

Шаговые двигатели и особенности их применения

В статье рассматриваются типы шаговых двигателей, особенности их применения и схемы несложных устройств управления, позволяющие оценить возможности и освоить этот тип двигателей на практике. Статья написана на основании опыта автора по использованию шаговых двигателей в робототехнике [1, 2].

Владимир РЕНТЮК
Rvk.modul@gmail.com

Шаговые двигатели (stepper motors или stepping motors) — это одна из разновидностей бесщеточных (бесколлекторных) двигателей постоянного тока. Они применяются в периферийных устройствах компьютерной техники, приводах дисководов, робототехнике, промышленном оборудовании и т. п. Первый прообраз шагового двигателя с храповым механизмом был изобретен в середине XIX века. А основы современного шагового двигателя были заложены в конце XIX века, как это ни парадоксально, для его использования в телефонии. А именно для систем синхронной связи на постоянном токе.

Этот тип двигателей не нужно путать с многофазными бесколлекторными двигателями. Шаговые двигатели — совершенно иной тип двигателей постоянного тока. Их основное отличие в том, что при подаче на обмотки двигателя импульса напряжения поворот его ротора осуществляется на некоторый угол, или, как принято говорить, шаг, отсюда и название двигателя. Этот шаг определяется конструктивными особенностями двигателя и схемой его управления. В настоящее время используются двигатели с шагом в 15°, 7,5°, 1,8° и 0,9°. Наиболее широкое применение нашли двигатели с шагом 1,8° (200 шагов). Если мощность поданного импульса достаточна для сдвига ротора с подсоединенной к нему нагрузки, то в общем случае шаг сдвига ротора не зависит от величины тока обмоток, следовательно, он не зависит ни от амплитуды, ни от длительности импульса напряжения, поданного на обмотки такого двигателя. Но естественно, что момент силы, развиваемый двигателем, зависит не только от величины тока в обмотках, но и от длительности поданного на них импульса. Момент вращения ротора шагового двигателя, в отличие от остальных типов двигателей постоянного тока, максимален на минимальной скорости вращения. Эта особенность шагового двигателя во многих случаях избавляет конструктора от использования сложных и дорогостоящих редукторов.

Шаговый двигатель позволяет осуществлять позиционирование ротора с точностью до долей градуса, что абсолютно недостижимо для других типов двигателей. Скорость вращения шагового двигателя определяется только частотой следования импульсов управления. Имеются шаговые двигатели и с линейным перемещением ротора. В последнем случае ротор такого двигателя линейно сдвигается на определенный конструкцией двигателя шаг. Для устройств на основе шаговых двигателей, как правило, не требуется концевых выключателей или каких-то конечных сенсоров. Кроме того, ротор такого двигателя можно жестко зафиксировать в нужном положении без применения электромагнитных или механических тормозных и удерживающих систем, например электромагнитных муфт. Для этого необходимо в нужной позиции ротора сохранить некоторый остаточный ток в обмотках двигателя — так называемый ток удержания. Как правило, его выбирают в пределах от 0,25 до 0,5 полного тока управления. Этого вполне достаточно, чтобы ротор был зафиксирован в заданном положении. Естественно, он будет находиться в этом положении до тех пор, пока внешний приложенный момент не превысит некоторого значения, называемого моментом удержания ротора.

Шаговые двигатели в отличие от коллекторных не только точны в позиционировании, но и практически вечны. Эти свойства шаговых двигателей определили их сферу применения — устройства точного позиционирования (станки с точной подачей резца, например, гравировальные и фрезерные, управление манипуляторами в робототехнике, различные автоматы и т. п.). Особенность шагового двигателя позволяет использовать его и как датчик угла поворота. При этом подсчитываются импульсы ЭДС, генерируемые обмоткой двигателя при вращении его ротора внешней силой. Их также можно использовать в качестве генератора мощности, например в ветроэнергетических установках небольшой мощности. В этом случае

они работают эффективнее коллекторных генераторов. Автор статьи принимал непосредственное участие в таких исследовательских работах с компанией Tensionwheel LLC (США).

Существуют три основных типа шаговых двигателей:

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

В шаговом двигателе с переменным магнитным сопротивлением вращающий момент создается магнитными потоками статора и ротора, которые соответствующим образом ориентированы друг относительно друга. Статор такого двигателя изготовлен из материала с высокой магнитной проницаемостью и имеет несколько полюсов. Полюса имеют как статор, так и ротор. Этот тип двигателя не чувствителен к направлению тока в обмотках. Вращающий момент пропорционален величине магнитного поля, которая, в свою очередь, пропорциональна току в обмотке и количеству витков. Таким образом, момент, развиваемый двигателем, зависит только от параметров обмоток.

Двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты. Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагнитченности ротора в таких двигателях обеспечивается большой магнитный поток и, как следствие, большой момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением. При включении тока в одной из катушек ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает их максимальную скорость. Для работы на высокой скорости используются двигатели с переменным магнитным сопротивлением.

Гибридные двигатели дороже, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Ротор гибридного шагового двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении. Конструкция и внутреннее устройство типового гибридного шагового двигателя показаны на рис. 1 (полная версия — на сайте [14]). Типичное число зубцов гибридного двигателя — от 100 до 400 (угол шага — $3,6^\circ$ – $0,9^\circ$). Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большее количество эквивалентных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используется четыре основных полюса для $3,6^\circ$ и восемь основных полюсов — для $1,8^\circ$ или $0,9^\circ$. Большинство двигателей этого типа имеют 100 полюсов (50 пар), и с учетом двухфазного исполнения полное количество полюсов равно 200, а угол шага составляет $1,8^\circ$ ($360/200$) [3, 4, 16].

Кроме конструктивных особенностей, связанных с исполнением ротора, двигатели отличаются и исполнением обмоток статора. В зависимости от конфигурации обмоток двигатели делятся на униполярные и биполярные и имеют три варианта исполнения конфигурации обмоток (рис. 2). В униполярном двигателе (рис. 2а) включена одна обмотка в каждой фазе, с отводом от середины каждой обмотки. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, переключением ее половинок. При этом существенно упрощается схема драйвера: он представляет собой четыре простых ключа. Как правило, униполярный двигатель имеет шесть выводов, но средние выводы обмоток могут быть объединены внутри самого двигателя, поэтому такой двигатель может иметь и пять выводов.

Биполярный двигатель (рис. 2б) имеет две обмотки, которые включаются поочередно в каждой фазе. Для двигателя такого типа требуется более сложный драйвер мостового типа. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. Некоторые двигатели имеют четыре обмотки (рис. 2в), по этой причине их ошибочно называют 4-фазными двигателями. При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать и как униполярный, и как биполярный. Двигатель с вариантом исполнения обмоток, показанный на рис. 2в, можно использовать как с параллельным, так и с последовательным включением обмоток. Это позволяет увеличить момент, развиваемый двигателем при низком напряжении питания (параллельное включение обмоток), или уменьшить ток потребления при повышенном питающем напряжении (последовательное включение обмоток).

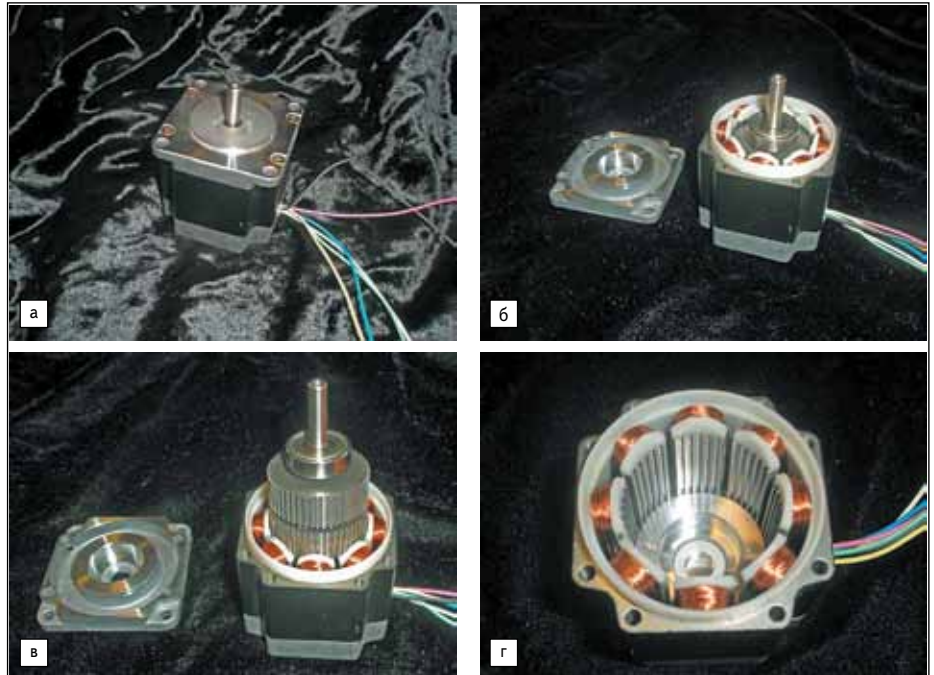


Рис. 1. Шаговый двигатель PK266-02A Oriental Motor U. S. A. Corp.

Нетрудно заметить, что при биполярном управлении момент, развиваемый двигателем, будет выше. В биполярном двигателе одновременно работают все обмотки, и выигрыш в моменте составляет примерно 40%.

Есть несколько вариантов управления шаговым двигателем. На рис. 3 [5] показана форма тока в обмотках двигателя относительно 0 А для четырех основных вариантов управления. Обратите внимание, что речь идет о токе, а не о напряжении. Напряжение на обмотках имеет прямоугольную форму. Наиболее простой вариант — это попеременная коммутация фаз, при этом они не перекрываются, и в каждый момент времени включена только одна фаза. Это волновой, или полношаговый режим управления с одной фазой (рис. 3а). Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с «естественными» точками равновесия ротора у обесточенного двигателя. Недостатком этого способа управления является то, что для биполярного двигателя в один и тот же момент времени используется только 50% обмоток, а для униполярного — только 25%. Это означает, что в таком режиме не может быть получен полный возможный момент двигателя.

Наиболее часто используется управление с перекрытием фаз, то есть в одно и то же время включены обе обмотки (рис. 3б). В общем случае именно его и называют полношаговым режимом управления. При этом способе ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора и обеспечивается примерно на 40% больший момент, чем при одной включенной фазе. Этот способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый, но положение точек равнове-

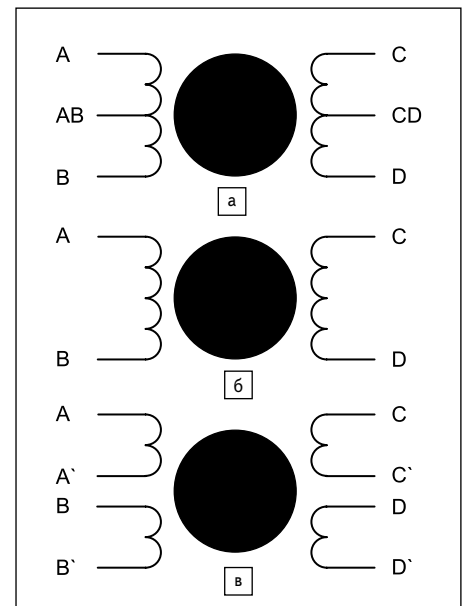


Рис. 2. Варианты исполнения обмоток шагового двигателя: а) униполярный; б) биполярный; в) четырехобмоточный

сия ротора смещено на полшага, что часто не является критическим. Но это необходимо учитывать, так как обесточенный двигатель, например с шагом $7,5^\circ$, после остановки сместится на $3,75^\circ$. Чтобы ротор такого двигателя не смещался при выключении, на двигатель в режиме остановки, как уже упоминалось выше, подают некоторый ток, который удержит ротор в заданном положении без смещения. Именно это позволяет обходиться без специальных электромагнитных или механических тормозных и удерживающих систем.

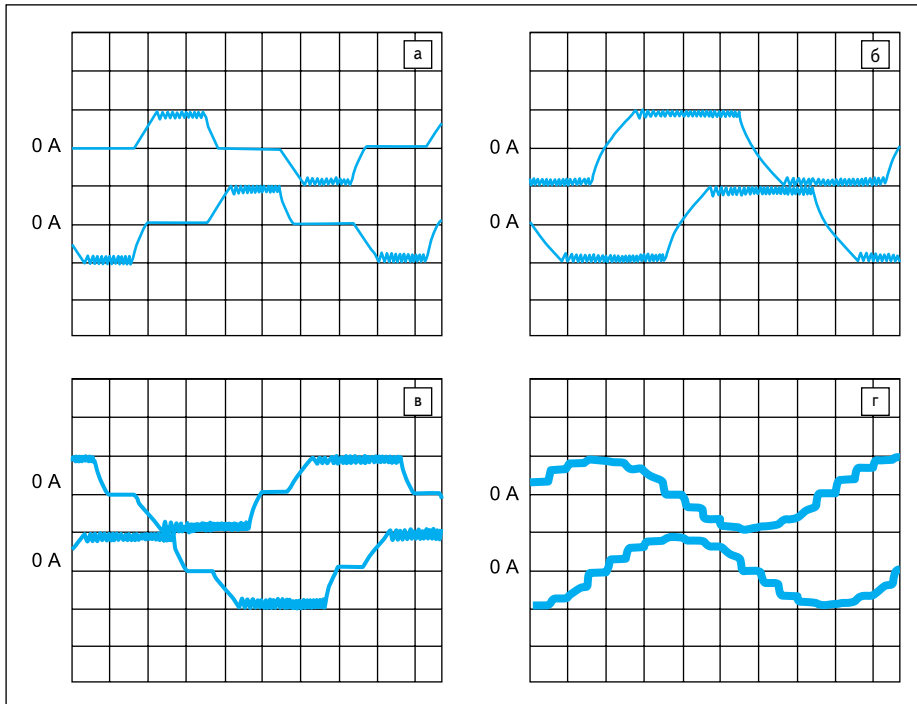


Рис. 3. Временные диаграммы изменения тока в обмотках биполярного шагового двигателя: а) волновой режим; б) полношаговый режим; в) полушаговый режим; г) микрошаговый режим

Третий основной способ управления является комбинацией двух описанных ранее: это полушаговый режим (рис. 3в). В этом режиме двигатель за один импульс управления делает шаг, равный половине основного. Этот режим требует более сложной реализации схемы управления, но позволяет осуществлять более точное позиционирование ротора и уменьшить негативное влияние механического резонанса ротора. Иными словами, используя двигатель с угловым шагом $1,8^\circ$, мы получаем шаг, равный $0,9^\circ$. Еще меньшую градацию, вернее, дробление шага, дают микрошаговые системы управления (рис. 3д), основанные на постепенном изменении тока в обмотках. Такие системы сложны. Они требуют применения специальных ИМС драйверов и микропроцессорного управления.

Необходимо помнить, что при любом варианте управления ток обмоток необходимо выбирать таким образом, чтобы не допустить превышения их максимальной рассеиваемой мощности. Максимальный допустимый ток обмоток или их сопротивление и рабочее напряжение всегда приводятся в спецификации на двигатель.

Управление изменением направления вращения шагового двигателя осуществляется просто. Для этого, в отличие от коллекторных двигателей постоянного тока, не требуются ни реле, ни дополнительные мостовые ключи. Реверсирование происходит при простом изменении очередности включения обмоток, которое легко реализуется в драйвере или программно в микропроцессоре. Единственное, что необходимо учитывать,

это особенности поведения ротора шагового двигателя, о которых будет сказано ниже. Посмотреть наглядно и в деталях процесс вращения ротора для шаговых двигателей с разными вариантами включения обмоток и в различных режимах можно на сайте [15]. Анимация на сайте позволяет увидеть работу униполярного и биполярного двигателя (с различной конфигурацией обмоток), полношаговый, полушаговый и микрошаговый режимы управления. Интерфейс сайта прост.

Какие еще трудности нужно учитывать при использовании шаговых двигателей? Во-первых, это явление механического резонанса, поскольку ротор не сразу устанавливается в новую позицию, а совершает затухающие колебания (являясь своеобразным маятником). При каждом шаге происходит толчок ротора, который, как и любая свободно подвешенная механическая система, начинает колебаться, и двигатель на некоторых частотах вращения теряет свой момент. Для подавления колебаний ротора используются либо механические методы (различного рода демпфирующие, притормаживающие муфты), либо демпфирование через закорачивание свободной обмотки (если таковая имеется). Функция торможения имеется и в некоторых типах драйверов. Однако наиболее эффективным является использование микрошагового режима управления. Системы управления с дроблением шага благодаря постепенному смещению ротора (основной шаг дробится на некоторую заданную системой управления величину, обычно $1/8$, $1/16$ или $1/32$) уменьшают механические колебания ротора, сводя их на нет (рис. 4).

Во-вторых, необходимо помнить, что обмотка двигателя представляет собой индуктивность. Следовательно, ток в обмотке не может измениться скачком, а меняется с некоторой скоростью (рис. 3). Таким образом, при повышении частоты коммутации обмоток момент ротора уменьшается, так как ток в обмотке не успевает достичь необходимого уровня за время действия управляющего импульса. Как выход из положения используется повышение напряжения питания двигателя с одновременным ограничением тока обмоток на приемлемом уровне. Такое ограничение осуществляется либо включением последовательно с обмоткой двигателя резистором (так называемое LR-управление), либо специальными мерами, при которых при достижении максимально допустимого тока в обмотке источник ее питания переводится в импульсный режим работы (именно этот вариант управления током представлен на рис. 3). Самым оптимальным вариантом по быстродействию является ключевая стабилизация тока. Такой метод управления реализован во многих специализированных ИМС драйверов, например LMD18245 [5].

В-третьих, имеет место ограничение по начальной стартовой скорости шагового двигателя. Иными словами, двигатель иногда необходимо разогнать до необходимой скорости. То есть может потребоваться плавное повышение скорости двигателя. В некоторых спецификациях для шаговых двигателей приводятся две важные для разработчика кривые, показывающие зависимость момента, развиваемого на валу двигателя, от скорости вращения (рис. 5) [13].

Внутренняя кривая (кривая старта) показывает, при каком для данной скорости максимальном внешнем тормозящем моменте шаговый двигатель способен тронуться без предварительного ускорения, то есть без разгона. Эта кривая пересекает ось скорости в точке, называемой максимальной частотой старта. На более низких скоростях шаговый двигатель еще может синхронизировать себя с частотой шага, преодолеть действие внешних сил и инерцию ротора. Необходимо заметить (а это часто умалчивается изгото-

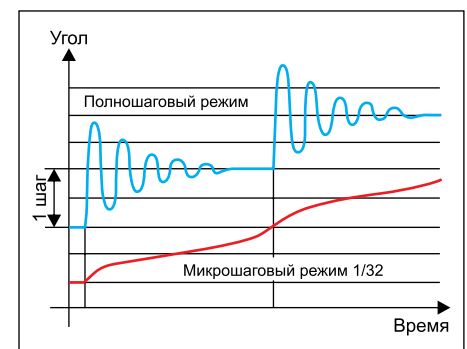


Рис. 4. Перемещения ротора в полношаговом и микрошаговом режимах

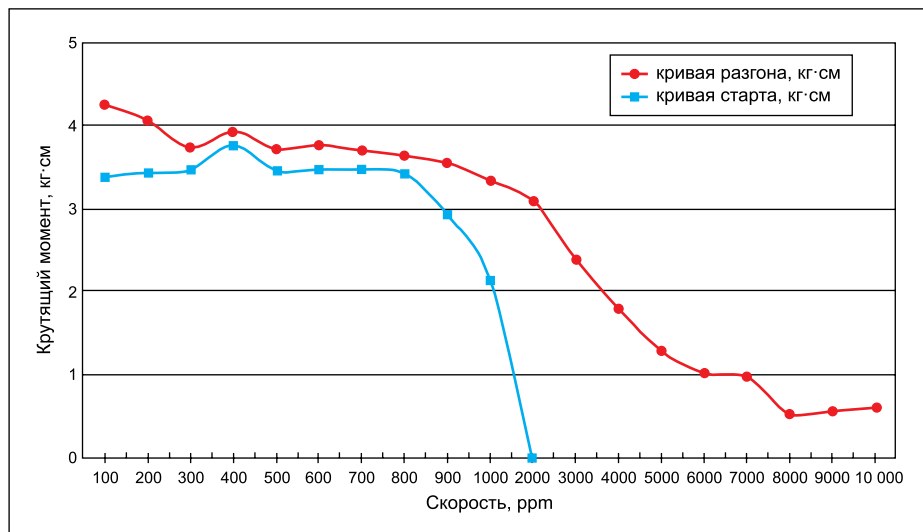


Рис. 5. Зависимость момента от скорости вращения ротора двигателя серии DSH56

вителями), что этот параметр задается для определенного режима работы и включения обмоток двигателя (в данном случае он задан для полшагового режима в униполярном включении двигателя), а нагрузка на двигателе при замере этого параметра является фрикционной, а не инерционной. То есть ротор двигателя искусственно заторможен, и трение во фрикционной муфте уменьшает нежелательные колебания ротора под воздействием импульса тока в обмотке двигателя, следовательно, скорость вращения двигателя будет выше. Режим управления для этого параметра также важен, поскольку в полшаговом режиме резонансные явления уже уменьшены. (Имеется еще и вариант полшагового режима управления с компенсацией момента [5].)

Внешняя кривая (кривая разгона) показывает, при каком максимальном моменте для данной скорости шаговый двигатель способен поддерживать вращение без пропуска шагов, но уже с учетом того, что произведен плавный разгон двигателя. Эта кривая показывает максимальную скорость для данного двигателя без нагрузки. Этот параметр зависит от тока в обмотках двигателя и способа управления обмотками. Обычно рекомендуют использовать «запас прочности» по этим параметрам от 50 до 100% по сравнению с необходимым вращающим моментом. Это необходимо учитывать для получения заданных характеристик.

Таким образом, повторим еще раз (поскольку это важно): может потребоваться разгон двигателя на малой скорости до необходимой рабочей скорости, а процесс остановки включает уменьшение скорости вращения двигателя до ее некоторого минимального значения и только потом полной остановки двигателя с переходом его в режим удержания. В противном случае гарантировать точность позиционирования ротора невозможно, а вследствие инерционности

системы может произойти даже разрушение редуктора, если он используется.

Косвенно оценить максимальную скорость вращения двигателя можно по индуктивности его обмоток. Чем выше индуктивность, тем «медленнее» двигатель. Еще одним относительным недостатком двигателей являются собственные акустические шумы: это связано с низкой частотой управления, здесь двигатель оказывается в роли динамического звукового излучателя. В компании, в которой работает автор статьи, именно по этой причине в одном из изделий пришлось отказаться от использования более мощного и быстрого двигателя.

Внешнее постоянное фрикционное торможение особенно необходимо, если требуется точное позиционирование ротора двигателя или исполнительного механизма в целом (особенно в случае использования

дополнительных понижающих редукторов). Для этого необходимо аккуратно подбирать фрикционные пары с учетом того, чтобы их свойства не менялись с течением времени вследствие загрязнения или истирания. Для двигателей относительно небольшой мощности (5–12 Вт), по опыту автора, такими парами для дисковых фрикционных тормозов могут быть фетровые или суконные вставки с трением по полиамиду (аналогичные использовались в лентопротяжных механизмах магнитофонов), но из-за малого коэффициента трения они получаются громоздкими. Можно использовать небольшие полиуретановые вставки с трением по полиамиду. Хороший эффект дают вставки из фторопласта или твердой кожи.

С большой осторожностью необходимо подходить к выбору фрикционных тормозов для деталей из мягких сплавов, например на основе алюминия. Для этого лучше использовать тонкие дополнительные накладные диски из твердых сплавов или пластмассы. Фрикционный тормоз для прецизионных систем обязательно должен иметь регулировку и пружинный компенсатор, который, собственно, и обеспечивает постоянное усилие торможения в процессе эксплуатации устройства. Пример одного из фрикционных тормозов, используемого компанией, в которой работает автор статьи, приведен на рис. 6.

Автор также испытывал притормаживающие системы на основе шаговых двигателей и двигателей постоянного тока. Торможение осуществлялось регулировкой тока в обмотках таких двигателей, но шаговые двигатели давали (в силу своих конструктивных особенностей) скачкообразное торможение, что для нашей конструкции было недопустимо, а для двигателей постоянного тока нужен был значительный компенсирующий ток. В ито-



Рис. 6. Пример выполнения фрикционного тормоза (с разрешения ООО «Модуль-98»)

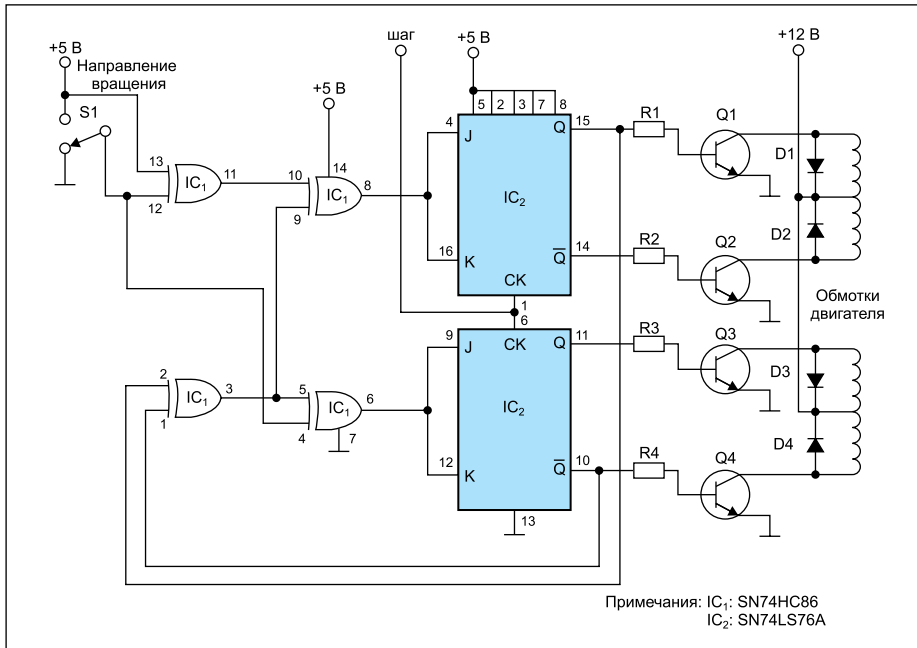


Рис. 7. Схема управления для униполярного шагового двигателя

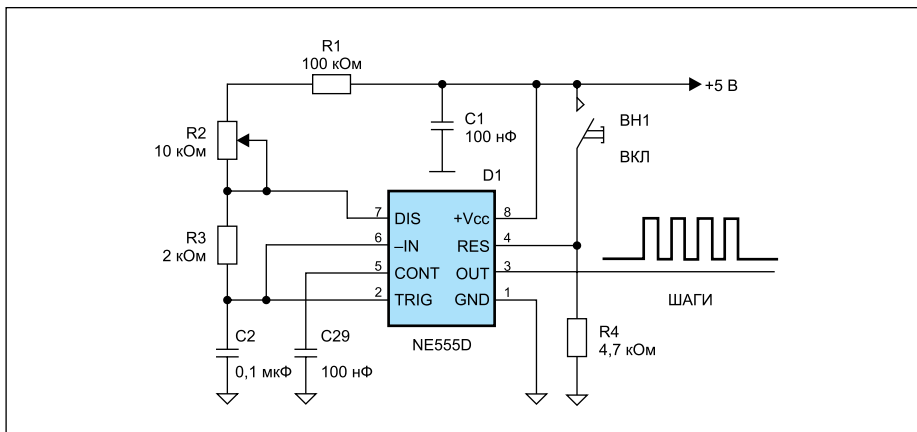


Рис. 8. Регулируемый генератор импульсов для схемы управления шаговым двигателем

(Direction). Режим удержания реализуется в этой схеме полной запиткой обмоток при остановке двигателя. Скорость вращения двигателя задается любым внешним генератором импульсов. Такой перестраиваемый по частоте генератор можно сделать, например, на ИМС таймера 555 (рис. 8).

В качестве драйвера для схемы на рис. 7 можно использовать любые транзисторы с коэффициентом усиления по току не ниже 100 при заданном токе коммутации. Ток определяется сопротивлением обмоток двигателя по постоянному току и его напряжением питания (+12 В на рис. 1). Но лучше использовать в качестве драйвера подходящие MOSFET, например IRF7470 ($V_{DS} = 40$ В, $R_{DS(on)max} = 13$ мОм, $I_D = 10$ А). Номинал резисторов R1–R4 должен быть не ниже 470 Ом. (В случае использования MOSFET эти резисторы необходимо оставить.) В качестве диодов D1–D4, гасящих обратный импульс напряжения, подойдут недорогие диоды 1N4007. При использовании MOSFET со встроенными диодами они не нужны.

Если реализуется упомянутый выше режим управления LR и вам необходимо ускорить нарастание тока в обмотках, то напряжение питания двигателя увеличивается, а в цепи запитки обмоток включаются резисторы из расчета $(n-1)R$, где n — это величина, кратная повышению напряжения двигателя от его номинального значения, а R — это значение сопротивления обмотки двигателя. Например, номинальное напряжение питания двигателя — 5 В, сопротивление обмотки — 5 Ом. Мы подаем на двигатель напряжение 15 В, тогда добавочные сопротивления будут по 10 Ом: $(15/5-1) \times 5$. Естественно, что необходимо выбрать резистор соответствующей мощности.

Удобный, простой и недорогой вариант схемы управления биполярным двигателем с напряжением до 36 В и током до 0,6 А, который автор статьи использовал во время первого этапа «освоения» шаговых двигателей, приведен на рис. 9 [9]. Схема пригодна в качестве недорогой тестовой платы и обеспечивает работу двигателя в оптимальном пошаговом режиме с перекрытием фаз. Автор использовал эту схему для управления двигателем малой мощности 20M020D2B 12 В/0,1 А.

Схема состоит из тактового генератора (D3-1 и D3-2), двунаправленного двухфазового формирователя на D-триггерах D2 (SN74HC74D), схемы выбора направления вращения (D3-3 и D3-4) и драйвера D1 (L293DD STMicroelectronics) [10]. Микросхема драйвера имеет встроенные гасящие (клапьерные) диоды и схему аварийного отключения (при перегреве), устанавливать ее необходимо с обеспечением теплоотвода — за счет проводников на печатной плате. На схему подается напряжение питания в зависимости от типа двигателя. Питание формирователя осуществляется от стабилизатора напряжения, который должен обеспечить питание +5 В на схему управления. Для этого исполь-

ге, поскольку для наших конструкций фрикционные тормоза не обеспечивали гарантированное, постоянное по величине усилие в течение длительной непрерывной работы устройства, мы отказались от использования фрикционных тормозов в пользу магнитных компаний Sterling Instrument. В этих тормозах [7] необходимое торможение осуществляется взаимодействием мощных дисковых постоянных магнитов. Необходимое усилие торможения устанавливается с помощью соответствующего редуктора и при изменении расстояния между магнитами (регулировка предусмотрена конструкцией устройства).

Как уже отмечалось выше, шаговые двигатели требуют особых, совершенно иных, чем коллекторные или многофазные двигатели, схем управления. Этот факт является основным камнем преткновения при первой попытке применения таких двигателей, особенно если по той или иной причине нет возможности использовать для этой цели ми-

кропроцессорные системы управления или желания покупать дорогостоящие отладочные платы. Однако насколько сложны такие схемы управления? И всегда ли необходимо применять в схемах управления шаговыми двигателями дорогие специализированные отладочные платы или микропроцессоры?

Рассмотрим три базовые схемы управления шаговыми двигателями, которые помогут в их освоении. На рис. 7 приведена простейшая схема управления для униполярных двигателей [8], которая наиболее широко предлагается в Интернете. Автор приводит ее исправленный вариант, так как в первоисточнике имеются ошибки в подключении IC₁. Как уже отмечалось, униполярный двигатель имеет отвод от середины обмотки, что значительно упрощает схему драйвера.

Схема не содержит дефицитных элементов и выполнена на двух ИМС 74-й серии. Направление вращения двигателя определяется положением переключателя S1

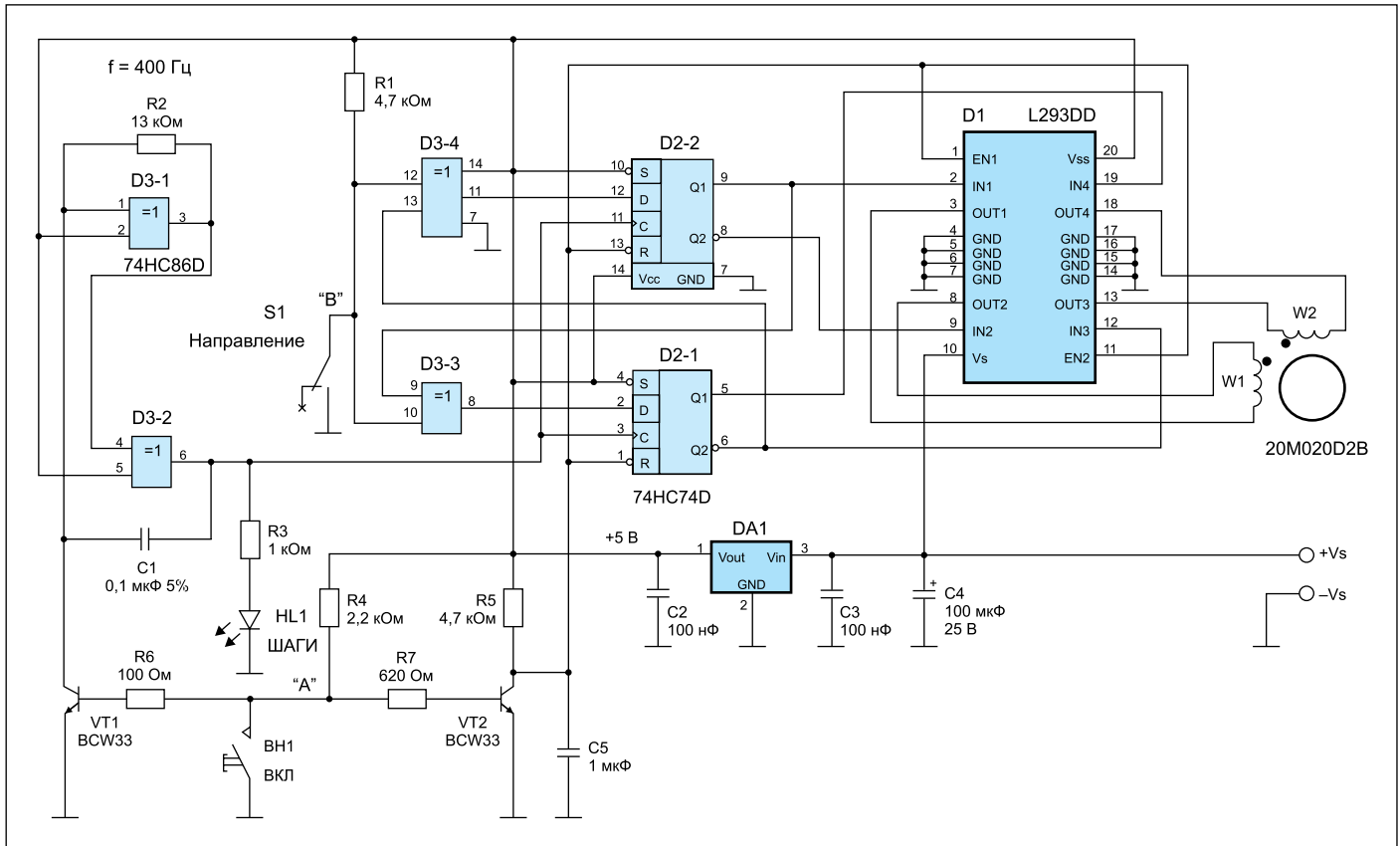


Рис. 9. Схема платы управления для маломощного биполярного шагового двигателя

зован линейный стабилизатор L7805ABD (корпус D2PAK), поскольку ток, потребляемый схемой управления, не превышает нескольких миллиампер, а рабочее напряжение выбранного типа двигателя — 12 В.

Включение шагового двигателя осуществляется кнопкой ВН1, или это может быть любой сигнал, например, от датчика или схемы с открытым коллектором. Цепь на транзисторе VT1 обеспечивает надежный запуск генератора. Такой принудительный пуск необходим, потому что генераторы, выполненные на основе двух (а не обычных трех) CMOS- или TTL-инверторов, иногда оказываются неустойчивы после включения (могут возбуждаться с частотой порядка 18 МГц). Команду на включение двигателя нужно подавать с некоторой задержкой после подачи питания. Рекомендуется давать задержку в несколько миллисекунд. Конденсатор С5 устраняет влияние «дребезга» контактов кнопки управления. Ротор двигателя будет вращаться в течение всего времени, пока нажата кнопка или подан сигнал низкого уровня в точку А. Во втором случае конденсатор С5 не нужен. Направление вращения зависит от положения выключателя S1. В указанном на схеме положении выключателя вращение осуществляется против часовой стрелки. Вместо выключателя можно также использовать любые подходящие сигналы, например от концевого выключателя, выключателя остановки с таймером, пусковым

механизмом или любыми цепями с открытым коллектором, подключенные в точку В вместо выключателя S1. Светодиод HL1 — это индикатор подачи импульсов вращения. Он светится в режиме вращения двигателя. Скорость вращения двигателя зависит от его технических характеристик (от угла шага)

и частоты тактового генератора. Временная диаграмма работы формирователя описываемой схемы управления показана на рис. 10.

Если используются двигатели с четырьмя обмотками, то допустимо устанавливать ИМС драйвера L293 в параллель по цепям управления. Каждый драйвер управляет своей

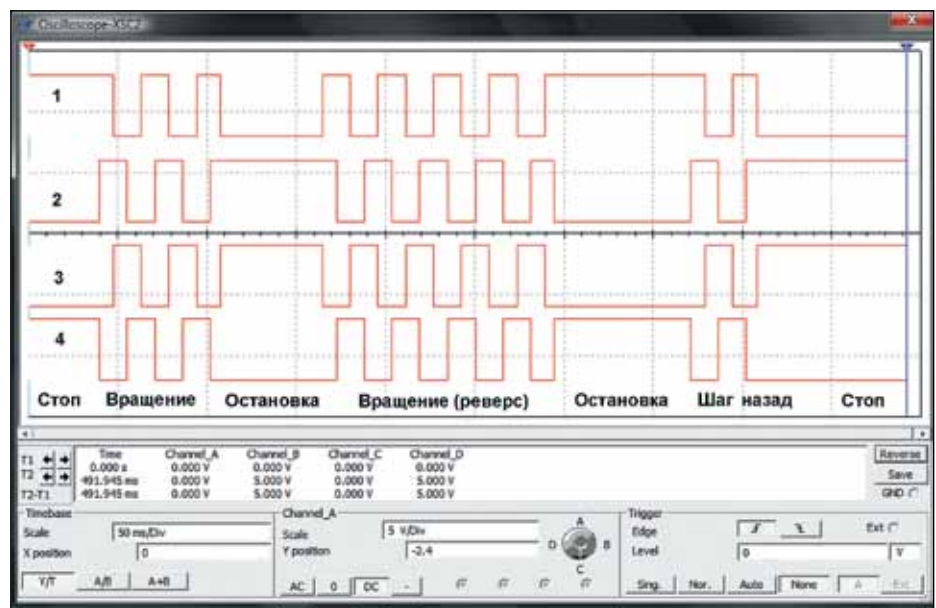


Рис. 10. Временная диаграмма работы схемы управления:

1 — выход Q1 D2-2 (вход IN1 D1); 2 — выход Q2 D2-1 (вход IN3 D1);
3 — выход Q2 D2-2 (вход IN2 D1); 4 — выход Q1 D2-1 (вход IN4 D1)

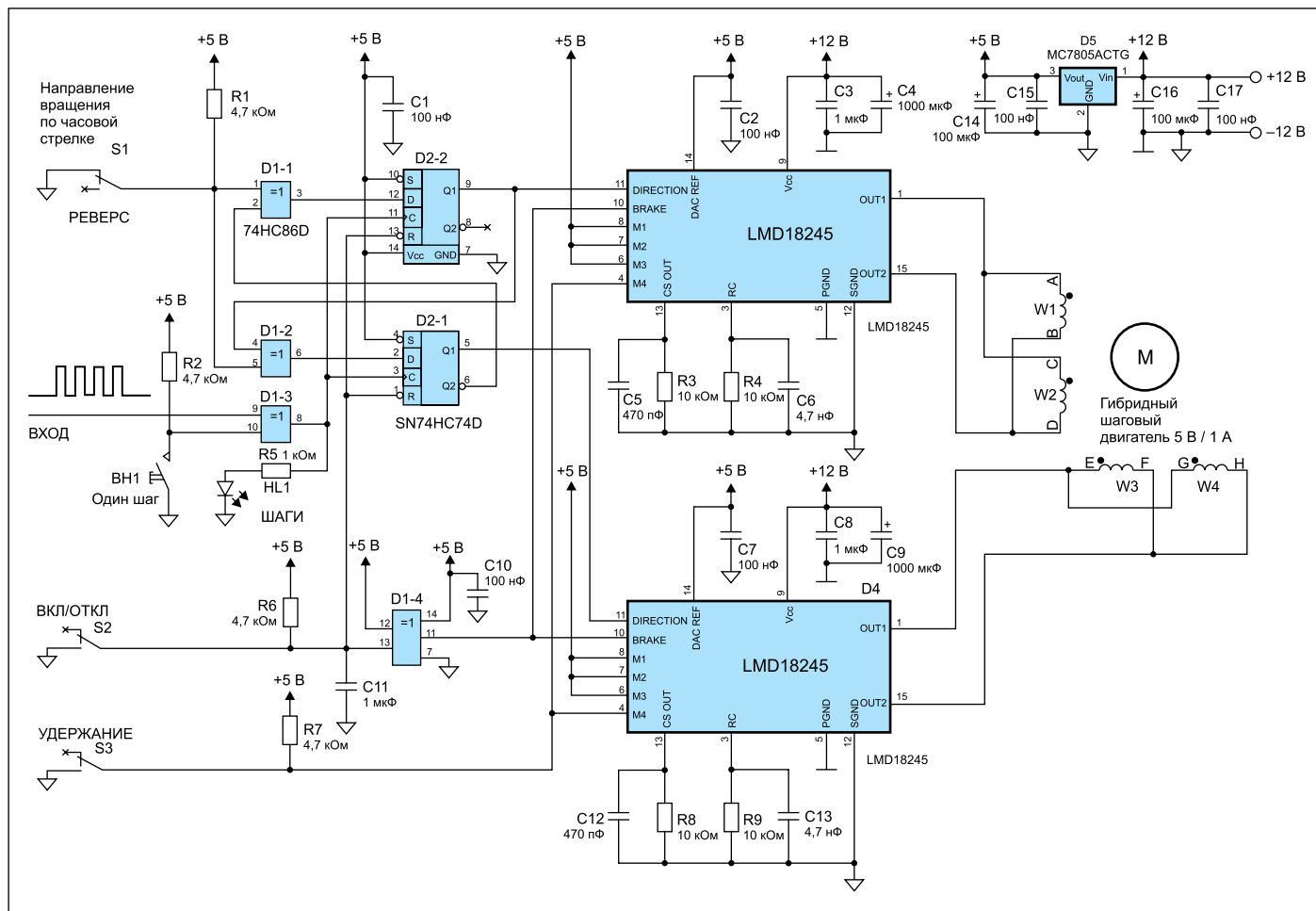


Рис. 11. Схема платы управления для мощного биполярного шагового двигателя

парой обмоток. В режиме удержания (режим, когда управляющие импульсы не подаются, но сам формирователь и драйвер не выключены) для уменьшения тока потребления и нагрева двигателя одну из ИМС можно выключить. Для этой цели используют входы EN (выводы 1, 11) ИМС одного из драйверов. Такой вариант применялся автором для более мощных гибридных шаговых двигателей серии V9728 12 В/0,6 А (RS-каталог 440–458).

Для двигателей с большим током, например для гибридного двигателя серии DSH56 5 В/1 А (аналогичный по RS-каталогу 440–442 [12]), особенно если они используются в режиме форсированного начального тока, необходимо использовать драйверы с ограничением максимального тока в обмотках. Для этих целей подойдет, например, ИМС драйвера типа LMD18245 (3 А, 55 В) [5] или аналогичный ему. ИМС драйвера типа LMD18245, в отличие от L293DD, является не четырех-, а двухканальным драйвером, поэтому для реализации схемы управления требуется две ИМС драйвера. Драйвер LMD18245 выполнен по DMOS-технологии, содержит схемы защиты от перегрева, короткого замыкания и выполнен в удобном 15-выводном корпусе ТО-220, что позволяет легко отводить от его корпуса излишнее тепло.

Схема тестовой платы на основе драйвера LMD18245, которая также использовалась автором статьи при отработке схемных решений, приведена на рис. 11. Схема оказалась настолько удачной, что впоследствии легла в основу всех серийных плат управления, при этом дискретная логика была заменена на микропроцессорное управление. В качестве задающего генератора тестовой платы использовалась схема генератора, приведенная ранее (рис. 8), но с увеличенным до 4,7 кОм номиналом резистора R2. Для подачи одиночных импульсов служит кнопка ВН1, позволяющая сдвинуть ротор двигателя на один шаг. Направление вращения ротора определяется положением переключателя S1. Включение и выключение двигателя осуществляется выключателем S2. В положении «Выкл.» ротор двигателя освобождается, и его вращение импульсами управления становится невозможным. В режиме удержания ток потребления обмотками двигателя уменьшается. Если импульсы управления не подаются, то ротор двигателя остается в зафиксированном положении с пониженным вдвое током потребления. Если же импульсы поступают, то вращение двигателя в этом режиме осуществляется с пониженным моментом вращения.

Необходимо заметить, что поскольку при полношаговом управлении с перекрытием фаз включены обе обмотки, то ток потребления двигателя от источника питания удваивается, а схему драйвера нужно рассчитывать исходя из требований обеспечения необходимого тока обмоток (устанавливается выбором номинала резисторов R3 и R8). Расчет максимального тока обмоток проводится по формуле, приведенной в [5]. Все управляющие кнопки могут быть заменены на транзисторные ключи или подключены к управляющим устройствам, имеющим выход типа «открытый коллектор».

Схема содержит аналогичный описанному ранее двунаправленный двухфазовый формирователь на D-триггерах ИМС D2 (SN74HC74D) и схему выбора направления вращения (D1-4 и D1-2). Максимальный ток драйвера задается резистором, включенным в цепь контакта 13 ИМС LMD18245 (резисторы R3 и R8), и двоичным кодом на контактах цепи управления током (выводы 8, 7, 6, 4). Формула для расчета максимального тока приведена в спецификации на драйвер [5]. Ограничение тока осуществляется импульсным методом. При достижении максимально заданной величины тока осуществляется его «нарезка». Параметры этой «нарезки» зада-

ются параллельной RC-цепочкой, подключенной к выводу 3 драйвера. Достоинством ИМС LMD18245 является то, что токозадающий резистор не включен непосредственно в цепь двигателя, имеет большой номинал и маленькую рассеиваемую мощность. Для рассматриваемой схемы максимальный ток в амперах согласно приведенной в [5] формуле потребления составляет:

$$I_{\max} = (V_{DACREF} \times D/16) / (250 \times 10^{-6} \times R_S) = (5 \times 16/16) / (250 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3) = 2 \text{ A},$$

где V_{DACREF} — опорное напряжение ЦАП (в рассматриваемой схеме — 5 В); D — действующие разряды ЦАП (в этом режиме используются все 16 разрядов: «лог. 1» подана на входы M1, M2, M3, M4); R_S — номинал токоограничивающего резистора ($R3 = R8 = 10 \text{ кОм}$).

Таким образом, ток каждой из включенных параллельно обмоток будет равен 1 А. Поскольку в режиме удержания на вход M4 подается уровень «лог. 0», то в этом режиме ток удержания составит 0,5 А на каждой обмотке двигателя.

В заключение необходимо отметить, что драйвер LMD18245 позволяет реализовать и микрошаговое управление — до 1/16 шага. Как упоминалось выше, такой режим уменьшает и даже подавляет паразитный резонанс ротора. Реализация такого режима для указанного драйвера осуществляется управлением по входам ЦАП (M1, M2, M3 и M4). ■

Литература

1. Рентюк В. Шаговые двигатели и особенности их применения // Электрик. 2012. № 11.
2. Рентюк В. Управление шаговым двигателем // Радиоаматор (Radioamator). 2010. № 10.
3. Емельянов А. В., Шилин А. Н. Шаговые двигатели: учеб. пособие. ВолГТУ. Волгоград, 2005.
4. Такаши К. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. LMD18245 3A, 55V DMOS Full-Bridge Motor Driver. National Semiconductor Corp.
6. TECO Electro Devices Co., Ltd DSH56 Series, Specification. www.tedmotors.com/DSH56.htm
7. Magnetic Clutches & Couplings. Sterling Instrument www.sdp-si.com/web/html/newprdrbrakes2.htm
8. McNamara N. Simple circuit controls stepper motors // EDN. Jan. 8, 2004.
9. Rentyuk V. Control stepper motors in both directions // EDN. March 18, 2010.
10. L293D, L293DD PUSH-PULL FOUR CHANNEL DRIVER WITH DIODES, STMicroelectronics. July, 2003.
11. LMD18245 3A, 55V DMOS Full-Bridge Motor Driver. National Semiconductor Corp.
12. <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1222/0900766b81222da4.pdf>
13. DHS 56 series TECO Electro Devices Co. Ltd. <http://pdf.directindustry.com/pdf/teco-electro-devices-co-ltd/stepping-motor-catalog/59236-180900-24.html>
14. www.ducttapeeng.com/smd/smd1.htm
15. <http://en.nanotec.com/support/tutorials/stepper-motor-and-blcd-motors-animation/>
16. www.steppmotor.ru