

Цифровое бессенсорное управление высокооборотными SR-двигателями

Павел ГРАСБЛУМ
(Pavel GRASBLUM),
к. т. н.

Для повышения эффективности работы различных устройств в последнее время активно развиваются прогрессивные типы приводов с регулируемыми скоростями вращения. Один из типов двигателей, применяющийся в таких приводах и дающий определенные выгоды при использовании цифрового управления, это вентильный индукторный реактивный двигатель (Switched Reluctance, SR).

Двигатель такого типа имеет преимущества как по цене, так и по надежности по сравнению с приводами с регулируемой скоростью других типов. Этот выигрыш, кроме всего прочего, объясняется более простым механическим устройством, высоким КПД и большей плотностью мощности. Недостатком SR-двигателей можно считать значительные пульсации вращающего момента, объясняемые особенностями конструкции, что ограничивает применение двигателей такого типа.

Важной положительной чертой SR-двигателей является значительная скорость работы (более 50 000 об/мин). Эта особенность позволяет снизить размеры двигателя без потери мощности, что в результате уменьшает размеры и вес проектируемого устройства. Типичный пример такого приложения — пылесос. Высокоскоростной SR-двигатель сделает пылесос меньше и легче. Дополнительный шум, вызываемый пульсациями вращающего момента, сравним с шумом от двигателей других типов.

SR-двигатель представляет собой вращающуюся электрическую машину, ротор и статор которой имеют выступающие полюса. Обмотка статора состоит из набора катушек, каждая из которых охватывает один полюс сердечника. Ротор набран из листов для минимизации потерь от вихревых токов. Разновидности SR-двигателей отличаются количеством фаз статора. Каждая характеризуется определенной комбинацией полюсов ротора и статора. На рис. 1 приведена конструкция 2-фазного SR-двигателя с конфигурацией полюсов 4/2 (статор/ротор) и ступенчатым зазором. Ступенчатый зазор призван исключить мертвые зоны, в которых вращающий момент симметричного SR-двигателя будет равен нулю, и, таким образом, обеспечить уверенный запуск двигателя в нужном направлении.

Двигатель возбуждается серией импульсов тока в каждой из фаз. Каждая из них возбуждается последовательно, вызывая вращение двигателя. Импульсы тока должны быть приложены к соответствующей фазе в соответствии с определенным положением ротора

относительно возбуждаемой фазы. Когда некоторая пара полюсов ротора находится точно «в линию» с определенной парой полюсов статора, говорится, что ротор «в выровненном положении», то есть в таком положении, в котором индуктивность обмотки статора максимальна (рис. 1). Если ось пары полюсов ротора совпадает с междуполюсной осью статора, говорится, что ротор «в невыровненном положении», то есть его положение обеспечивает минимальную индуктивность обмотки статора.

График временной зависимости индуктивности статора вращающегося SR-двигателя имеет треугольную форму, с максимальным значением индуктивности в выровненном положении ротора и с минимальным — в невыровненном. На рис. 2 представлена идеализированная треугольная зависимость индуктивности для обеих фаз двигателя. Фазы А и В сдвинуты на 180°. Угловой промежуток, в котором на фазу подано напряжение, называется углом включенного состояния ($\theta_{вс} - \theta_{дwell}$). Он ограничивается углом включения ($\theta_{он} - \theta_{вкл}$) и углом выключения ($\theta_{off} - \theta_{выкл}$).

При подаче напряжения на одну из фаз статора двигатель создает момент в направлении увеличения индуктивности обмотки. Если фаза включена в положении минимальной индуктивности, ротор поворачивается до тех пор, пока не встанет в положение, в котором индуктивность максимальна. Движение определяется характеристиками намагнитченности двигателя. Типичная зависимость тока через одну из фазовых обмоток при постоянном напряжении показана на рис. 2.

При постоянном напряжении на фазовой обмотке ток через нее достигает своего максимума в таком положении ротора, в котором

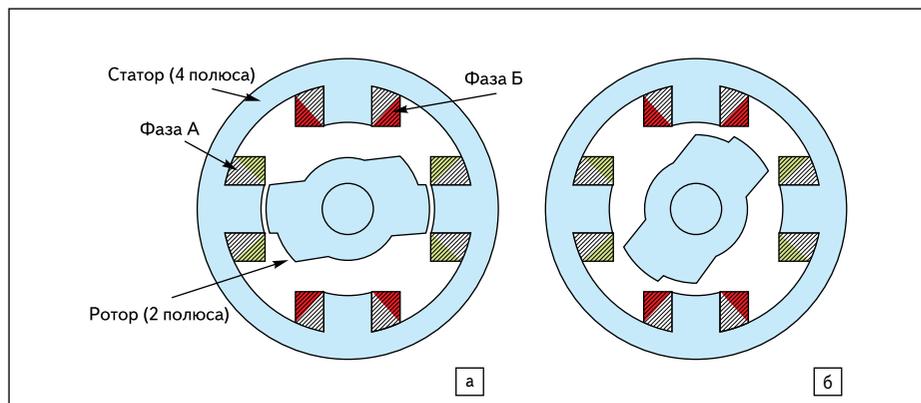


Рис. 1. Двухфазный 4/2 SR-двигатель: а) выровненное положение ротора; б) невыровненное положение ротора

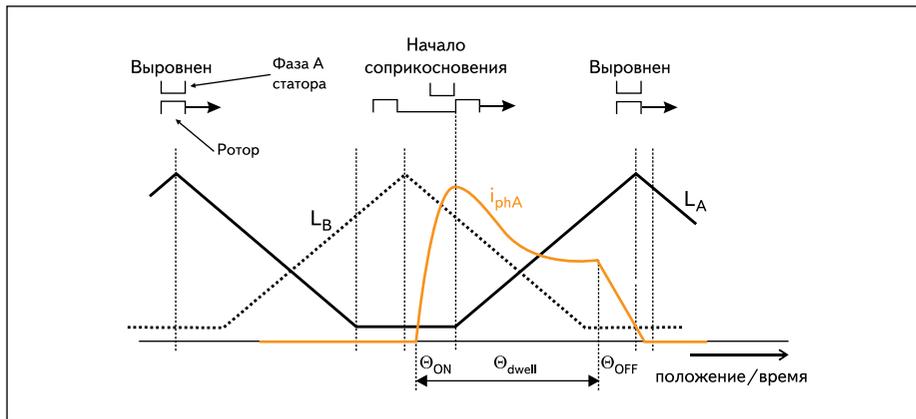


Рис. 2. Идеализированная картина индуктивности и токов фаз

индуктивность начинает расти. Этот момент соответствует взаимному расположению полюсов ротора и статора, при котором они начинают перекрываться. При выключении фазы ток через нее падает до нуля. Если ток через фазу существует в момент времени, когда индуктивность уменьшается, то, очевидно, возникает отрицательный момент силы. Таким образом, развиваемое двигателем усилие определяется приложенным к фазам напряжением и соответствующим выбором углов включения и выключения.

Для правильной коммутации фаз SR-двигатели требуют обратной связи по положению ротора. В общем случае такое требование выполняется различными датчиками положения, такими как энкодеры, датчики Холла и т. д. Однако введение механических датчиков ведет к удорожанию системы и снижению ее надежности. Обычно разработчики систем управления пытаются снизить стоимость изделия путем уменьшения количества датчиков. Для решения этой задачи был разработан ряд бессенсорных алгоритмов управления, большинство из которых основано на оценке потокосцепления. Общий смысл методов состоит в расчете реального потокосцепления для фазы и использовании отношения реального потокосцепления к некоторому справочному значению для оценки положения ротора. Основной недостаток всех этих методов состоит в том, что оценка потокосцепления основывается на точном знании сопротивления обмоток каждой фазы. Однако сопротивление обмоток изменяется в зависимости от температуры, что приводит к нежелательным интегральным ошибкам, особенно на малых скоростях. Интегральные ошибки создают значительные ошибки в оценке положения ротора.

Другой метод бессенсорной оценки положения ротора основан на определении пика тока обмотки соответствующей фазы. Принцип этого метода может быть понятен при анализе рис. 2. Фазовую обмотку начинают возбуждать в момент, соответствующий определенной амплитуде тока. Ток фазы растет до момента начала перекрытия полюсов статора и рото-

ра. В начале перекрытия ток фазы достигает максимума. Таким образом, в момент пикового тока мы точно знаем положение ротора. Обнаружив пик тока, можно точно засечь время его прохождения. Имея моменты времени прохождения двух последовательных пиков, можно точно рассчитать коммутационный период и моменты включения и выключения обмоток. Детектирование пиков тока может быть выполнено некоторой внешней схемой или, при наличии мощного сигнального контроллера, вычислено напрямую.

Преимуществом метода определения положения ротора по пикам тока является его независимость от параметров двигателя. Все, что нужно: это знать точное положение ротора в момент пика тока. Другое преимущество «пикового» метода — простота алгоритма по сравнению с методом оценки потокосцепления. «Пиковый» способ может быть использован на больших скоростях, тогда как для метода, основанного на потокосцеплении, снижение количества выборок значения тока при увеличении скорости ведет к снижению точности. В силу самого принципа, «пиковый» способ может быть использован только в системах управления обмотками при помощи напряжения, так как при токовом управлении обмотками информация о пиках тока пропадает.

Несмотря на простоту бессенсорных методов управления, при полностью цифровой реализации без использования внешних компонентов все же требуются довольно мощные микроконтроллеры (МК). Такие микроконтроллеры должны производить высокочастотную оцифровку значений тока и вычисление пиковых значений тока. Например, для 2-фазного SR-двигателя на скорости 60 000 об/мин время коммутации составляет всего 250 мкс. Для достижения соответствующей точности определения пиковых значений тока необходимо проводить выборку значений тока, по крайней мере, каждые 5 мкс.

Хорошим выбором для подобных приложений является цифровой сигнальный контроллер (DSC) MC56F8006. Эта модель относится к семейству контроллеров, основанных

на ядре 56800E, сочетающих в одном корпусе вычислительную мощность цифровых сигнальных процессоров (DSP) и функциональность микроконтроллеров, обладающих гибким набором периферийных функций, что позволяет создавать чрезвычайно низкозатратные решения. Такие гибридные контроллеры предлагают пользователю большое число сложных периферийных устройств, таких как модуль ШИМ, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), таймеры, коммуникационную периферию (шины SCL, SPI, I²C) и внутреннюю Flash- и RAM-память.

На рис. 3 продемонстрирована цифровая реализация алгоритма детектирования токовых пиков на примере системы бессенсорного управления SR-двигателем пылесоса. Система соответствует следующей спецификации:

- Бессенсорное управление 2-фазным SR-двигателем на основе детектирования токовых пиков.
- Прямое измерение тока при помощи интегрированного АЦП.
- Программное вычисление токового пика.
- Разработан для работы в приводе пылесоса.
- Протестирован с 2-фазным SR-двигателем, рассчитанным на частоту вращения 60 000 об/мин.
- Вращение только в одном направлении по причине асимметричной конструкции 2-фазного SR-двигателя. Контроль скорости вращения.
- Запуск из любой позиции с использованием выравнивания ротора и запатентованного алгоритма (патент № US6448736 B1).
- Время запуска и максимальная скорость зависят от параметров двигателя.

На рис. 3 приведена блок-схема системы управления, включающая 2-фазную высоковольтную часть, 2-фазный SR-двигатель и плату контроллера MC56F8006, реализующую алгоритм управления. В ответ на действия пользователя и сигнал обратной связи система управления генерирует ШИМ-сигнал для высоковольтной части, напряжение, сгенерированное DC/AC-преобразователем, прикладывается к SR-двигателю.

Состояние системы в целом контролируется цифровым автоматом, выполненным в цепи обратной связи. Набор состояний автомата состоит из инициализации, остановки, выравнивания ротора, запуска, работы двигателя и ошибки.

Состояние интерфейса пользователя периферийно сканируется вместе с напряжением шины постоянного тока и током возбуждаемой фазы. Двигатель запускается по команде от переключателя старт/стоп. В первую очередь ротор выравнивается в известное положение. После того как ротор стабилизирован, алгоритм запуска возбуждает фазы, заставляя двигатель вращаться. При разгоне положение ротора вычисляется специальным алгоритмом, но как только двигатель достигает по-

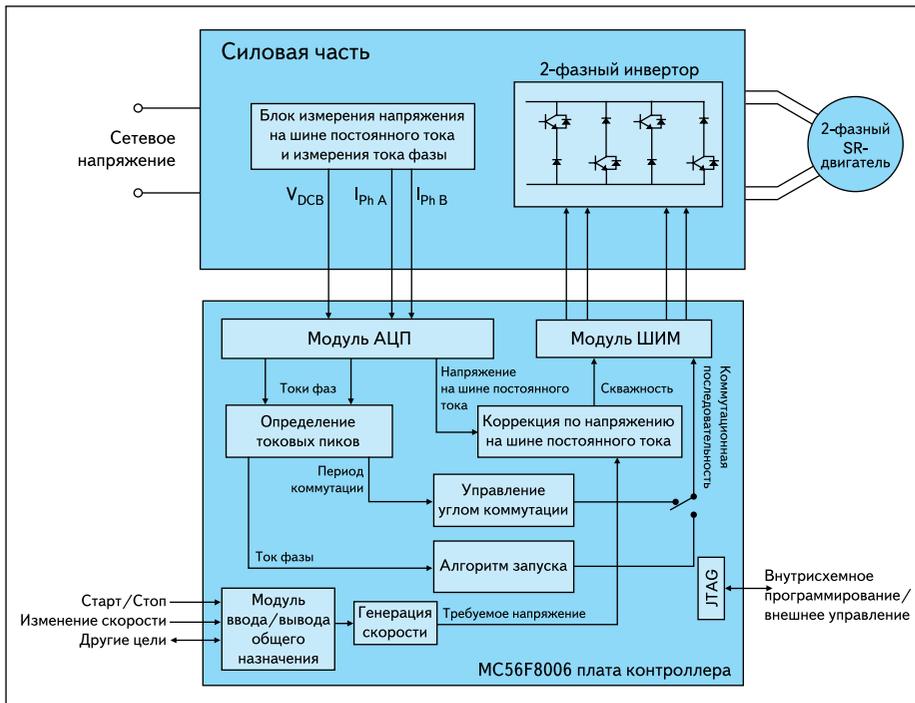


Рис. 3. Блок-схема системы

стоянной скорости, положение ротора начинает вычисляться по пикам тока фазы. После окончания цикла запуска обороты двигателя поднимаются до максимума.

Напряжение на шине постоянного тока и ток фазы оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя. Ток фазы определяется как падение напряжения на шунтирующем резисторе. Шунтирующие резисторы включаются последовательно с эмиттерами нижних IGBT-транзисторов. В случае, когда импульс ШИМ слишком короток, ток измеряется при прохождении через нижний транзистор моста и антипараллельный диод

моста. В других случаях ток измеряется только тогда, когда и нижний, и верхний транзисторы моста открыты. Таким образом, измерение тока должно быть синхронизировано с импульсами ШИМ. Этого можно добиться синхронизацией модулей ШИМ и АЦП на контроллере MC56F8006. Синхронизация выполняется нулевым каналом двойного таймера, соединенным с входом синхронизации АЦП, вход этого канала соединяется с сигналом перезапуска модуля ШИМ. Это позволяет контролировать задержку между перезапуском модуля ШИМ и запуском аналого-цифрового преобразования.

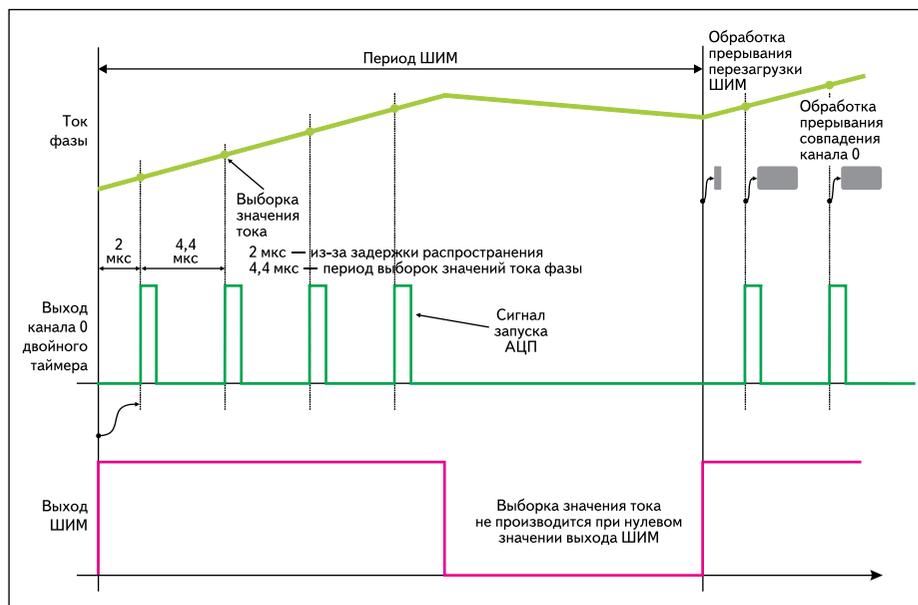


Рис. 4. Оцифровка тока фазы

Для достижения надлежащего временного разрешения пиков тока значения тока считываются несколько раз за период ШИМ. Реализация такого подхода показана на рис. 4. Количество выборок АЦП, производимое за период ШИМ, рассчитывается в начале каждого цикла ШИМ, в соответствии с действительной скважностью ШИМ.

Первая аналого-цифровая выборка берется через 2 мкс после перезапуска ШИМ. После окончания времени задержки стартует аналого-цифровое преобразование и вызывается быстрое прерывание (ISR двойного таймера, канал 0). Пока выполняется преобразование, таймер вновь устанавливается для задержки 4,4 мкс, когда производится очередная выборка тока. Первая задержка 2 мкс необходима в силу наличия задержки включения транзистора, вызываемой драйвером и самим транзистором. Задержка между выборками составляет 4,4 мкс. Так как на максимальной скорости заполнения ШИМ составляет 100%, ток измеряется постоянно каждые 4,4 мкс. Этот метод позволяет определять пики с точностью, лучшей 2%. Выборки тока начинаются вместе с началом коммутации фазы и останавливаются при нахождении пика. Вместе со значением тока засекается момент пика, используемый для дальнейшего расчета моментов коммутации. Временные расчеты проводятся на основе использования первого канала двойного таймера, который используется в режиме постоянного счета.

Напряжение на шине постоянного тока измеряется одновременно с током фазы, так как контроллер 56F8006 способен проводить две выборки одновременно. Значение напряжения на шине постоянного тока необходимо для компенсации пульсаций при использовании небольших сглаживающих конденсаторов.

Значения тока применяются для работы алгоритма, вычисляющего положение токовых пиков. Сразу же по обнаружению из значений моментов прихода последнего и предыдущих пиков вычисляется действующее значение коммутационного периода и моменты включения/выключения. Рассчитанные моменты включения/выключения загружаются в регистры сравнения первого канала таймера. События совпадения определяют коммутацию фазы.

В случае перегрузки по току сигналы управления инвертором запрещаются, и отображается состояние ошибки.

Бессенсорный алгоритм не позволяет определять положение ротора при нулевой скорости. Таким образом, чтобы запустить двигатель, необходимо разрешить две проблемы:

- Первоначальное положение ротора неизвестно.
- Моменты коммутации вычисляются из действующего в данный момент значения периода, которое на старте равно нулю.

Первая проблема легко разрешима при помощи выравнивания ротора. При выравнивании одна из фаз на некоторое время возбуждается,

и ротор поворачивается в выровненное положение. Время выравнивания зависит от инерции двигателя и может достигать нескольких секунд для больших двигателей. После того как ротор выровнен, двигатель готов к запуску. Ротор начинает вращение при возбуждении следующей фазы. Асимметричная конструкция двигателя обеспечивает нужное направление вращения. В момент начала движения скорость ротора неизвестна, и определение положения токового пика недостаточно для расчета данных для следующего коммутационного периода. Для решения этой проблемы были разработаны различные алгоритмы, обеспечивающие нормальный старт.

Алгоритм запуска состоит из двух частей (рис. 5). Первая часть аналогична действию при нормально работающем двигателе: алгоритм определяет пик фазового тока. Если ротор движется из состояния «соприкосновения» в выровненное состояние, ток фазы падает. Как только ротор проходит выровненное состояние, ток фазы вновь начинает расти, в этот момент напряжение с фазы должно быть снято. Иными словами, как только обнаружен пик тока фазы, алгоритм начинает отслеживать появление минимума тока фазы. Как только минимум обнаружен, фаза немедленно выключается и коммутируется следующая. После того как стартовый алгоритм

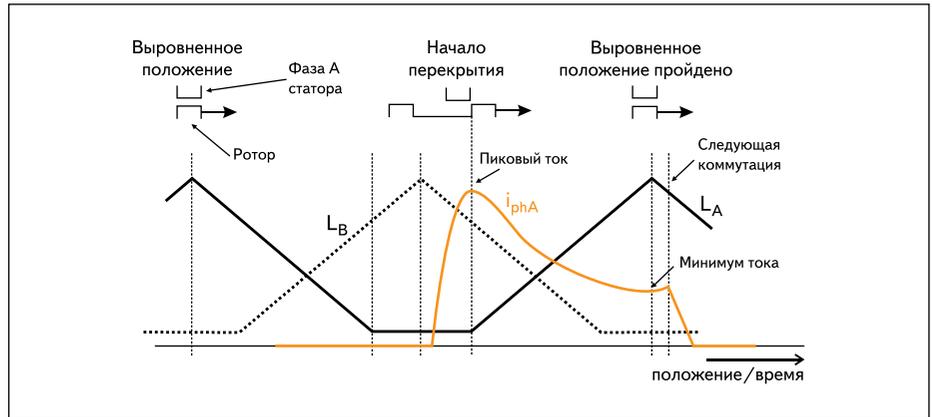


Рис. 5. Алгоритм запуска

отработает от четырех до восьми коммутационных периодов, вращение ротора стабилизируется, и может быть рассчитан коммутационный период. При известном коммутационном периоде программа переходит к работе по токовым пикам.

Преимуществом описанного стартового алгоритма является его независимость от параметров двигателя и нагрузки, что обеспечивает надежный запуск двигателя в различных условиях. Алгоритм запатентован компанией Freescale (патент № US6448736 B1).

Программное обеспечение контроллера выполнено на языке Си, за исключением блока измерения тока, вычисления пиков и обработки прерываний при коммутации фаз. Так как эти части программы критичны по времени работы, они выполнены на ассемблере. Полное описание системы, включающее описание «железа» и программного обеспечения, можно найти на сайте компании Freescale как справочную разработку DRM100. Она основана на цифровом сигнальном контроллере MC56F8013. ■