается применением специальных драйверов. Некоторые из них, например A3955, A3957 фирмы Allegro, уже содержит ЦАП и требует от микроконтроллера только цифровых кодов. Другие драйверы, такие как L6506, L298 фирмы SGS-Thomson, требуют внешних опорных напряжений синусоидальной формы, которые должен формировать микроконтроллер с помощью ЦАПов. Нужно сказать, что слишком большое количество дискретов синуса не приводит к повышению точности позиционирования, так как начинает доминировать ошибка, связанная с неидеальностью геометрии полюсов двигателя. Тем более, в этом случае отсчеты должны следовать с большой частотой, что является проблемой при их программном формировании. При работе на больших скоростях разрешающую способность ЦАПов можно уменьшить. Более того, при очень больших скоростях вообще рекомендуется работать в обычном полношаговом режиме, так как управление гармоническим сигналом теряет преимущества. Происходит это по той причине, что обмотки двигателя представляют собой индуктивность, соответственно любая конкретная схема драйвера с конкретным напряжением питания обеспечивает вполне определенную максимальную скорость нарастания тока. Поэтому при повышении частоты форма тока начинает отклоняться от синусоидальной и на очень больших частотах становится треугольной.