

Виктор Чистяков (г. Малоярославец)

ДРАЙВЕРЫ ОТ TI: УПРАВЛЯЙ ЛЮБЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ



В ассортименте полупроводниковых компонентов производства компании **Texas Instruments** широко представлены микросхемы драйверов для управления всеми типами **электродвигателей**, которые, совершенствуясь, находят все более широкое применение в самом различном оборудовании. Компания предлагает решения для создания приводов, работающих в широком диапазоне токов и напряжений, обеспечивающих надежную и удобную эксплуатацию **коллекторных, бесколлекторных и шаговых двигателей** с полным комплексом защит по току, напряжению и температуре.

Электродвигатели находят широчайшее применение в современном высокотехнологическом укладе жизни. Этот тип электромеханического привода по-прежнему является одним из наиболее распространенных и востребованных. Электродвигатели самого разного назначения являются одной из основных составляющих любого производства, повсеместно используются в офисной и домашней технике, в системах мониторинга и управления зданий и объектов. Очень широкое распространение электродвигатели нашли на современном транспорте. Еще более впечатляющее будущее уготовано электродвигателям в электромобилях и роботах.

С развитием технологий традиционные двигатели совершенствуются и находят все новые области применения. Современные высокоточные станки и робототехника немыслимы без электродвигателей с интеллектуальными системами управления. На земле, в воздухе и под водой электродвигатели остаются широко востребованным преобразователем электрической энергии в механическую.

Типы электродвигателей, способы управления и возникающие сложности

Впервые созданный в 1834 году русским ученым Якоби преобразователь электрической энергии во вращательное движение получил название электродвигатель. С тех пор он был серьезно усовершенствован — появилось множество новых вариантов, но использованные при его создании принципы электромагнетизма по-прежнему являются основой всех модификаций современных электродвигателей.

Проводник с проходящим по нему током (рисунок 1) создает вокруг себя магнитное поле, интенсивность (магнитная индукция) которого пропорциональна количеству витков, в случае использования катушки (N), и величине

проходящего по ней тока (I), где, B — вектор магнитной индукции, K — магнитная постоянная, N — число витков, I — сила тока.

Изменение направления тока влияет и на направление магнитного поля проводника.

При этом на помещенный во внешнее магнитное поле проводник с током действует сила Лоренца, вызывающая его вращательное перемещение. Направление вращения легко определяется с помощью известного правила правой руки для проводника с током в магнитном поле (рисунок 2). Сила (F), действующая на проводник в магнитном поле, равна произведению силы тока (I) в проводнике на вектор магнитной ин-

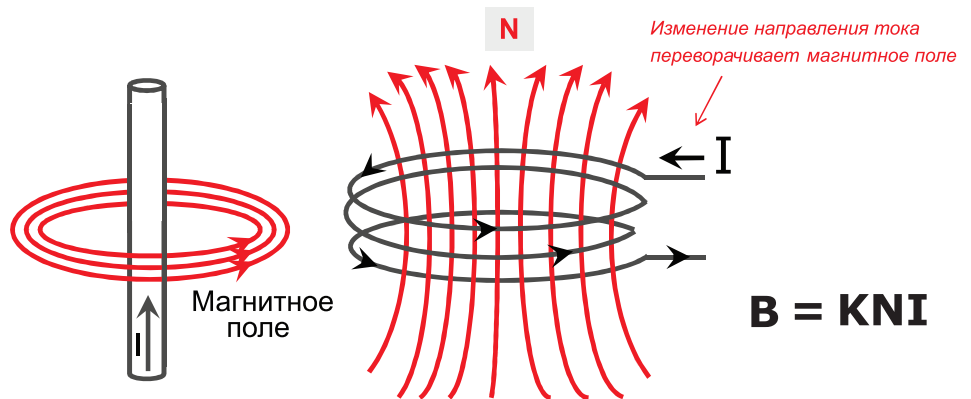


Рис. 1. Электромагнетизм в основе работы электродвигателя

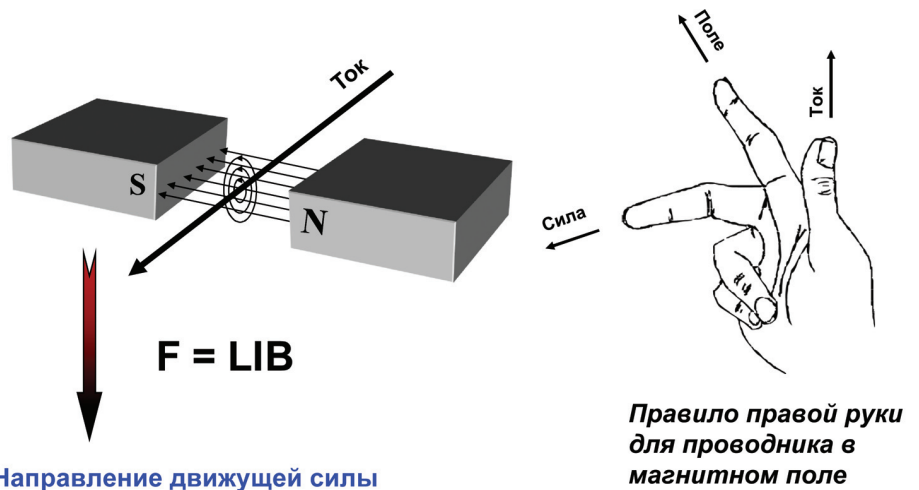


Рис. 2. Перемещение проводника с током в магнитном поле (Сила Лоренца)

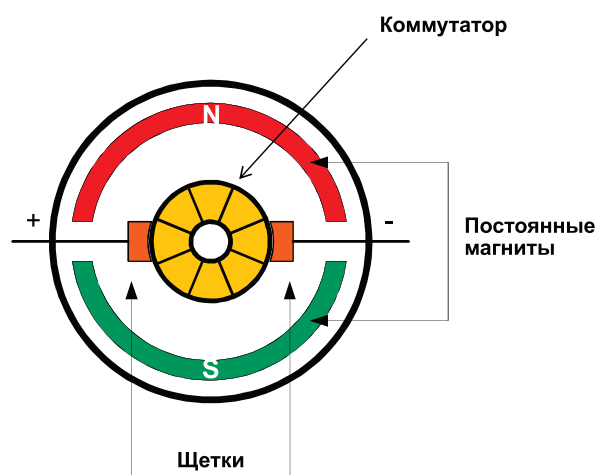
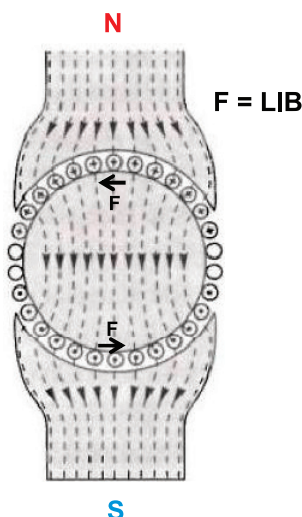


Рис. 3. Принцип действия коллекторного электродвигателя (BDC)



дукции поля (B) и длину проводника (L). $F = LIB$.

Коллекторные двигатели

Коллекторные двигатели постоянного тока (Brushed DC или BDC, по терминологии TI) сегодня относятся к одним из наиболее распространенных механизмов электромагнитного вращения.

В магнитном поле собранного из постоянных магнитов статора вращается многосекционный ротор с катушками, которые попарно и попеременно подключаются через коммутируемые коллекторные ламели на оси ротора (рисунок 3). Выбор пары активируемых катушек выполняется на основании закона Лоренца в соответствии с правилом Буравчика. Источник тока всегда подключен к катушкам, силовые линии магнитного поля которых смещены на угол, близкий к 90° , относительно магнитного поля статора.

Электродвигатели подобного типа часто используют статор с постоянными магнитами. Они позволяют легко регулировать скорость вращения и отличаются невысокой стоимостью.

Также широко используется вариант 2-обмоточного электродвигателя подобного типа, но со статорной обмоткой вместо постоянного магнита. Такие модели обладают большим пусковым моментом и могут работать не только на постоянном, но и на переменном токе. Электродвигатели подобного типа почти повсеместно используются в различной бытовой технике.

К недостаткам этой конструкции BDC стоит отнести износ щеточно-коллекторного узла в процессе эксплуатации. Кроме того, из-за искрообразования при коммутации отдельных обмоток ротора отмечается повышенный уровень электромагнитных помех, что не позволяет использовать такие двигатели во взрывоопасных средах.

Особенностью двигателей BDC также является повышенный нагрев ротора, охлаждение которого затруднено в силу конструктивных особенностей двигателя.

Достоинства коллекторных двигателей:

- малая стоимость;
- простая система управления;
- 2-обмоточные коллекторные двигатели, обладающие высоким крутящим моментом и способные работать на постоянном и переменном токе.

Особенности эксплуатации коллекторных двигателей:

- щетки требуют периодического обслуживания, понижают надежность двигателя;
- в процессе коммутации возникают электрические искры и электромагнитные помехи;

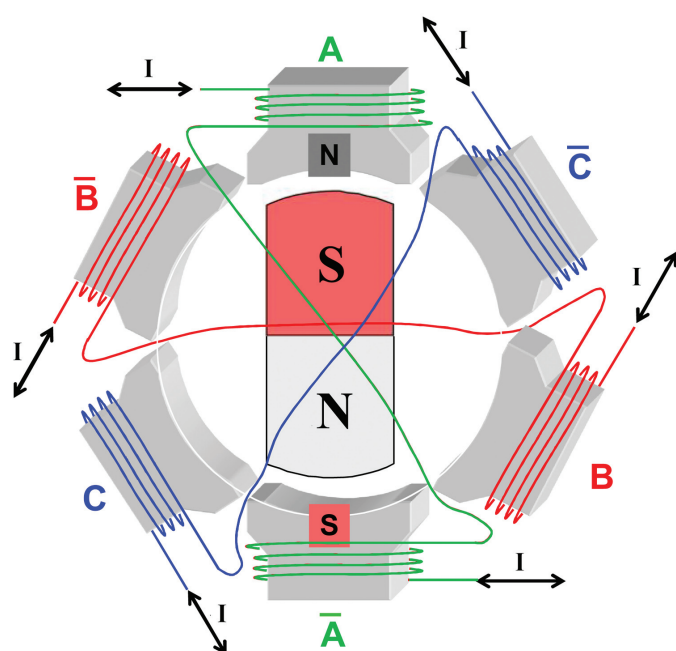


Рис. 4. Принцип действия бесколлекторного электродвигателя (BLDC)

- Шаг 1: U+ V- W 0
- Шаг 2: U+ V 0 W-
- Шаг 3: U 0 V+ W-
- Шаг 4: U- V+ W 0
- Шаг 5: U- V 0 W+
- Шаг 6: U 0 V- W+

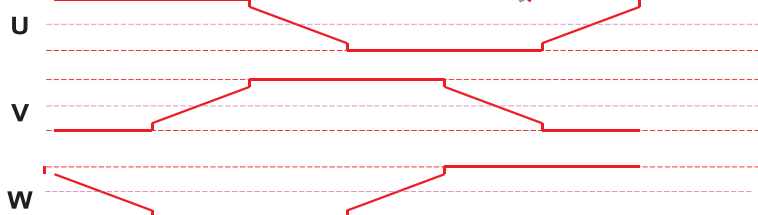


Рис. 5. Чередование фаз при вращении BLDC

- затруднен отвод тепла от перегревающегося ротора.

Бесколлекторные двигатели

Несколько менее распространенными среди двигателей постоянного тока являются модели с бесщеточной конструкцией (BrushLess DC или BLDC), использующие ротор с постоянными магнитами, которые вращаются между электромагнитами статора (рисунок 4). Коммутация тока здесь выполняется электронным способом. Переключение обмоток электромагнитов статора заставляет магнитное поле ротора следовать за его полем.

Текущее положение ротора обычно контролируется энкодерами или датчиком на основе эффекта Холла, либо применяется технология с измерением напряжения противо-ЭДС на обмотках без использования в этом случае отдельного датчика положения ротора (SensorLess).

Коммутация тока обмоток статора выполняется с помощью электронных ключей (вентилей). Именно поэтому бесколлекторные двигатели BLDC часто называют «вентильными». Очередность подключения пары обмоток двигателя происходит в зависимости от текущего положения ротора.

Принцип работы BLDC основан на том, что контроллер коммутирует обмотки статора так, чтобы вектор магнитного поля статора всегда был сдвинут на угол, близкий к 90° или -90° относительно вектора магнитного поля ротора. Вращающееся при переключении магнитное поле заставляет перемещаться вслед за ним ротор с постоянными магнитами.

При использовании трехфазного сигнала управления подключенными к источнику тока всегда оказываются только две пары обмоток, а одна — отключена. В результате последовательно используется комбинация из шести состояний (рисунок 5).

Электродвигатели без датчиков положения ротора отличаются повышенной технологичностью процесса изготовления и более низкой стоимостью. Подобная конструкция упрощает герметизацию внешних подключаемых выводов.

В качестве датчиков скорости и положения ротора в BLDC могут использоваться датчики Холла, которые отличаются небольшой стоимостью, но также и достаточно невысоким разрешением. Повышенное разрешение обеспечивают вращающиеся трансформаторы (резольверы). Они отличаются высокой стоимостью и требуют использования ЦАП, так как выходной сигнал у них синусоидальный. Высоким разрешением, но пониженной надежностью, обладают оптические датчики. На рисунке 6 представлены выходные сигналы датчи-

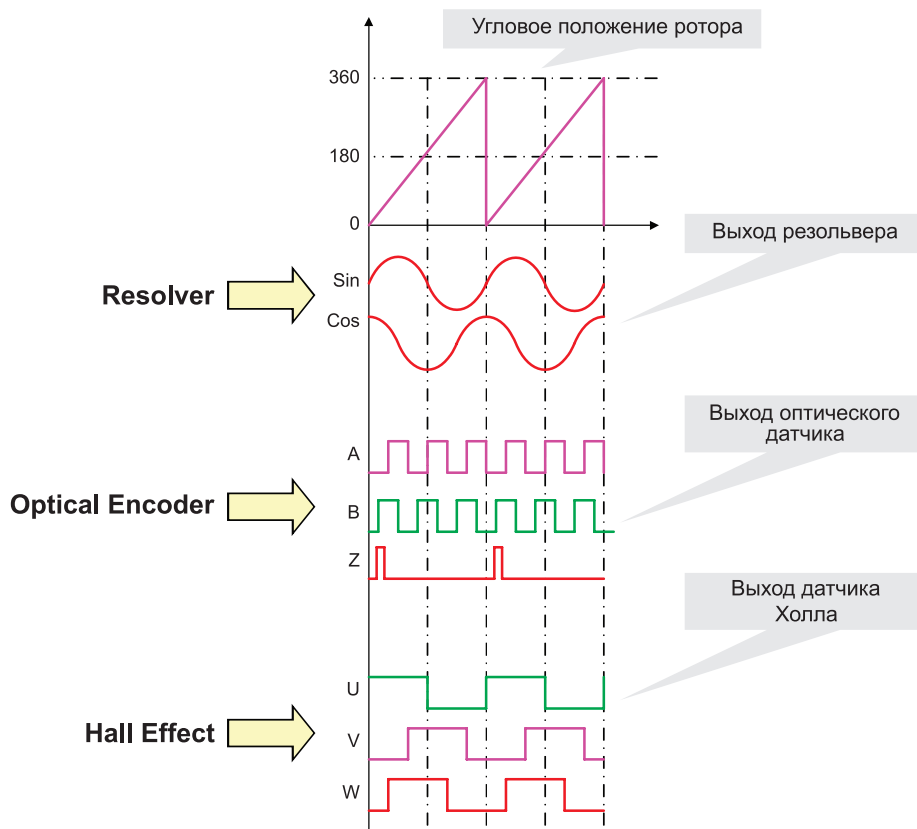


Рис. 6. Датчики положения ротора электродвигателей

ков разного типа при вращении ротора двигателя.

Преимущества двигателей BLDC:

- высокая эффективность;
- отсутствие щеток, обеспечивающее повышенную надежность, снижение затрат на обслуживание;
- линейность тока/крутящего момента;
- упрощенный отвод тепла.

Особенности применения двигателей BLDC:

- более сложная система управления с обратной связью по положению ротора;
- пульсации крутящего момента.

Шаговые двигатели

Шаговые двигатели (ШД) получили достаточно широкое распространение в системах автоматики и управления. Они являются еще одним типом бесколлекторных двигателей постоянного тока. Конструктивно ШД состоят из статора, на котором размещены обмотки возбуждения, и ротора, выполненного из магнитных материалов. Шаговые двигатели с магнитным ротором позволяют обеспечить большой крутящий момент и жесткую фиксацию ротора при обесточенных обмотках.

В процессе вращения ротор ШД перемещается шагами под управлением подаваемых на обмотки статора импульсов питания. Шаговые двигатели удобны для использования в приводах машин

и механизмов, работающих в старто-стопном режиме. Их диапазон перемещения задается определенной последовательностью электрических импульсов. Такие двигатели отличаются высокой точностью, не требуют датчиков и цепей обратной связи. Угол поворота ротора зависит от количества поданных импульсов управления. Точность позиционирования (величина шага) зависит от конструктивных особенностей двигателя, схемы подключения обмоток и последовательности подаваемых на них управляющих импульсов.

В зависимости от конфигурации схемы подключения обмоток шаговые двигатели делятся на биполярные и униполярные. Биполярный двигатель имеет в каждой из двух фаз единую обмотку для обоих полюсов статора, которая для изменения направления магнитного поля должна переполюсовываться драйвером. Биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода. Для управления таким ШД требуется мостовой драйвер или полумостовая схема с 2-полярным питанием. При биполярном управлении одновременно работают две обмотки и крутящий момент примерно на 40% больше. На рисунке 7 представлена последовательность сигналов управления при вращении биполярного ШД.

Униполярный двигатель использует в каждой фазе одну обмотку со средним выводом и позволяет использовать более простую схему управления с одним

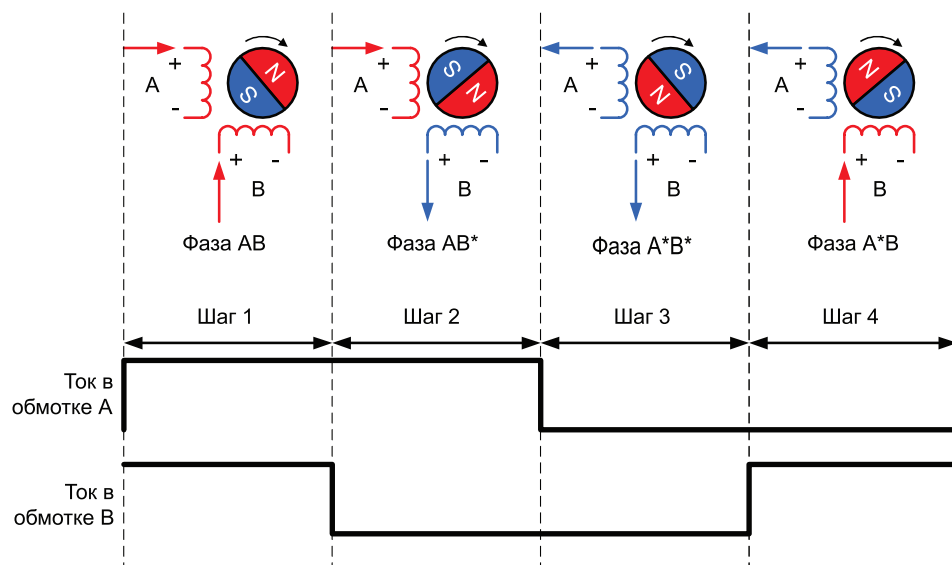


Рис. 7. Последовательность сигналов управления биполярным ШД

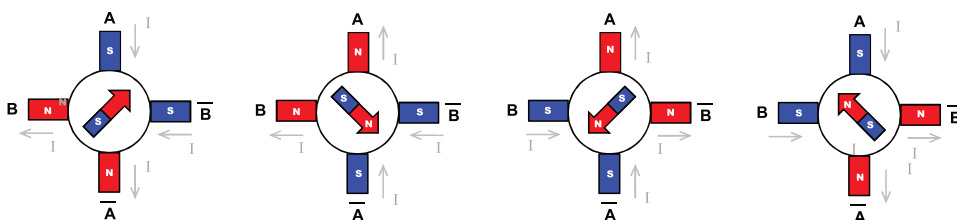


Рис. 8. Полношаговый режим управления ШД

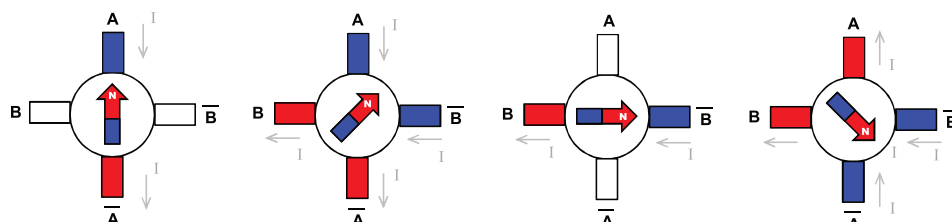


Рис. 9. Полушаговый режим управления ШД

Фазовые токи в режиме микрошага

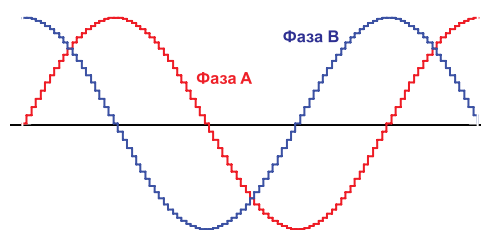
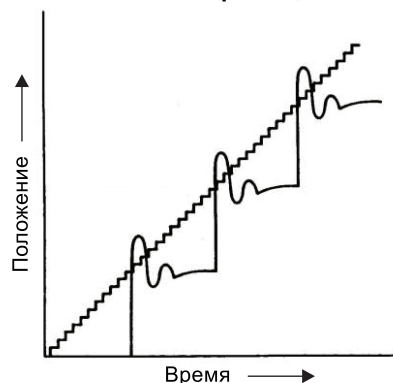


Рис. 10. Управление ШД в режиме микрошага

ключом на каждую из четырех полуобмоток.

Четырех обмоточные ШД могут использоваться как в биполярной, так и в униполярной конфигурации.

Шаговое перемещение



При протекании тока по одной из катушек ротор стремится изменить положение так, чтобы противоположные полюса ротора и статора установились друг против друга. Для непрерывного

вращения ротора катушки попеременно переключают.

На практике используются разные способы подачи питания на четыре обмотки статора. Чаще всего применяют парное подключение с полношаговым или полушаговым режимом работы. В полношаговом режиме ротор с двумя полюсами, вращающийся в переключаемом магнитном поле двух пар катушек, может занимать четыре положения (рисунки 8).

Получить удвоенную точность позиционирования и восемь позиций позволяет полушаговый режим работы (рисунок 9). Для его реализации добавляется промежуточный шаг с одновременной запиткой всех четырех катушек.

Значительно увеличить количество промежуточных положений и точность позиционирования позволяет режим микрошага. Идея микрошага заключается в подаче на обмотки шагового двигателя вместо импульсов управления непрерывного сигнала, напоминающего по форме ступенчатую синусоиду (рисунок 10). Полный шаг в этом случае делится на маленькие микрошаги, а вращение становится более плавным. Режим микрошага позволяет получить наиболее точное позиционирование. Кроме того, в этом режиме значительно снижается присущая шаговым двигателям вибрация корпуса.

Достоинства шаговых двигателей:

- невысокая стоимость благодаря отсутствию схем контроля скорости вращения и позиционирования;
- высокая точность позиционирования;
- широкий диапазон скоростей вращения;
- простой интерфейс управления с цифровыми контроллерами;
- очень высокая надежность;
- хороший удерживающий момент.

Особенности применения шаговых двигателей:

- ШД присуще явление резонанса;
- из-за отсутствия обратной связи возможна потеря контроля положения;
- потребление энергии не уменьшается даже при работе без нагрузки;
- затруднена работа на очень высоких скоростях;
- невысокая удельная мощность;
- достаточно сложная схема управления.

Традиционные решения для управления электродвигателями

Современная прецизионная система управления электродвигателем постоянного тока включает в себя микроконтроллер для обработки данных и блок управления питанием обмоток двигателя, часто называемый драйвером. В со-

став драйвера входит логическая схема для преобразования кодированных посылок в цифровые управляющие сигналы, из которых в блоке Gate Driver формируются аналоговые сигналы для управления силовыми ключами на основе полевых транзисторов (FET). FET могут входить в состав драйвера или размещаться в отдельном блоке. Кроме того, в состав драйвера входят схемы защиты силовых цепей и цепи обратной связи для контроля работы двигателя.

На рисунке 11 представлены варианты блок-схем для интегрированного и предварительного драйверов. Каждое из решений имеет свои преимущества и особенности. Предварительный драйвер (Pre-Driver) имеет значительно облегченный температурный режим, позволяет выбирать внешние силовые ключи в соответствии с мощностью подключаемого двигателя. Полнофункциональный интегрированный драйвер позволяет создавать более компактные системы управления, минимизирует внешние соединения, но значительно усложняет обеспечение необходимого температурного режима.

Так, у интегрированного драйвера **TI DRV8312** максимальная рабочая температура отдельных элементов на плате может достигать 193°C, а у предварительного драйвера **DRV8301** этот показатель не превышает 37°C.

Одной из наиболее распространенных схем для коммутации обмоток двигателей является мост типа "H". Название схемы связано с конфигурацией подключения, которая похожа на букву "H". Эта электронная схема позволяет легко изменять направление тока в нагрузке и, соответственно, направление вращения ротора. Напряжение, прикладываемое к обмоткам через транзисторы моста, может быть как постоянным, так и модулированным с помощью ШИМ. H-мост предназначен, в первую очередь, для смены полярности питания двигателя — реверса (рисунок 12), но также позволяет тормозить вращение, коротко замыкая выводы обмоток (рисунок 13).

Важнейшей характеристикой силовых элементов моста, в качестве которых сегодня часто используют полевые транзисторы с изолированным затвором, является величина сопротивления открытого канала между истоком и стоком транзистора — $R_{DS(on)}$. Значение $R_{DS(on)}$ во многом определяет тепловые характеристики блока и энергетические потери. С увеличением температуры $R_{DS(on)}$ также растет, а ток и напряжение на обмотках уменьшаются.

Использование управляющих сигналов с ШИМ позволяет уменьшить пульсации крутящего момента и обеспечить более плавное вращение ротора двигателя. В идеале частота ШИМ должна

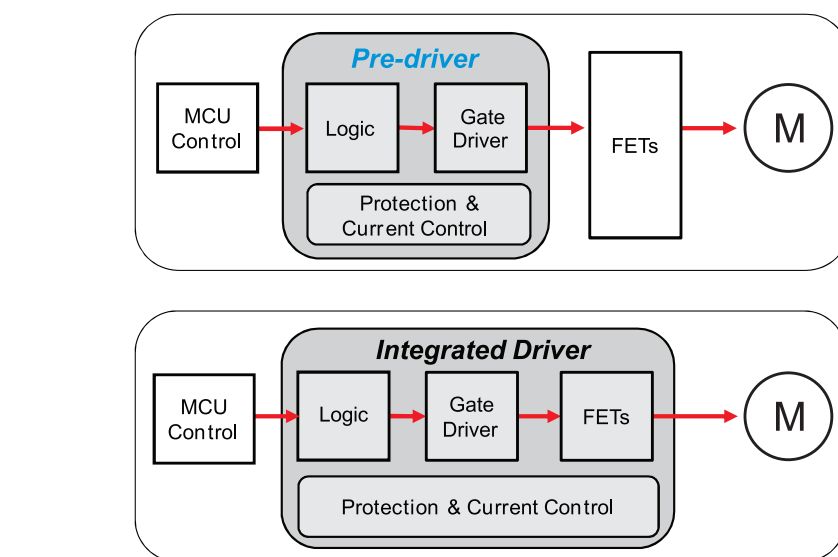


Рис. 11. Блок-схемы систем управления двигателем

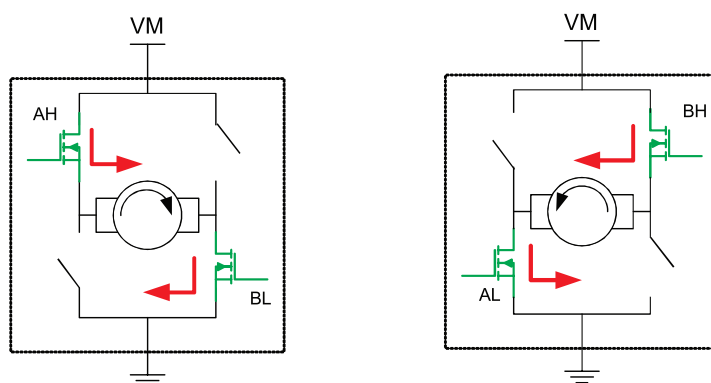


Рис. 12. Смена направления вращения коллекторного двигателя

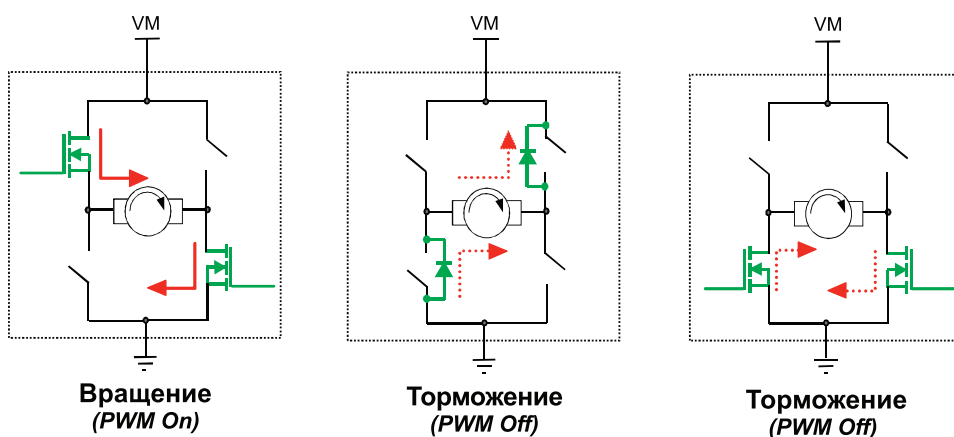


Рис. 13. Режимы вращения, быстрого и медленного торможения

быть выше 20 кГц, чтобы избежать акустического шума. Но с увеличением частоты растут потери на транзисторах моста в процессе коммутации.

Из-за индуктивных свойств нагрузки в виде обмоток форма тока в ней не соответствует форме подаваемого напряжения ШИМ. После подачи импульса напряжения ток нарастает постепенно, а в паузах ток плавно затухает из-за воз-

никновения в обмотках противо-ЭДС. Наклон кривой на графике тока, амплитуда и частота пульсаций влияют на рабочие характеристики двигателя (пульсации крутящего момента, шум, мощность и так далее).

Для ускоренного затухания в обмотках электродвигателей возбуждаемого эффектом противо-ЭДС тока используют диоды в обратном включении, шун-

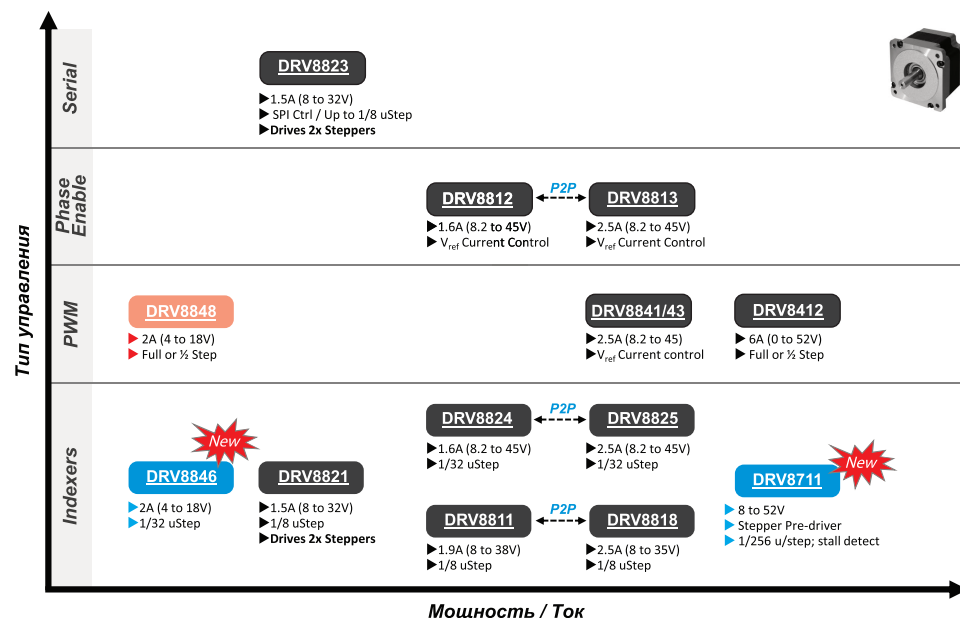


Рис. 14. Драйверы TI для управления шаговыми двигателями

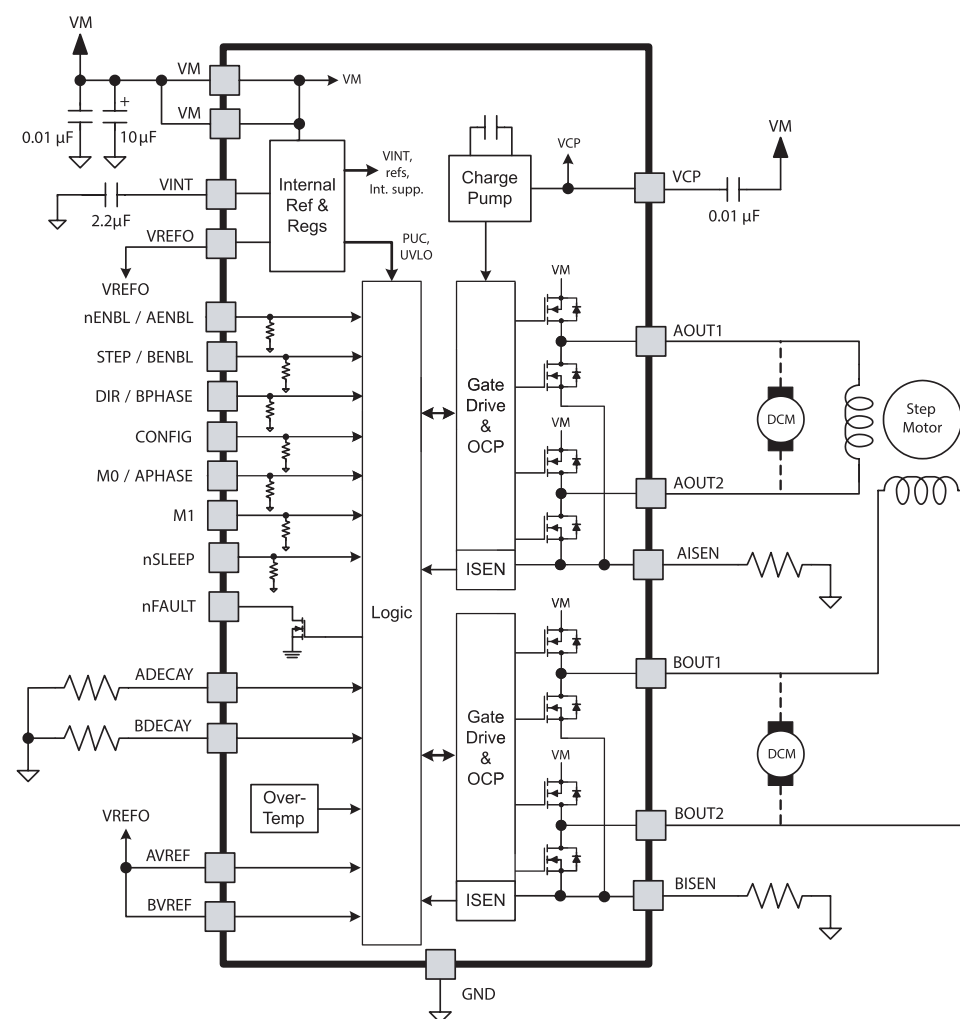


Рис. 15. Блок-схема драйвера DRV8834

тирующие переходы «сток-исток» транзисторов, либо закорачивают обмотки через переходы «сток-исток» двух транзисторов, одновременно включенных в разных плечах моста. На рисунке 13

представлены три состояния моста: рабочее, быстрого торможения (Fast Decay) и медленного торможения (Slow Decay).

А наиболее эффективным считается комбинированный режим (Mixed

Decay), при котором в паузе между рабочими импульсами сначала работают диоды, шунтирующие сток-исток транзисторов, а затем включаются транзисторы в нижних плечах моста.

Решения для управления электродвигателями от TI

Среди полупроводниковых компонентов, выпускаемых компанией TI, представлен обширный ассортимент различных драйверов для управления электродвигателями постоянного тока. Все они требуют минимума внешних компонентов, позволяют создавать компактные решения для управления двигателями с рабочим напряжением до 60 В, отличаются повышенной надежностью, обеспечивают быстрое и простое проектирование систем привода электродвигателями.

Встроенные в драйверы интеллектуальные функции требуют минимальной поддержки внешнего управляющего микроконтроллера (MCU), обеспечивают расширенные коммутационные возможности для обмоток, поддерживают внешние датчики и цифровые контуры управления. Комплекс защитных функций включает ограничение напряжения питания, защиту от превышения тока и короткого замыкания, понижения напряжения и повышения рабочей температуры.

Весь модельный ряд драйверов TI разбит на три раздела: шаговые, коллекторные и бесколлекторные двигатели постоянного тока. В каждом из них на сайте компании действует удобная система подбора по целому ряду параметров. Есть отдельные драйверы, предназначенные для использования с двигателями разных типов.

Драйверы TI для шаговых двигателей

Большой раздел решений TI для управления двигателями включает драйверы для ШД (рисунок 14), которые выпускаются как со встроенными силовыми ключами на основе FET, так и в виде предварительных драйверов, предоставляющих пользователю подбор необходимых силовых ключей. Всего в модельном ряду компании более 35 драйверов для ШД.

TI предлагает широкий выбор наиболее современных решений для управления перемещением и точным позиционированием с использованием микрошаговых схем управления, обеспечивающих электродвигателей плавным перемещением в широком диапазоне напряжения и тока.

Отдельные драйверы, используя один управляющий контроллер, позволяют управлять сразу двумя двигателями, имея для этого четыре встроенных моста на основе FET. Есть драйверы с встроенными FET, например,

DRV8834, которые можно подключить для управления к двум обмоткам шагового двигателя или использовать эти же выводы для управления двумя электродвигателями постоянного тока (рисунок 15).

Для более плавного перемещения ротора в драйверах для ШД используется настраиваемый механизм сглаживания импульсов тока (режимы Slow, Fast, Mixed Decay). Система расчета микрошага может быть следующих типов:

- встроенной в драйвер;
- с использованием внешнего опорного сигнала.

Не требуют внешнего контроллера для микрошагового перемещения драйверы **DRV881**, **DRV8818**, **DRV8821**, **DRV8824** и **DRV8825**. Здесь шаг перемещения и алгоритм коммутации обмоток рассчитываются схемой, встроенной в драйвер.

Более простые драйверы **DRV8812**, **DRV8813**, **DRV8828**, **DRV8829**, **DRV8841**, **DRV8842** и **DRV8843** обеспечивают микрошаговое вращение с использованием получаемого от внешнего контроллера опорного напряжения (V_{ref}). Уровень дробления основного шага может достигать 1/128 или 1/256.

Для управления ШД с униполярным подключением обмоток TI предлагает драйверы **DRV8803**, **DRV8804**, **DRV8805** и **DRV8806**.

Драйверы TI для BDC

Для управления — коллекторными электродвигателями постоянного тока — предназначено специальное семейство драйверов **DRV8x**, ряд представителей которого изображен на рисунке 16. Они обеспечивают полную защиту от превышения напряжения и тока, короткого замыкания и перегрева. Благодаря возможностям интерфейса управления эти драйверы обеспечивают простую и эффективную эксплуатацию двигателей. Пользователи могут с помощью одного чипа управлять одним или несколькими двигателями с рабочим напряжением 1,8...60 В.

Драйверы семейства выпускаются как с интегрированными силовыми ключами, так и как предварительные драйверы. Они требуют минимум дополнительных компонентов, обеспечивают компактность решений, сокращают время разработки и позволяют быстрее выпустить новые продукты на рынок.

Спящий режим (Sleep) позволяет минимизировать потребление энергии в режиме простоя и обеспечивает ускоренную активизацию при запуске двигателя. Для управления скоростью вращения могут использоваться внешние сигналы ШИМ или сигналы PHASE/ENABLE для выбора направления вращения и включения ключей выходного моста.

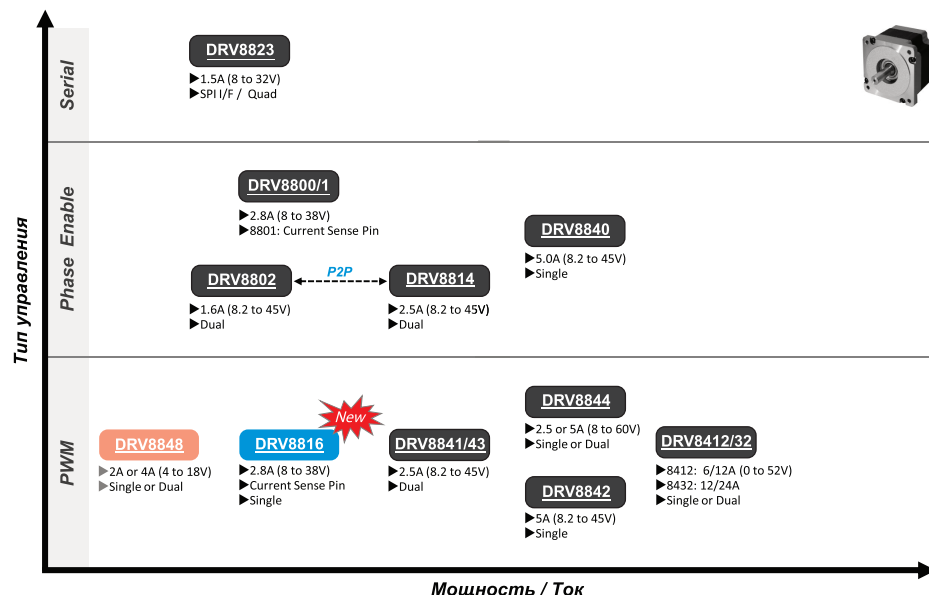


Рис. 16. Драйверы TI для управления коллекторными двигателями

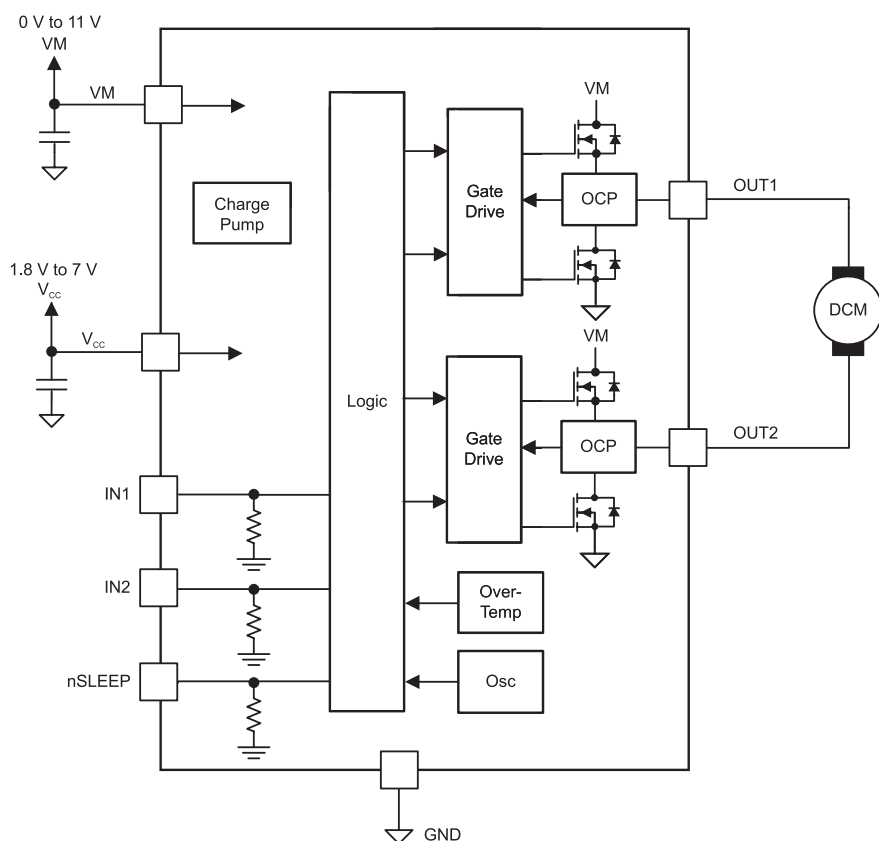


Рис. 17. Блок-схема драйвера DRV8837

Имеющий четыре выходных моста драйвер **DRV8823** способен управлять двумя ШД или одним ШД и двумя BDC, или же четырьмя BDC, используя при этом управляющий интерфейс SPI.

На рисунке 17 представлена функциональная схема простого драйвера **DRV8837** для управления одним коллекторным двигателем.

Драйверы TI для BLDC

Драйверы TI для бесколлекторных двигателей, или BLDC, могут включать

интегрированный силовой мост или использовать внешние силовые транзисторы. Схема формирования 3-фазных сигналов управления также может быть внешней или встроенной.

Семейство драйверов для управления бесколлекторными электродвигателями включает модели с разным принципом управления и с различным крутящим моментом. Эти драйверы, обеспечивающие разные уровни шума при управлении BLDC, идеально подойдут для использования в промышленном обо-

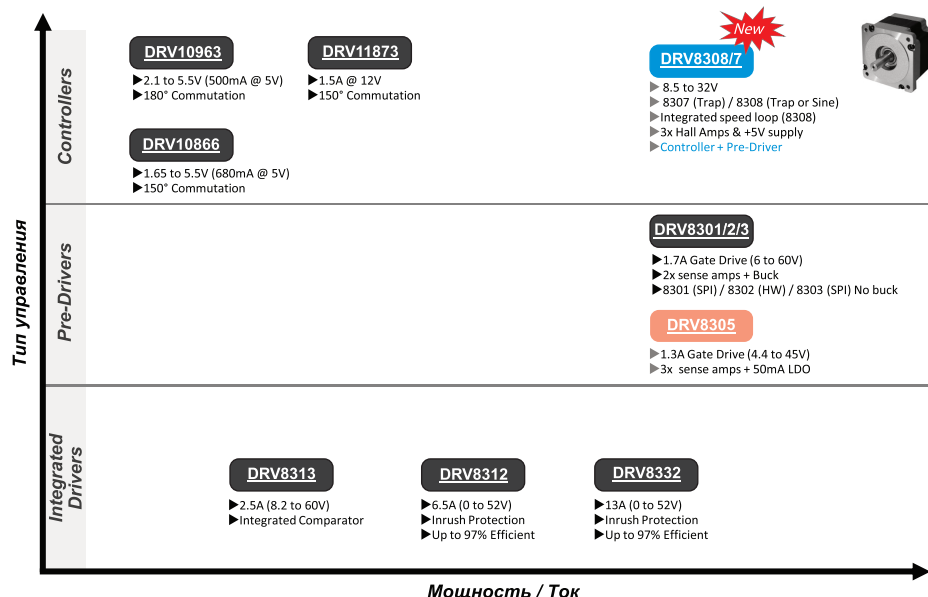


Рис. 18. Драйверы TI для управления бесколлекторными двигателями

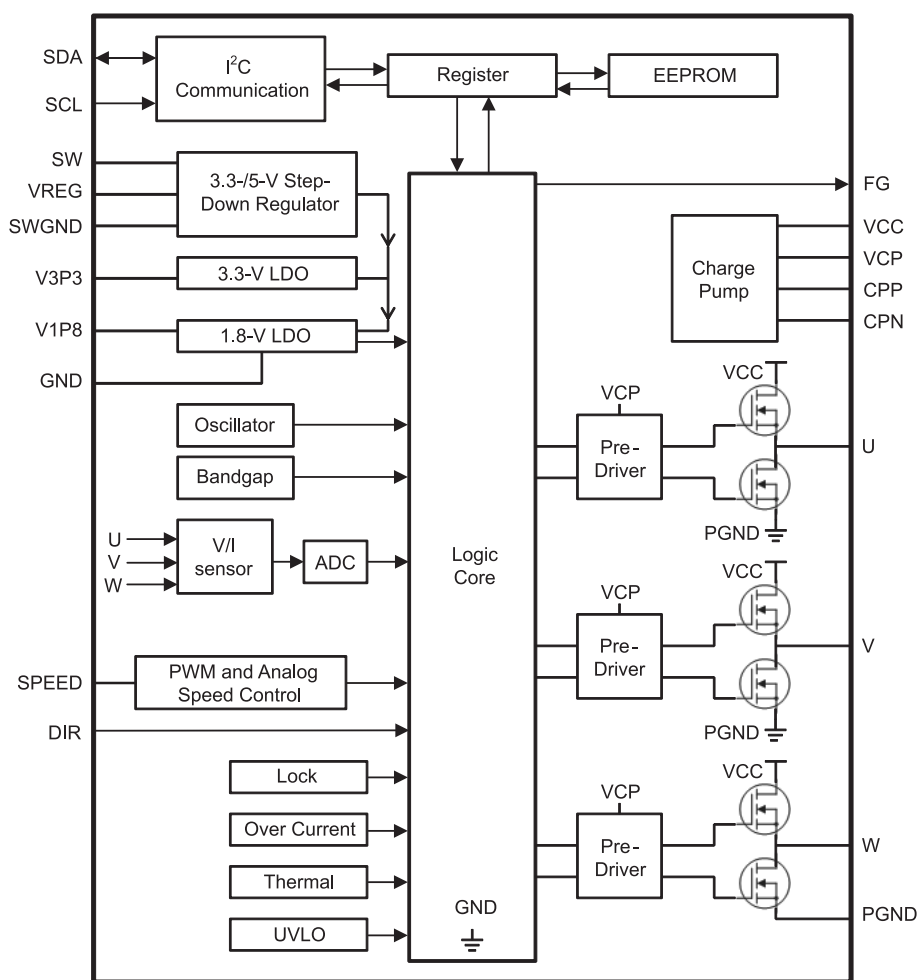


Рис. 19. Блок-схема драйвера DRV10983

рудования, автомобильных системах и другой технике. Чтобы гарантировать надежную эксплуатацию электродвигателей, драйверы обеспечивают всеобъемлющий набор защит от превышения тока, напряжения и температуры. На рисунке 18 представлены лишь некоторые из 3-фазных драйверов для BLDC

в обширном и постоянно пополняющемся модельном ряду компании TI.

Для контроля текущего положения вращающегося ротора могут использоваться внешние датчики разных типов или схема управления с определением позиции ротора по величине противо-ЭДС (Back Electromotive Force, BEMF).

Управление может выполняться с помощью ШИМ, аналоговых сигналов или через стандартные цифровые интерфейсы. Наборы настраиваемых параметров для управления вращением могут храниться во внутренней энергонезависимой памяти.

На рисунке 19 представлен работающий в широком диапазоне температур 40...125°C интеллектуальный драйвер для BLDC со встроенными силовыми ключами на полевых транзисторах, с сопротивлением открытого канала лишь 250 мОм. При диапазоне рабочих напряжений 8...28 В драйвер может обеспечивать номинальный ток 2 А и пиковый ток 3 А.

Драйвер не требует внешнего датчика для контроля положения ротора, но может использовать внешний резистор для контроля потребляемой двигателем мощности. **DRV10983** отличается незначительным энергопотреблением, составляющим всего 3 мА, в дежурном режиме. А в модели **DRV10983Z** этот показатель доведен до уровня 180 мкА.

Встроенный интерфейс I²C обеспечивает диагностику и настройку, доступ к регистрам управления работой логической схемы и хранящимся в памяти EEPROM рабочим профилям драйвера.

Расширенный комплект защитных функций обеспечивает остановку двигателя в случае превышения тока и понижения напряжения. Предусмотрено ограничение входного напряжения. Защита по превышению тока работает без использования внешнего резистора. Методы использования защиты настраиваются через специальные регистры.

Заключение

Электродвигатели находят все более широкое применение в самом различном оборудовании, совершенствуются и получают новые возможности во многом благодаря современным системам электропривода.

В ассортименте полупроводниковых компонентов производства компании Texas Instruments широко представлены микросхемы драйверов для управления всеми типами двигателей постоянного тока. На их основе компания предлагает масштабируемые в зависимости от требований по точности, мощности и функциональности решения для создания приводов, работающих в широком диапазоне токов и напряжений, обеспечивающих надежную и удобную эксплуатацию коллекторных, бесколлекторных и шаговых двигателей с полным комплексом защит по току, напряжению и температуре.

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка –
e-mail: analog.vesti@compel.ru