

# Изолированные драйверы затвора: что, как и почему?

Санкет САПРЕ (Sanket SAPRE)  
Перевод: Михаил РУССКИХ  
tau68@rambler.ru

Транзисторы IGBT и силовые МОП-транзисторы представляют собой управляемые напряжением устройства, которые зачастую используются в качестве коммутационных элементов в цепях источников питания и электроприводах. Затвор — это электрически изолированный управляющий вывод, присущий каждому такому решению. Другими выводами МОП-транзистора являются сток и исток, а в случае IGBT они служат коллектором и эмиттером. Для работы IGBT/МОП-транзистора, как правило, необходимо приложить к затвору напряжение относительно эмиттера/стока устройства. Для приложения напряжения на затвор и подачи нужного тока для заряда входной емкости силового компонента применяются специальные драйверы. В статье рассказывается о том, что такое драйверы затвора, почему они нужны и как определяются их основные параметры — временные характеристики, нагрузочная способность и напряжение изоляции.

## Необходимость использования драйвера затвора

Структура IGBT/силового МОП-транзистора такова, что затвор формирует нелинейный конденсатор. Зарядка конденсатора затвора приводит к включению силового транзистора устройства, позволяя протекать току между стоком и истоком, а его разряд входной емкости, в свою очередь, выключает его, при этом между стоком и истоком прикладывается высокое напряжение. Минимальное напряжение, при котором конденсатор затвора заряжен, а устройство может пропускать ток, называется пороговым напряжением. Для работы IGBT/силового МОП-транзистора в качестве ключа между затвором и стоком/эмиттером необходимо приложить напряжение, значительно большее, чем пороговое. Рассмотрим цифровую логическую систему с микроконтроллером, которая на од-

ной из своих линий ввода/вывода может генерировать ШИМ-сигнал в диапазоне напряжений 0–5 В. Этот ШИМ-сигнал не будет достаточным фактором для полного включения силового устройства, применяемого в системах преобразования энергии, поскольку его напряжение включения обычно превышает стандартное напряжение логики КМОП/ТТЛ. Таким образом, между логической/управляющей схемой и высоковольтным устройством необходим специальный интерфейс. Он может быть реализован путем управления логическим  $n$ -канальным МОП-транзистором, который, в свою очередь, может управлять силовым МОП-транзистором (рис. 1а).

Как видно на рис. 1а, когда на выходе  $IO_1$  присутствует сигнал низкого логического уровня, напряжение затвор/исток транзистора  $Q_1$  ( $V_{GSQ1}$ ) меньше порогового напряжения  $Q_1$  ( $V_{THQ1}$ ), и поэтому МОП-транзистор  $Q_1$  остается выключенным. В результате

на затвор силового МОП-транзистора  $Q_2$  подается положительное напряжение. Емкость затвора  $Q_2$  ( $C_{GQ2}$ ) заряжается через подтягивающий резистор  $R_1$ , и напряжение затвора соответствует напряжению питания  $V_{DD}$ . Учитывая, что  $V_{DD}$  больше порогового напряжения  $Q_2$  ( $V_{THQ2}$ ), транзистор  $Q_2$  включается и может проводить ток. Когда сигнал на выходе  $IO_1$  переходит в высокий логический уровень,  $Q_1$  включается и  $C_{GQ2}$  разряжается через  $Q_1$ . Напряжение  $V_{DSQ1}$  близко к 0 В, поскольку  $V_{GSQ2}$  меньше  $V_{THQ2}$ , и в итоге  $Q_2$  выключается. Одной из проблем такой конфигурации является рассеивание мощности в  $R_1$  в течение периода работы  $Q_1$ . Чтобы преодолеть эту проблему, в качестве подтягивающего к питанию элемента можно задействовать  $p$ -канальный МОП-транзистор  $Q_3$ , который будет работать комплементарно транзистору  $Q_1$  (рис. 1б).  $P$ -канальный МОП-транзистор имеет низкое сопротивление во включенном состоянии и очень высокое сопротивление в выключенном состоянии, поэтому рассеиваемая мощность в цепи драйвера значительно снизится. Для управления скоростями нарастания и спада сигнала в переходных режимах затвора между стоком  $Q_1$  и затвором  $Q_2$  добавляется небольшой внешний резистор. Другим преимуществом использования МОП-транзистора является легкость его изготовления на кристалле, что предпочтительнее, чем изготавливать на кристалле резистор. Этот специальный интерфейс управления затвором силового ключа может быть создан в виде монолитной микросхемы, которая на входе принимает

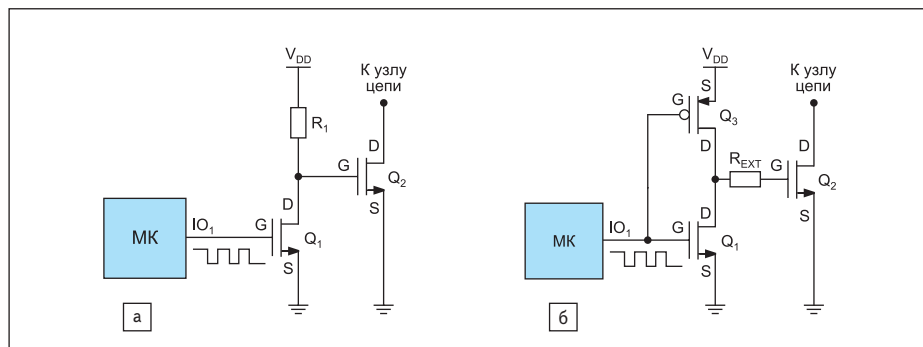


Рис. 1. Силовой МОП-транзистор, управляемый инвертированной логикой

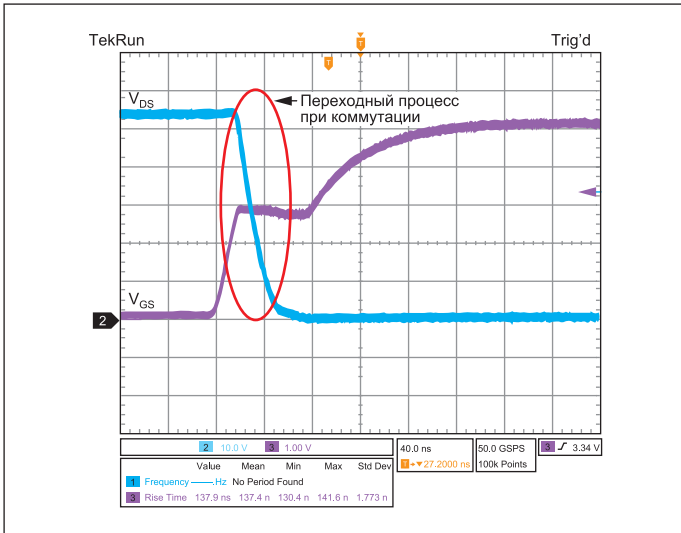


Рис. 2. Переходный процесс МОП-транзистора во время включения при отсутствии драйвера

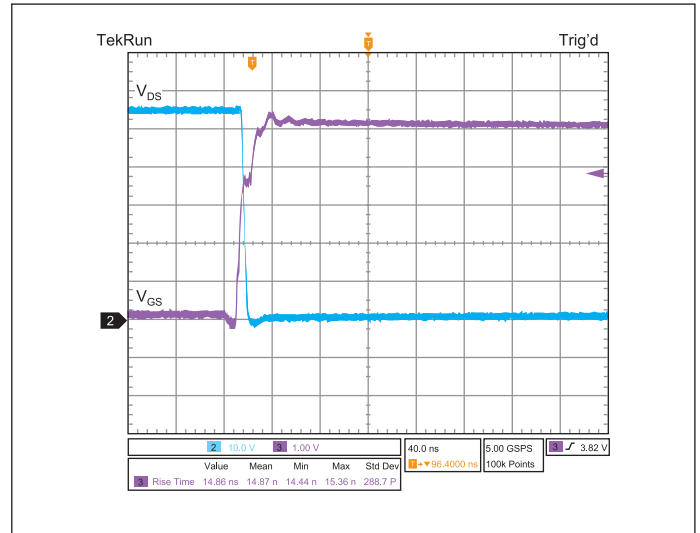


Рис. 3. Переходный процесс МОП-транзистора во время включения с использованием драйвера

напряжение логического уровня, а на выходе генерирует более высокое напряжение. Для большей функциональности такая микросхема драйвера затвора почти всегда будет иметь дополнительные внутренние цепи, но в основном она работает как усилитель мощности и схема сдвига уровня напряжения.

### Основные параметры драйверов затвора

#### Нагрузочная способность

Проблема подачи на затвор требуемого напряжения решается благодаря использованию драйвера затвора, который функционирует как схема сдвига уровня напряжения. Впрочем, наличие емкости затвора не позволяет изменить это напряжение мгновенно. То есть МОП-транзистор или IGBT имеет ненулевой конечный интервал переключения. Во время переключения через устройство может протекать сильный ток и к нему может быть приложено высокое напряжение, что приводит к рассеиванию мощности в виде тепла. В связи с этим переход от одного состояния к другому должен быть достаточно быстрым, чтобы минимизировать время переключения. Для того чтобы заряд и разряд емкости затвора происходил максимально быстро, требуется высокий ток неуставившегося режима.

Драйвер, который обеспечивает затвор более высокими токами в течение более длительного времени, минимизирует время переключения и, таким образом, снижает потери мощности при переключении в транзисторе, которым он управляет.

Вытекающий и втекающий токи на линиях ввода/вывода микроконтроллера обычно не превышают нескольких десятков миллиампер, тогда как драйверы затвора могут обеспечить гораздо большие токи. На рис. 2 можно наблюдать длинный интервал переключения, поскольку в данном случае силовой МОП-транзистор управляется портом ввода/вывода микроконтроллера, выдающим максимально возможный ток. Как показано на рис. 3, время переходного процесса было значительно сокращено благодаря изолированному драйверу затвора ADuM4121, который обеспечивает гораздо более высокий ток включения, чем линия ввода/вывода микроконтроллера, при управлении тем же силовым МОП-транзистором. Во многих случаях управление мощным IGBT/МОП-транзистором непосредственно с помощью микроконтроллера может привести к перегреву и повреждению системы управления из-за возможного превышения тока в цифровой цепи. Драйвер затвора с лучшей нагрузочной способностью способен осуществлять быстрые переключения со временем нарастания и спада управляющего сигнала в несколько наносекунд. Это уменьшает потери мощности при переключении и позволяет созда-

вать более эффективные системы. Следовательно, при выборе драйвера затвора ток управления обычно считают важным параметром.

Параметром, который непосредственно связан с током управления, является выходное сопротивление драйвера, образованное сопротивлением сток-исток его верхнего транзистора во включенном состоянии ( $R_{DS(ON)}$ ). Хотя в идеале значение  $R_{DS(ON)}$  должно быть равным нулю для полностью включенного МОП-транзистора, из-за физических особенностей структуры оно обычно находится в пределах нескольких ом. Это значение нужно учитывать в общей цепочке последовательно соединенных сопротивлений на пути движения тока от стока к истоку.

$R_{DS(ON)}$  является основным параметром, влияющим на нагрузочную способность, поскольку ограничивает ток управления затвора, который может выдавать драйвер.  $R_{DS(ON)}$  внутренних ключей определяет втекающий и вытекающий токи, но помимо этого используются внешние последовательно подключаемые резисторы с целью снижения тока управления и, следовательно, изменения скорости нарастания и спада сигнала. Как показано на рис. 4, сопротивление верхнего плеча и внешний резистор  $R_{EXT}$  образуют резистор затвора на пути зарядки, а сопротивление нижнего плеча с  $R_{EXT}$  — резистор затвора на пути разрядки.

$R_{DS(ON)}$  также напрямую влияет на рассеивание мощности внутри драйвера. При определенном токе управления более низкое значение

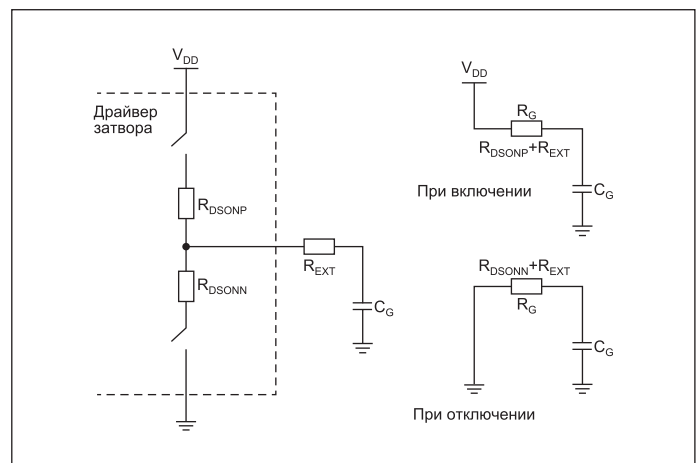


Рис. 4. Модель RC-цепи для драйвера затвора с выходным каскадом на основе МОП-транзистора и силовым транзистором, изображенным в качестве конденсатора

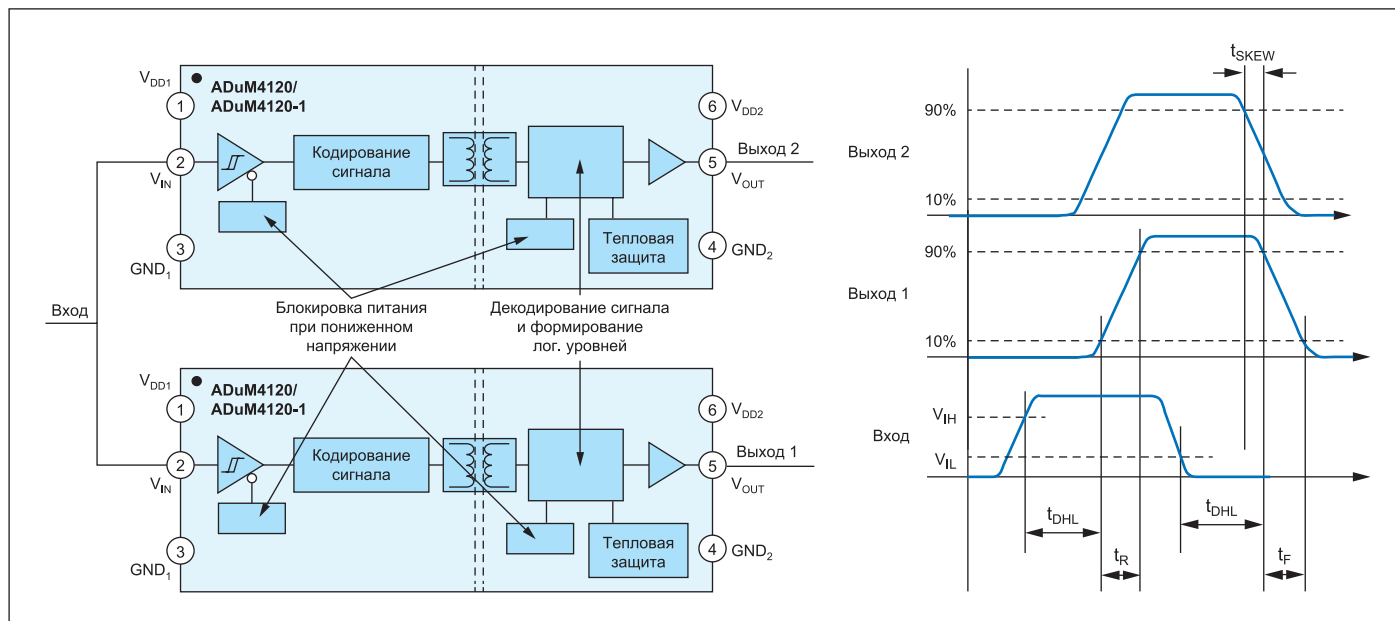


Рис. 5. Драйверы затвора ADuM4120 и временные диаграммы

$R_{DS(ON)}$  позволяет использовать более высокие значения  $R_{EXT}$ . Поскольку рассеиваемая мощность распределяется между  $R_{DS(ON)}$  и  $R_{EXT}$ , более высокое значение  $R_{EXT}$  означает, что большее количество мощности будет рассеиваться вне драйвера. Соответственно, для повышения КПД драйвера и уменьшения генерации тепла внутри драйвера, для определенной площади кристалла и размера микросхемы предпочтительно более низкое значение  $R_{DS(ON)}$ .

### Временные диаграммы управления

Временные диаграммы управления драйвера затвора необходимы для оценки его эффективности. Одним из основных параметров для всех драйверов затвора, в том числе ADuM4120, как показано на рис. 5, считается задержка распространения ( $t_P$ ) сигналов драйвера, которая определяется как время, необходимое для того, чтобы фронт или спад входного сигнала вызвал фронт или спад выходного сигнала. Как видно на рис. 5, задержка распространения по фронту ( $t_{DHL}$ ) может быть определена как время между фронтом входного сигнала, превысившим верхний уровень порогового напряжения ( $V_{IH}$ ), и фронтом выходного сигнала, превысившим 10% от своей полной величины. Аналогично задержка распространения по спаду ( $t_{DHL}$ ) может быть определена как время между спадом входного сигнала, значение которого стало меньше нижнего уровня порогового напряжения ( $V_{IL}$ ), и спадом выходного сигнала, чья величина стала меньше 90% от своей полной величины. Задержка распространения для переходных процессов по фронту и спаду выходного сигнала может различаться.

На рис. 5 также показаны временные диаграммы фронта и спада сигнала. На скорость

нарастания и спада импульсов управления влияет величина управляющего тока, который может обеспечить драйвер, но также они зависят от нагрузки и не учитываются при вычислении задержки распространения. Еще одним важным параметром служит искажение ширины импульса, представляющее собой разницу между задержками распространения по фронту и спаду одного и того же компонента. То есть искажение ширины импульса можно выразить как  $(PWD) = |t_{DHL} - t_{DHL}|$ .

Из-за различий между транзисторами в составе разных компонентов задержка распространения одного драйвера никогда не будет точно такой же, как у другого. Это приводит к временному перекосу задержки распространения ( $t_{SKEW}$ ), который определяется как разница во времени между переходными процессами выходных сигналов двух разных компонентов при воздействии одного и того же входного сигнала при одинаковых условиях работы. Как видно на рис. 5, перекос задержки распространения определяется на основе временных диаграмм выходных сигналов двух разных компонентов. Для компонентов, имеющих более одного выходного канала, эта характеристика определяется подобным образом, но называется она «временная задержка между каналами». Перекос задержки распространения обычно не учитывается в цепи управления.

На рис. 6 представлена стандартная схема подключения драйверов затвора ADuM4121, управляющих силовыми МОП-транзисторами, которые формируют полумостовую схему, используемую во многих источниках питания и электроприводах. В такой схеме оба транзистора,  $Q_1$  и  $Q_2$ , не включаются в одно и то же время, поскольку тогда может произойти короткое замыкание из-за непосредственного подключения линии питания

к «земле». Это способно вывести из строя ключи и даже схему управления. Чтобы избежать сквозного тока, в системе нужно предусмотреть «мертвое» время или время запаздывания, тогда вероятность одновременного включения обоих ключей значительно уменьшится. В период «мертвого» времени сигнал на затворе для обоих ключей будет находиться на низком логическом уровне, и, следовательно, сами ключи будут пребывать в выключенном состоянии. Если перекос задержки распространения меньше, то и требуемое «мертвое» время окажется меньше, а управление станет более предсказуемым. Минимизация перекоса задержки распространения и «мертвого» времени приводит к более плавной и эффективной работе системы.

Временные диаграммы управления очень важны, поскольку они влияют на скорость работы силовых ключей. Понимание этих параметров позволит разрабатывать более простые и точные схемы управления.

### Изоляция

Под изоляцией в данном случае подразумевается гальваническое разделение между различными функциональными цепями системы, при котором между ними отсутствует путь непосредственного прохождения тока. Благодаря этому отдельные цепи могут иметь различные потенциалы «земли». Сигналы управления и/или напряжение питания могут пересылаться между изолированными друг от друга цепями благодаря электромагнитным, емкостным или оптическим методам передачи сигналов. Для системы, в которой используются драйверы затвора, для функциональных задач и из-за требований к безопасности может по-

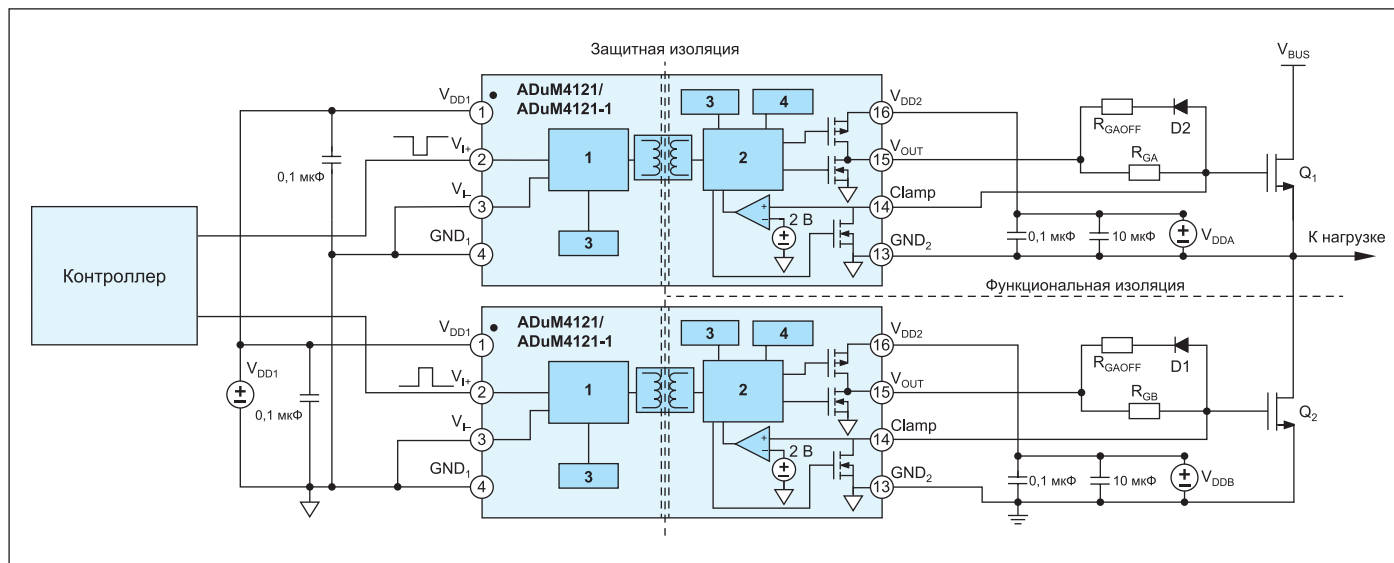


Рис. 6. Изолирующие барьеры в полумостовой схеме с использованием изолированных драйверов затвора ADuM4121: 1 — кодирование сигнала и формирование лог. уровней; 2 — декодирование сигнала и формирование лог. уровней; 3 — блокировка питания при пониженном напряжении; 4 — тепловая защита

надобится изоляция. Предположим, что на рис. 6 напряжение  $V_{BUS}$  составляет сотни вольт, а через транзистор  $Q_1$  или  $Q_2$  в определенный момент времени протекают десятки ампер тока. В случае какой-либо неисправности в этой системе, если поврежденными рискуют быть только электронные компоненты, необходимая для обеспечения безопасности изоляция (защитная изоляция) может не потребоваться, но гальваническая развязка между силовой частью и низковольтной цепью управления строго обязательна, если во время работы устройства возможна какая-нибудь деятельность человека со стороны управляющей части. Такая развязка обеспечивает защиту от любой неисправности силовой части, поскольку изолирующий барьер не пропускает токи и защищает пользователя от высокого напряжения, несмотря на повреждение или выход из строя компонентов.

Компоненты с гальванической изоляцией сертифицируются специальными органами регулирования и сертификации в целях их последующего использования для предотвращения опасности поражения электрическим током. Они также защищают низковольтную электронику от любых повреждений, причиной которых могут стать сбои в силовой части. Существует несколько вариантов определения защитной изоляции, но на фундаментальном уровне все они говорят о напряжении, при котором разрушается изолирующий барьер. Это значение напряжения, как правило, указывается для всего срока эксплуатации драйвера, а также для переходных процессов напряжения определенной продолжительности и формы сигнала. Данные уровни напряжения также определяют физические размеры микросхемы драйвера и минимальное расстояние

между выводами, разделенными изолирующим барьером.

Помимо соображений безопасности, изоляция может быть необходима и для правильной работы системы. На рис. 6 показана обычно используемая в электроприводах полумостовая топология, в которой в определенный момент времени во включенном состоянии должен находиться только один ключ. В силовой части исток транзистора нижнего плеча  $Q_2$  подключен к «земле». При этом напряжение затвор-исток  $Q_2$  ( $V_{GSQ2}$ ) измеряется относительно «земли», сама схема управления здесь достаточно проста. Но это не относится к транзистору верхнего плеча  $Q_1$ , поскольку его исток подключен к коммутационному узлу, к которому прикладывается либо напряжение шины, либо потенциал «земли» в зависимости от того, какой ключ находится в проводящем состоянии. Чтобы включить  $Q_1$ , следует приложить положительное напряжение затвор-исток ( $V_{GSQ1}$ ), превышающее его пороговое напряжение. Таким образом, напряжение затвора  $Q_1$  будет выше, чем  $V_{BUS}$  во включенном состоянии, поскольку исток будет подключен к  $V_{BUS}$ . Если бы схема управления не имела изоляции относительно опорного заземления, для управления транзистором  $Q_1$  потребовалось бы напряжение больше, чем  $V_{BUS}$ . Это было бы громоздкое решение, не позволяющее создать эффективную систему. Вот почему в таких случаях необходимы сигналы управления, которые должны быть сдвинуты по уровню так, чтобы нулевым потенциалом для них стал потенциал истока транзистора верхнего плеча. Это называется функциональной изоляцией, и она может быть реализована с помощью изолированного драйвера затвора, такого как ADuM4223.

## Помехоустойчивость

Драйверы затвора применяются в промышленных средах, по своей природе имеющих множество источников электромагнитных помех (ЭМП), способных исказить данные и уменьшить надежность системы, что приведет к снижению эффективности ее работы. В связи с этим драйверы затвора должны обладать хорошей помехоустойчивостью для обеспечения целостности данных. Помехоустойчивость определяет то, насколько эффективно драйвер минимизирует воздействующие на него кондуктивные (наведенные) синфазные ЭМП, а также высокочастотные помехи и артефакты переходных процессов.

Электромагнитные помехи представляют собой любой электрический шум или влияние магнитного поля, которые ухудшают эффективность работы электронного устройства. Электромагнитные помехи, воздействующие на драйверы затвора, создаются высокочастотными коммутационными цепями, а в большинстве случаев формируются магнитным полем крупных промышленных электродвигателей. Электромагнитные помехи могут излучаться или наводиться, а также быть внесены в другие расположенные рядом цепи. Таким образом, устойчивость к подобным помехам или высокочастотным шумам является параметром, определяющим способность драйвера минимизировать воздействующие на него электромагнитные помехи и поддерживать надежную работу устройства без сбоев. Обладающие высокой помехоустойчивостью драйверы затвора можно использовать в непосредственной близости от крупных электродвигателей, не опасаясь при этом возникновения каких-либо сбоев в процессе передачи данных.

На рис. 6 видно, что изолирующий барьер, как предполагается, обеспечит гальваническую развязку между различными потенциалами относительно потенциалов «земли». Но высокочастотная коммутация приводит к быстрым переходным процессам напряжения на вторичной стороне. Такие быстрые переходные процессы оказывают влияние на цепь управления из-за паразитной емкости между изолирующим барьером, вследствие чего может наблюдаться искажение данных. Это может привести к появлению джиттера в сигнале драйвера затвора или даже к инвертированию этого сигнала, из-за чего вероятно снижение КПД и возникновение короткого замыкания. Таким образом, важным параметром для драйверов затвора

является устойчивость к синфазным переходным процессам, которая количественно определяет способность изолированного драйвера затвора минимизировать данные процессы между его входом и выходом. Помехоустойчивость драйвера должна быть высокой, если высока скорость нарастания сигналов в системе. Соответственно, очень важны числовые показатели устойчивости к синфазным переходным процессам, если устройство работает на высоких частотах и с большими напряжениями шины.

### Заключение

Эта статья предназначена для ознакомления читателей с основами работы драйверов

затвора, и поэтому в ней были рассмотрены далеко не все параметры подобного устройства. Существуют и другие характеристики, такие как напряжение питания, допустимая температура, расположение выводов и т. д., свойственные и многим другим электронным компонентам. Некоторые драйверы, в частности ADuM4135 и ADuM4136, тоже содержат функции защиты или усовершенствованные механизмы управления. Сегодня на рынке присутствует множество разнообразных драйверов затвора, и для разработчика систем важно иметь четкое представление об их параметрах и функциях, чтобы в дальнейшем принять обоснованное решение об использовании соответствующих устройств в конкретных приложениях. ■