

# IGBT-драйвер в свете защиты транзистора

Практически любой разработчик в области силовой электроники знает, что такое драйвер IGBT-транзистора, что он собой представляет и как выглядит. Есть и понимание того, что драйвер выполняет защитные функции. Однако зачем нужна какая-то функция, как выглядит ее работа и каковы ее типовые характеристики — это не всегда понятно. Для устранения возможных пробелов в понимании защиты силового транзистора и того, как эту защиту реализует драйвер, и предназначена данная статья.

Павел Новиков

### Встроенные защиты драйвера

На сегодня драйвер IGBT-транзисторов — это законченный узел со сложившимся перечнем функций. Помимо основной функции — гальванически развязанной передачи логического сигнала управления в сигнал управления затвором транзистора, —

драйвер выполняет и защитные функции. При этом практически все драйверы всех производителей содержат одинаковые виды защиты, список которых представлен в таблице.

Указанный в таблице перечень функций достаточен для практически гарантированной защиты транзистора от выхода из строя при аварийных

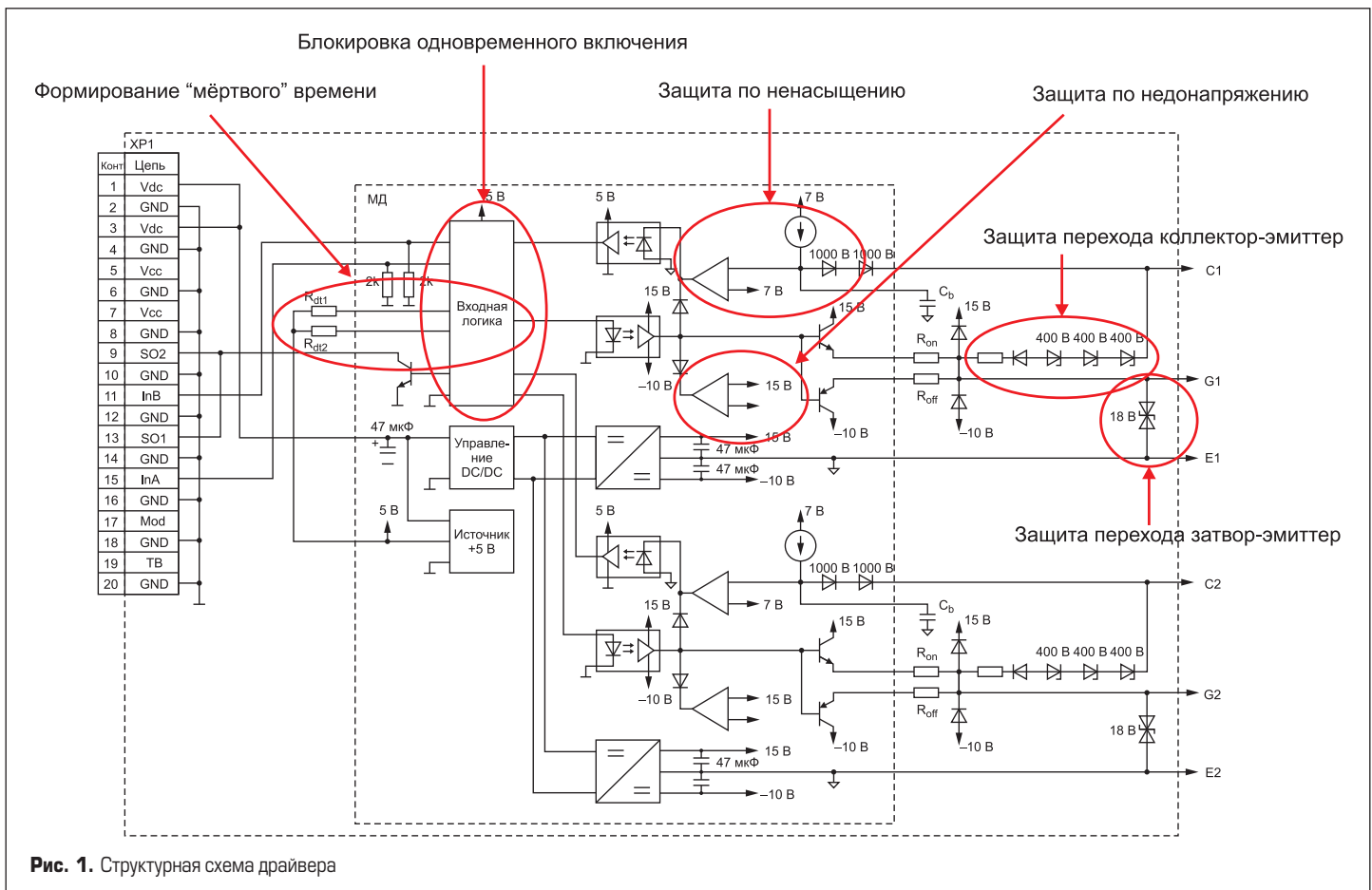


Рис. 1. Структурная схема драйвера

ситуациях. Реже встречаются и другие защиты, например по температуре, по входному напряжению питания, по максимальной частоте управления и т. п. Однако эти виды защиты понятны, универсальны, и говорить о них именно в контексте драйвера нецелесообразно. К тому же, разумеется, не все драйверы содержат все указанные в таблице функции, но для относительно мощных драйверов данный перечень фактически неизменен. Примером драйвера со всеми представленными защитами служит ДР2180П-Б3 (функциональный аналог 2SP0320T от Power Integration), чья структурная схема приведена на рис. 1.

Ниже будут рассмотрены все эти функции по отдельности, причем безотносительно конкретно указанного драйвера, а именно как отдельные функционально законченные структуры.

### Блокировка одновременного включения

Блокировка одновременного включения необходима для предотвращения сквозного тока короткого замыкания при одновременном открытии транзисторов полумоста. Пример работы защиты приведен на рис. 2. Как видно, фактически логика работы этой защиты представляет собой 2И-НЕ. Встречаются и другие алгоритмы, например, в последнем поколении драйверов Power Integration при наличии «лог. 1» на обоих входах управления открывается только один ключ, второй закрыт. Таким образом, один из входов является разрешающим, что удобно для формирования двух противофазных сигналов из одного управляющего меандра, но собственно полная блокировка полумоста при этом отсутствует. Также блокировка одновременного включения не используется в отдельных схемах, например при управлении косым мостом от одного двухканального драйвера.

### Формирование «мертвого времени» на переключение

«Мертвое время» на переключение необходимо, чтобы избежать наложения открытых состояний ключей при их переключении и сформировать задержку на обратные токи диодов. При малом «мертвом времени», а тем более при его отсутствии, неизбежны кратковременные импульсы сквозного тока на каждом переключении, что как минимум приводит к необязательным тепловым потерям, а как максимум — к выходу из строя. Как правило, «мертвое время» формируется введением задержки по переднему фронту управляющего сигнала и отсутствием задержки на заднем фронте. В результате выходной сигнал отстает на включении, что продемонстрировано на рис. 3. Поскольку такое отставание формируется для обоих каналов, в итоге на выходах (рис. 4) возникают импульсы с паузами, что и является «мертвым временем».

Таблица. Встроенные защиты драйвера

Тип защиты	Аварийная ситуация	Защита (функция)
По сквозному току	Сбой цепей управления	Блокировка одновременного включения
	Наложение открытых состояний ключей полумоста	Формирование «мертвого времени» на переключение
По напряжению	Перенапряжение цепи управления затвором	Защита перехода затвор-эмиттер
	Коммутационные импульсы напряжения в нагрузке	Защита перехода коллектор-эмиттер
По току	Выход транзистора из ключевого режима	Защита по недонапряжению затвора
	Превышение предельнодопустимого тока транзистора	Защита по ненасыщению

### Защита от недонапряжения затвор-эмиттер

Защита от недонапряжения в затворе обязательно вводится даже для маломощных драйверов, в том числе для всех драйверных микросхем. Причина тому — неизбежность низкого напряжения управления даже при штатной работе драйвера при его включении

и выключении, то есть в режимах пониженного напряжения питания. И хотя эти переходные процессы относительно коротки (не более десятков микросекунд), при наличии силового напряжения питания даже такое время работы транзистора в «линейном» режиме практически наверняка приведет к его тепловому пробое по причине выхода транзистора из ключевого режима из-за смещения рабочей

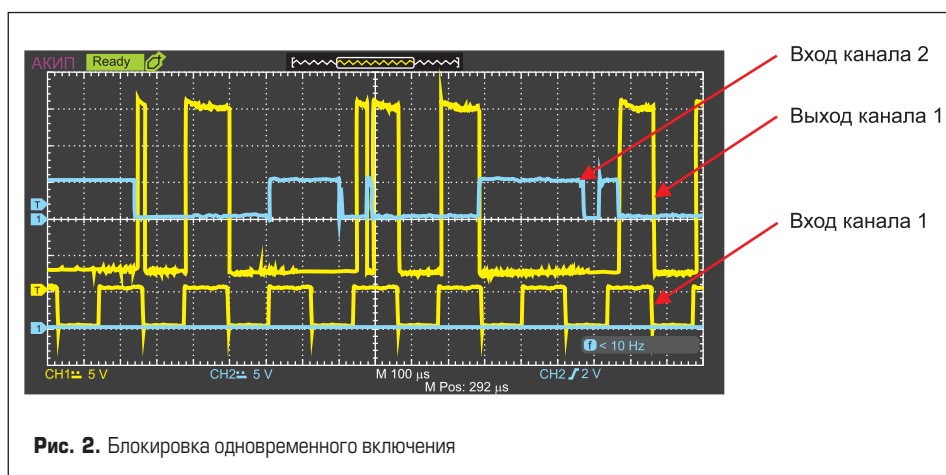


Рис. 2. Блокировка одновременного включения

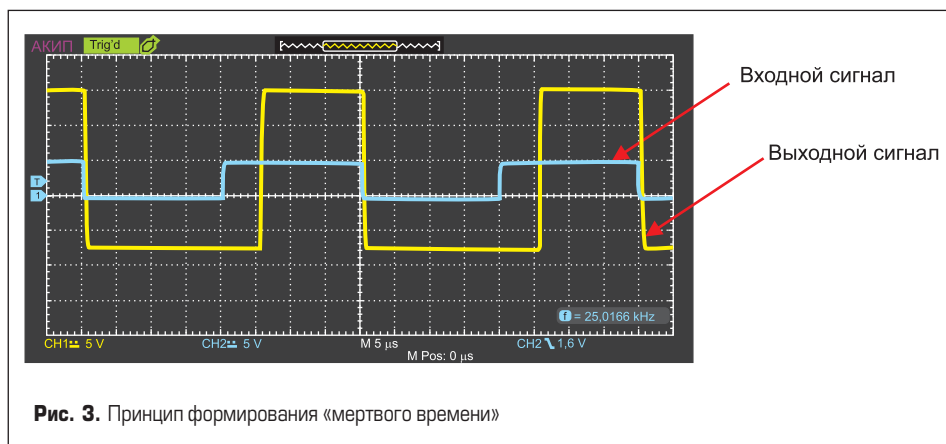


Рис. 3. Принцип формирования «мертвого времени»

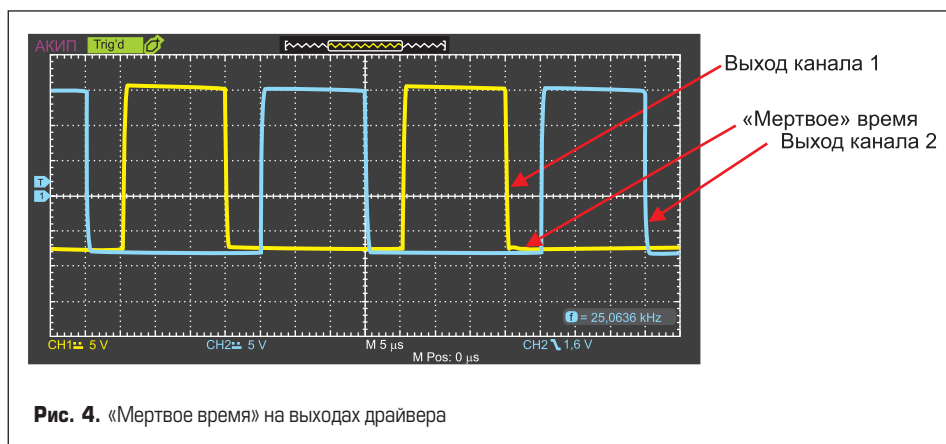


Рис. 4. «Мертвое время» на выходах драйвера

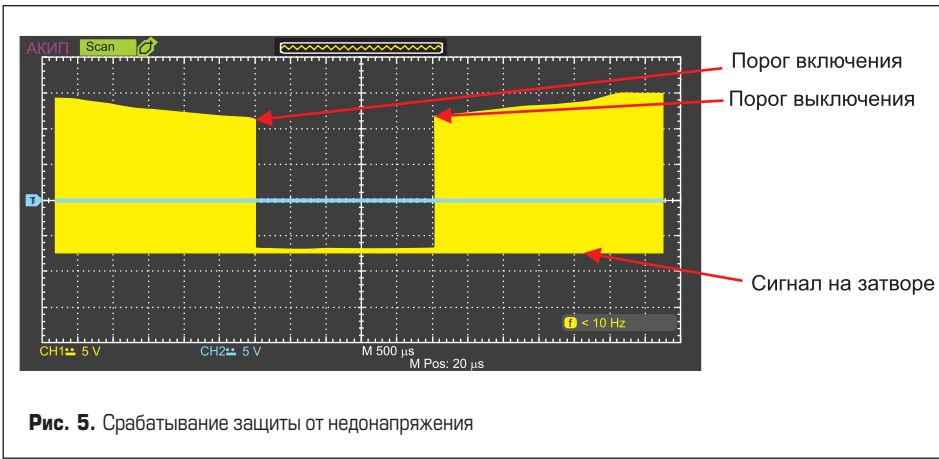


Рис. 5. Срабатывание защиты от недонапряжения

точки вниз по его ВАХ. Пример работы защиты приведен на рис. 5.

Существуют схемы, в которых специально используется режим работы при пониженном напряжении управления, например

с целью снижения тока КЗ. В драйверах таких схем защита от недонапряжения либо отсутствует, либо смещена по порогу. Но это редкость. В обычном драйвере пороги включения/выключения защиты всегда составляют

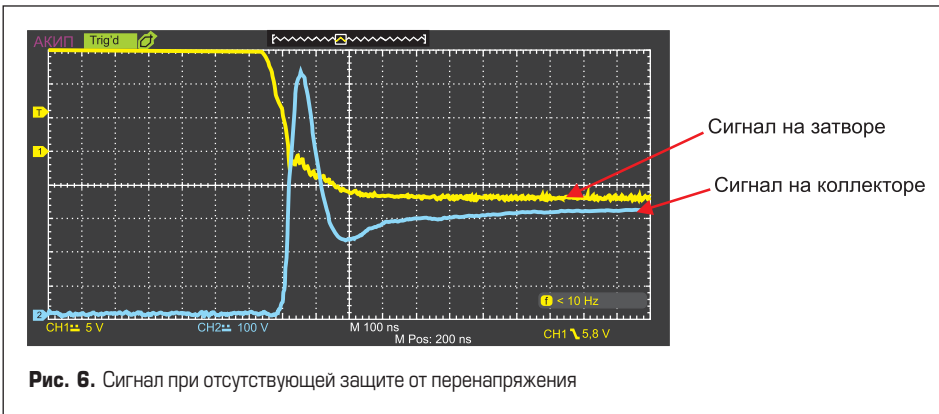


Рис. 6. Сигнал при отсутствующей защите от перенапряжения

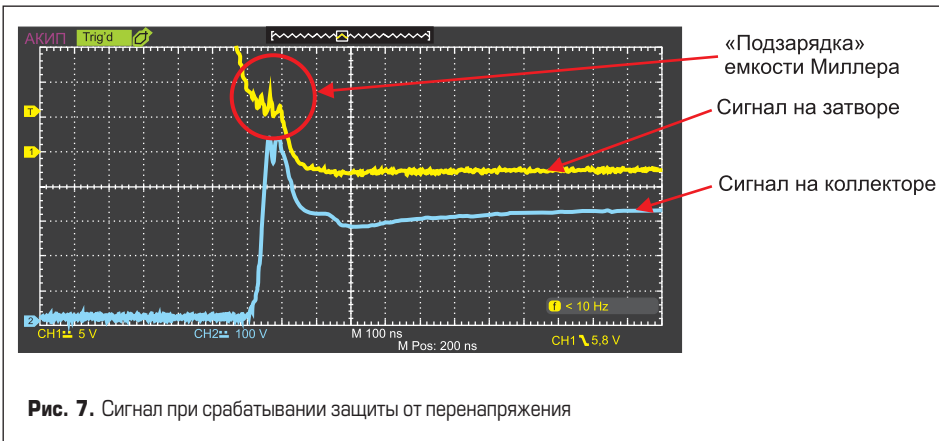


Рис. 7. Сигнал при срабатывании защиты от перенапряжения

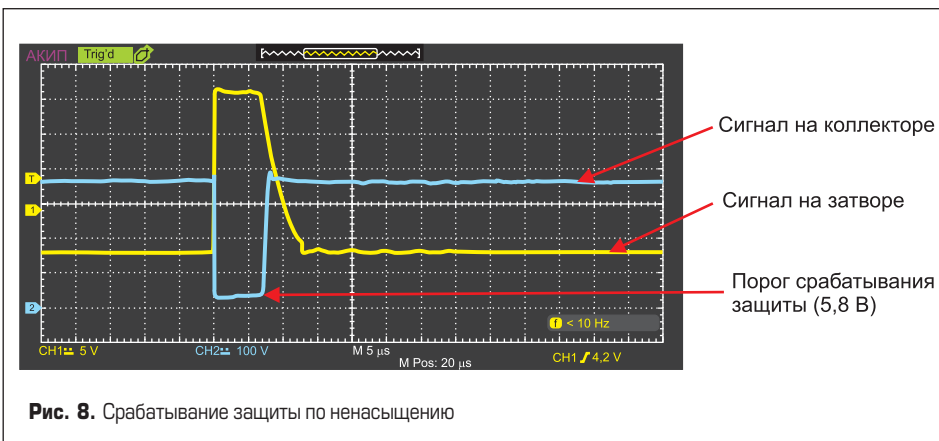


Рис. 8. Срабатывание защиты по ненасыщению

9–11 В/10–12 В. Такой диапазон напряжения объясняется все той же ВАХ практически любого IGBT- или MOSFET-транзистора. Гистерезис же необходим во избежание относительно высокочастотной модуляции сигнала управления защитой при перегрузке выхода DC/DC-преобразователя драйвера.

### Защита от перенапряжения коллектор-эмиттер

Назначение этой защиты объяснить излишне, а вот принцип работы active clamping не всегда понятен. На самом деле принцип работы защиты довольно прост: в простейшем случае между коллектором и затвором силового транзистора устанавливается цепочка ограничителей на необходимое напряжение ограничения (рис. 1). При выключении транзистора выброс напряжения приводит к отпираанию ограничителей и напряжение с коллектора поступает в затвор, в результате транзистор снова «приоткрывается», как следствие, сопротивление коллектор-эмиттер уменьшается, выброс напряжения «нагружается» и его амплитуда падает. Далее напряжение в затворе снова уменьшается, снова амплитуда выброса увеличивается, снова напряжение с коллектора отпирает затвор и т. д. Таким образом и осуществляется активное ограничение напряжения на коллекторе, то есть защита от перенапряжения коллектор-эмиттер. Примеры выключения с транзистора с отключенной и подключенной защитой приведены на рис. 6, 7.

Следует отметить, что данная защита используется далеко не во всех драйверах и больше характерна для драйверов Plug-n-play, в частности все того же Power Integration. Причина тому следующая: нет принципиальных преимуществ такой защиты относительно простого Z-снаббера в цепи коллектор-эмиттер, зато есть целый перечень возможных проблем — слишком долгая работа транзистора в активном режиме; возбуждение схемы при наличии КЗ в нагрузке; сквозной ток из-за того, что транзистор не успел выключиться до включения второго транзистора полумоста; перегрузка выхода драйвера (так как, по определению, в выход поступает положительное напряжение при установлении отрицательного напряжения) и т. п. Но тем не менее при корректном использовании данной защиты она может оказаться наиболее эффективным решением проблемы перенапряжения.

### Защита по ненасыщению

Защита по ненасыщению предназначена для аварийного выключения силового транзистора при его выходе из режима насыщения в результате недопустимого тока в нагрузке (обычно из-за КЗ). Принцип работы защиты основан на том, что драйвер контролирует падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер в периоды отпирающего сигнала на затворе. Если падение напряжения превышает установленный порог, драйвер снимает отпирающий сигнал управления и переходит в аварийный режим работы (выдача статусно-

го сигнала аварии, формирование блокировки управления, перезапуск и т. п.). Таким образом, драйвер не допускает работу транзистора при токе КЗ больше допустимого времени (как правило, задержка срабатывания защиты составляет 1–10 мкс) и его выход из строя. Пример срабатывания защиты по ненасыщению приведен на рис. 8.

Нередко разработчик преобразователя категорически неправильно понимает назначение данной защиты. Защита по ненасыщению не предотвратит выход из строя транзистора по причине токовой перегрузки, а срабатывание защиты при штатной работе преобразователя недопустимо. Первое объясняется тем, что падение напряжения на транзисторе очень нелинейно в зависимости от тока. Например, транзистор на ток 100 А: при 10 А у него будет падение порядка 2 В, при 100 А — порядка 2,5 В, при 200 А (уже недопустимая, двукратная перегрузка) — порядка 3 В, а защита сработает только при 10 В (типичное напряжение срабатывания), а это уже ток порядка 500 А. Потому фактически это лишь защита от КЗ: от превышения максимального тока преобразователя она не защищает и в принципе защитить не может. Исходя из этого объясняется второе: ни в каких штатных режимах работы преобразователя защита по ненасыщению срабатывать не должна; это именно аварийная защита.

### Плавное выключение

Плавное выключение, как правило, сопутствует защите по ненасыщению и предназначено для уменьшения индуктивного выброса на выключении при разрывании тока КЗ в момент аварийного отключения транзистора при срабатывании защиты по ненасыщению. Принцип защиты основан на имитации увеличения сопротивления затворного резистора путем уменьшения импульсного тока драйвера и тем самым увеличения выходного сопротивления драйвера. Как следствие, транзистор выключается значительно медленнее, что позволяет избежать индуктивного выброса на выключении. И поскольку индуктивный выброс особенно опасен при больших токах (тем более ток КЗ), то и плавное выключение формируется именно при срабатывании защиты по ненасыщению. Примеры выключения транзистора при наличии плавного выключения и при его отсутствии (на одном и том же коммутируемом токе) приведены на рис. 9, 10.

Нередко, если говорить о маломощных драйверах, плавное выключение при срабатывании

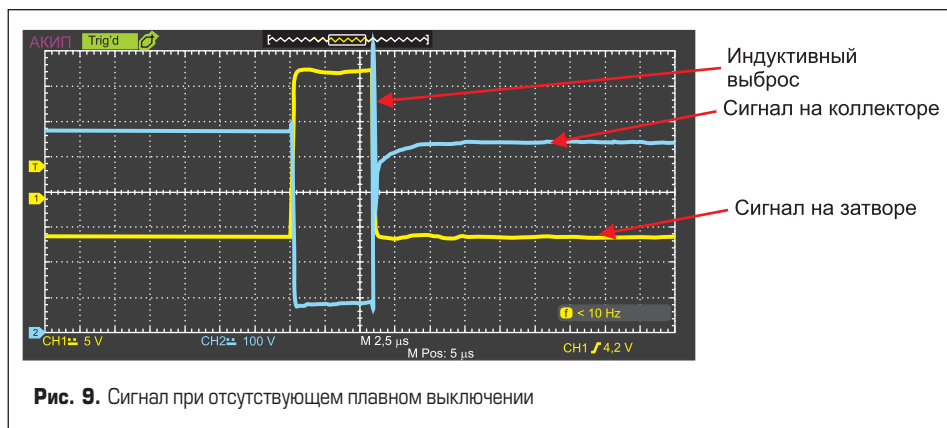


Рис. 9. Сигнал при отсутствующем плавном выключении

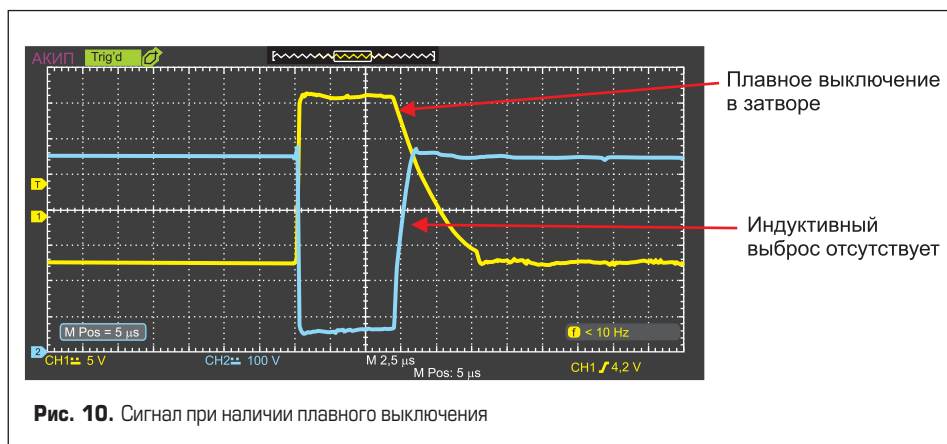


Рис. 10. Сигнал при наличии плавного выключения

защиты по ненасыщению не используется, что объясняется относительно малыми токами КЗ и, соответственно, относительно неопасным обратным выбросом при КЗ. Однако лучше все же предусмотреть плавное выключение и на малых мощностях, лишним оно точно не будет.

### Заключение

Зачастую разработчик использует в преобразователе не готовый драйвер стороннего производителя, а драйвер собственной разработки. Хорошо, если этот драйвер собран на основе специализированных микросхем типа HCPL-316J или серии аналогичных драйверов от Infineon. Хуже, если драйвер собран на полностью самостоятельных, универсальных элементах, что является нормой, например, при разработке преобразователя с «приемкой 5». В этом случае зачастую защиты не предусматриваются, или алгоритм их работы выбран некорректно, или неверны настройки... Действительно, все это не оказывает на работу драйвера и преобразователя никакого влияния, пока не происходит

аварийной, а еще чаще — просто сбойной ситуации. Здесь уже, как правило, безобидный режим приводит к выходу из строя. Индуктивный выброс и выход из строя ключа происходит при нештатном выключении транзистора (если сработала защита), которого вполне можно было избежать введением плавного выключения. Кратковременная, некритичная просадка питания, приведшая к срабатыванию защиты по недонапряжению, низкочастотной модуляции выходного сигнала, итог которой — «разнос» по току преобразователя. Игнорирование блокировки одновременного включения, а в итоге помеха по питанию при включении оборудования в соседнем цеху, нештатное отпирание ключа и выход из строя по сквозному току. И многое другое. Все эти защиты не просто так были созданы, их функционирование оттачивалось многими именитыми производителями и они должны быть в драйвере. Но даже для тех, кто не занимается собственной разработкой драйверов, приведенной выше информацией нужно владеть хотя бы для общего развития, как специалисту силовой электроники.