

Наш сайт: www.electrum-av.com

Рекомендации по применению драйверов IGBT-транзисторов

Настоящая статья предназначена для ознакомления пользователями драйверов IGBT-транзисторов с основными рекомендациями по их применению. Рекомендации состоят из трёх основных разделов:

- определения;
- применение драйвера IGBT;
- дополнительные рекомендации.

Приведённые ниже рекомендации являются общими для всех драйверов IGBT-транзисторов, однако для каждого драйвера обязательно есть свои дополнительные требования. Соблюдение этих требований и требований документации так же необходимо для корректной эксплуатации драйвера.

1. Определения

1.1 IGBT-транзистор

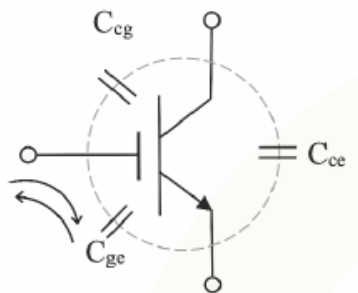


Рисунок 1 – Модель заряда и разряда затвора IGBT

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) - это коммутационный компонент с двумя ключевыми особенностями: высокая мощность, за которую отвечает биполярный транзистор, и простота управления, за которую отвечает МОП-транзистор затвора. Таким образом, обладая входной характеристикой аналогичной MOSFET, IGBT является компонентом, управляемым напряжением. Т.е. включение и выключение IGBT зависит от напряжения между G и E. И по причине имеющейся ёмкости затвора рекомендуется использовать определенные схемы для зарядки и разрядки входного конденсатора ($C_i = C_g + C_{cg}$) для включения и выключения IGBT.

1.2 Драйвер IGBT

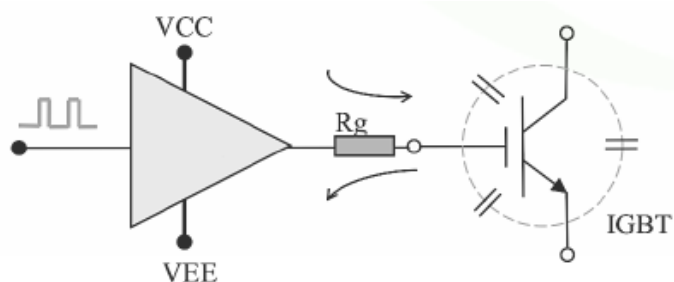


Рисунок 2 – Упрощённая схема подключения драйвера к IGBT

Драйвер IGBT - это узел, который заряжает и разряжает затвор IGBT-транзистора в соответствии с управляющими сигналами и обеспечивает его нормальное включение и выключение. Фактически, основной функцией IGBT-драйвера является усиление и преобразование управляющих сигналов. Плюс к этому, драйвер IGBT всегда обеспечивает изоляцию сигнала, чтобы снизить влияние синфазных помех.

1.3 DC/DC-преобразователь

Преобразователь постоянного тока для драйвера IGBT - это узел, который обеспечивает питанием выходную часть IGBT-драйвера с электрической изоляцией для уменьшения синфазных помех, а также для противодействия влиянию коммутационных помех, возникающих при коммутации нагрузки. Преобразователь может быть внешним или встроенным. Встроенный в драйвер DC/DC-преобразователь так же уменьшает габаритные размеры платы управления, упрощает схему электрическую и уменьшает объём разработки.

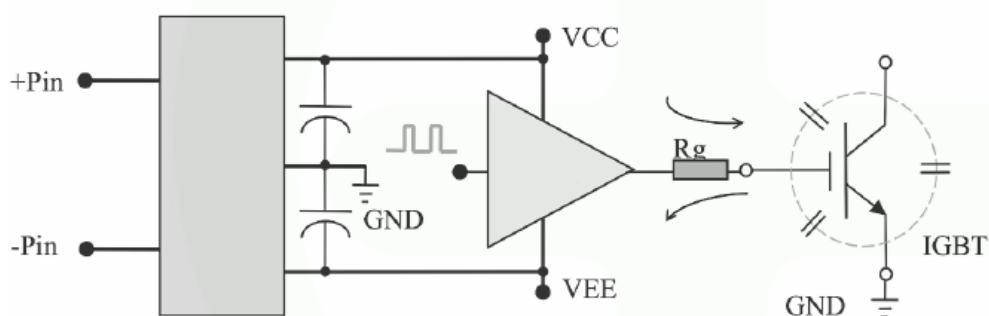


Рисунок 3 – Типовая схема подключения DC/DC-преобразователя к драйверу

2. Применение драйвера IGBT

2.1 Схема управления драйвером

Управляющие входы драйвера могут быть разных типов. В драйвере МД150 управляющими входами являются выводы светодиода, встроенного в быстродействующую оптронную пару с токоограничивающим резистором. В более сложных драйверах, содержащих в своём составе входную логику, управляющими входами являются входы логических микросхем.

Для организации управления драйвером необходимо учитывать следующее:

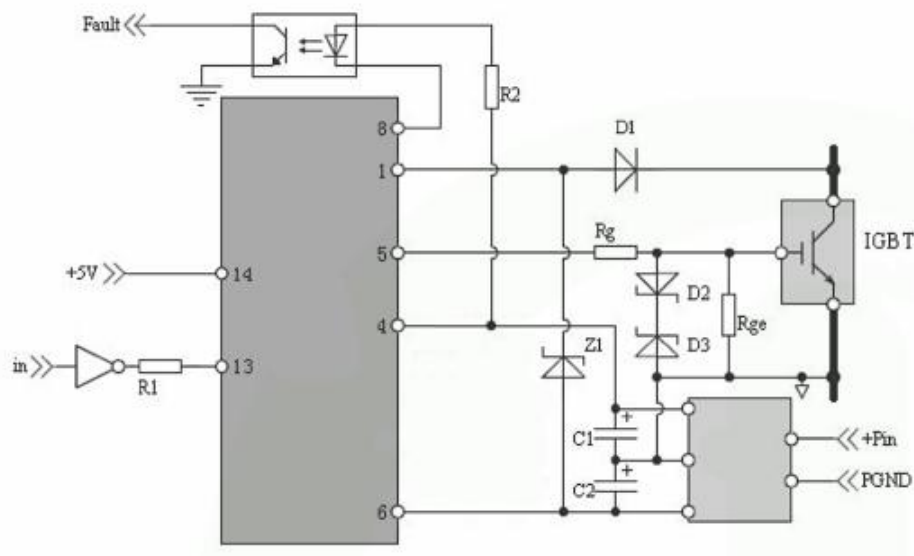
I_{in} : Входной ток, от долей мА до 10...20 мА для МД150.

R_{in} : Внутреннее сопротивление входов драйвера, от десятков кОм до 180 Ом для МД150.

U_{in} : Логические уровни или падение напряжения внутреннего светодиода для МД150.

2.2 Выходная схема драйвера

Практическое включение драйвера и IGBT-транзистора рассмотрим на примере простейшего драйвера типа МД150.



Где назначение выводов:

- 1: Вход контроля напряжения насыщения
- 4: Вход положительного напряжения питания
- 5: Выходной сигнал
- 6: Вход отрицательного напряжения питания
- 8: Выход статусного сигнала защиты по ненасыщению
- 13: Вход отрицательного сигнала управления
- 14: Вход положительного сигнала управления

Рисунок 4 – Включение модуля драйвера МД150

Напряжение включения затвора обычно составляет +15 В, а напряжение выключения колеблется в диапазоне от -5 В до -15 В. Следовательно, драйвер должен запитываться двумя источниками (положительный и отрицательный), подключенными относительно эмиттера. На рисунке 4 – это единый DC/DC-преобразователь.

В более сложных драйверах, начиная от серии МД1120, DC/DC-преобразователь встроен в драйвер и, таким образом, дополнительная внешняя схема питания не требуется.

2.3 Теоретическое значение сопротивления затворного резистора

Включение затворного резистора (R_g) приведено на рисунке 5. При этом значение сопротивления затворного резистора должно вкладываться в диапазон с двумя ограничениями.

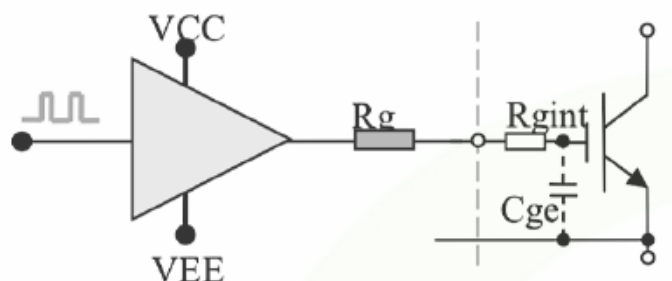


Рисунок 5 – Типичная схема управления затвором IGBT

Ограничение 1: Максимальный выходной ток драйвера

Данное ограничение применимо не ко всем драйверам. Допустима ли эксплуатация драйвера без ограничения тока или он должен быть ограничен – указывается в технической документации.

Как правило, IGBT-драйвер имеет номинальный максимальный выходной пиковый ток, а выходной ток IGBT-драйвера равен току IGBT-затвора. Но практически пиковый ток зависит не только от драйвера, но и от сопротивления затвора R_g , емкости затвора C_g , напряжений управления. Следовательно, при проектировании внешней цепи драйвера выходной пиковый ток драйвера должен находиться в пределах ограниченного диапазона. Например, для МД150 максимальный импульсный ток составляет 5 А, в таком случае формула пикового тока затвора равна:

$$I_{peak} \leq \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_g + R_{g\ int}} \leq 5 A$$

где V_{CC} : положительное напряжение питания

V_{EE} : отрицательное напряжение питания

R_g : сопротивление затворного резистора

$R_{g\ int}$: внутреннее сопротивление затвора IGBT (для некоторых силовых модулей; указывается в документации).

Ограничение 2: Предотвращение явления колебаний в затворе IGBT

На рисунке 6 приведена эквивалентная схема включения затвора IGBT с учётом паразитных составляющих.

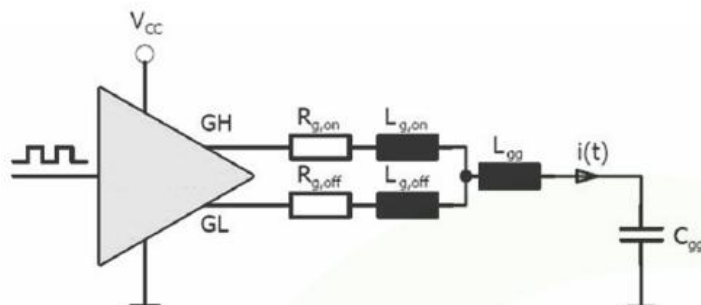


Рисунок 6 – Типичная модель цепей управления затвором IGBT

Паразитная индуктивность контурных цепей неизбежно влияет на сигнал управления. Чтобы упростить анализ, как показано на приведенном выше рисунке, предположим, что $R_g = R_{g,on} = R_{g,off}$ и $L_g = L_{gg} + L_{g,on} = L_{gg} + L_{g,off}$. Тогда получаем схему RLC второго порядка, формула которой приведена ниже:

$$L'_g \times \frac{d^2 i(t)}{dt} + R'_g \frac{di(t)}{dt} + \frac{i(t)}{C_{gg}} = 0$$

Чтобы избежать колебаний, необходимо придерживаться формулы:

$$R'_g = R_g + R_{g \text{ int}} > 2\sqrt{L_g / C_{gg}}$$

То есть, в соответствии с двумя вышеуказанными ограничениями сопротивление затвора должно находиться в пределах некоторого диапазона. И после расчёта значения R_g следует протестировать и верифицировать эти два ограничивающих условия.

2.4 Практическое значение сопротивления затворного резистора

В общем случае, если пиковый выходной ток драйвера увеличится, или если R_g уменьшится, то, соответственно, увеличится звон (колебания) на переключении. С другой стороны, потери при переключении будут уменьшаться при увеличении скорости включения и выключения. Таким образом, необходимо придерживаться некоего оптимального затворного сопротивления. Например, для IGBT 12-го класса значения сопротивления затворного резистора, как правило, соответствуют таблице 1.

Таблица 1 – Типовые значения сопротивления затворного резистора

Ток IGBT, А	50	100	200	300	600
Rg, Ом	10...20	5...10	4...8	3...6	2...3

2.5 Мощность затворного резистора

На рисунке 7 приведены диаграммы включения/выключения по току/напряжению.

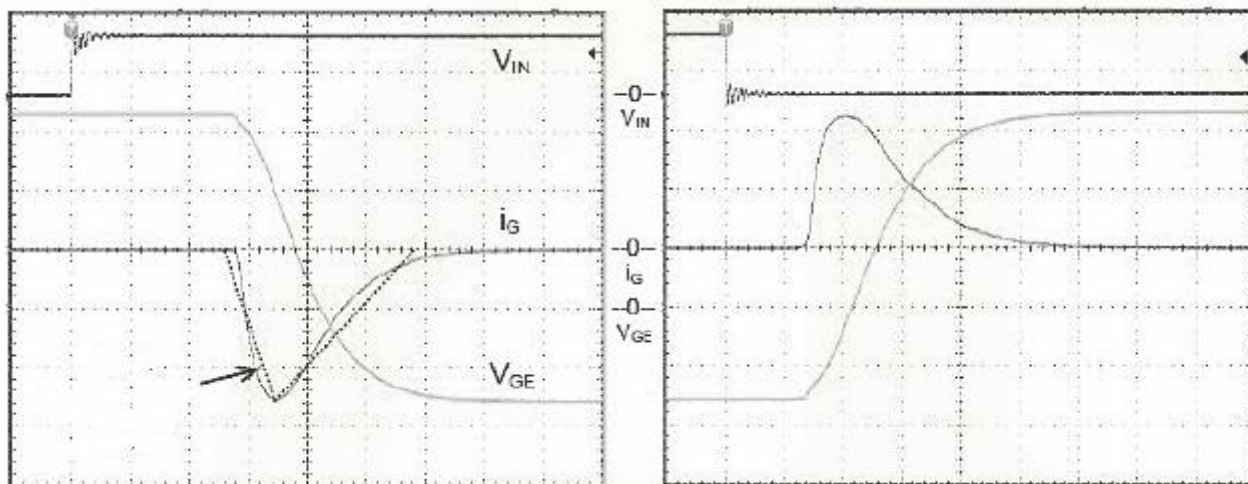


Рисунок 7 – Диаграммы включения и выключения

После расчёта сопротивления затворного резистора необходимо определиться с его мощностью. Как показано на приведенных выше диаграммах, форма сигнала тока затворного резистора напоминает прерывистую треугольную волну. При этом импульсы заряда и разряда выглядят одинаково в противоположных направлениях (если установлен один общий резистор на включении/выключении). Предполагая, что коэффициент заполнения сигнала IGBT равен 0,5, пиковый ток I_{peak} , длительность импульса t_p , то формулы действительного значения тока затвора и мощности резистора следующие:

$$i_{g(RMS)} = i_{peak} \sqrt{\frac{2 \times t_p \times f}{3}}, \quad P = \frac{2}{3} \times i_{peak}^2 \times t_p \times f \times R_g$$

Где $i_{g(RMS)}$: допустимое значение тока затвора

i_{peak} : пиковый ток затвора, измеренный с помощью теста

t_p : длительность импульса, измеренная тестом

f : частота переключения IGBT

R_g : сопротивление затворного резистора

2.6 Выходная мощность IGBT-драйвера

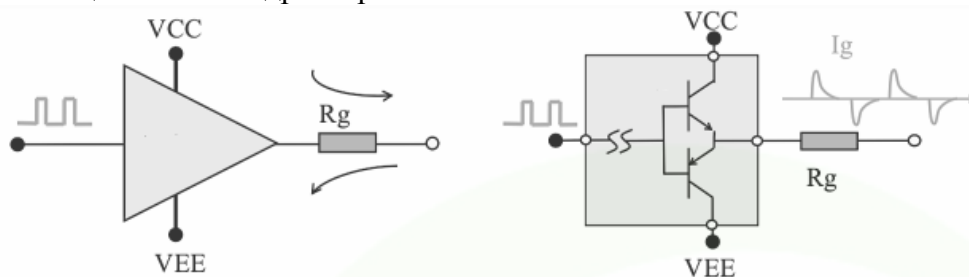


Рисунок 8 – Характеристики выхода драйвера IGBT

2.6.1 Мгновенная мощность (ток)

Ток выхода драйвера пульсирующий, т.к. затвор – это, фактически, емкостная нагрузка. Зачастую для драйвера IGBT значение $I_{g\text{ imp}}$ должно находиться в пределах ограниченного диапазона, в противном случае драйвер может перегреться или выйти из строя. Это значение выбирается исходя из ограничения 1 для затворного резистора.

2.6.2 Средняя выходная мощность (ток)

Средняя выходная мощность IGBT-драйвера, необходимая для управления конкретным транзистором, является одной из основных характеристик и может быть рассчитана по формуле:

$$I_g = Q_g \times f$$

$$P_g = (V_{CC} - V_{EE}) \times I_g$$

Где I_g : средний ток затвора IGBT

V_{CC} : положительное напряжение питания

V_{EE} : отрицательное напряжение питания

Q_g : заряд затвора (приводится в документации на транзистор).

2.6.3 Частота переключения управляющего сигнала

Независимо от того, является ли DC/DC-преобразователь отдельным узлом или он встроен в драйвер, I_g , рассчитанный по формуле выше, должен обеспечиваться положительным и отрицательным каналами драйвера IGBT.

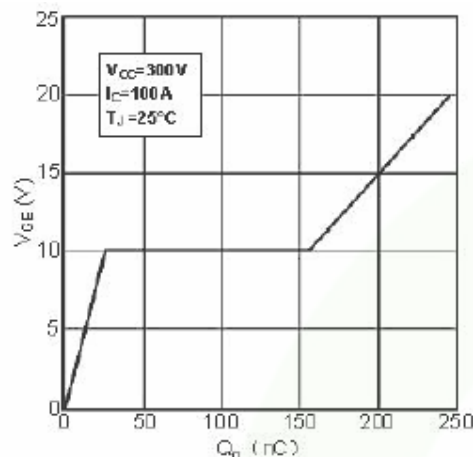


Рисунок 9 – Типовой заряд затвора

На рисунке 9 IGBT-транзистор имеет заряд затвора 200 нС при питании 0...15 В. Согласно с характеристики IGBT, в диапазоне ниже 0 В эффект Миллера отсутствует. Следовательно, его наклон, соответственно, должен быть равен 0...10 В.

Например:

0...15 В: заряд затвора IGBT составляет 200 нС

-10...0 В: заряд IGBT составляет 25 нС.

Колебание напряжения -10 В/+15 В и частота переключения 20 кГц, тогда средний выходной ток драйвера составляет 4,5 мА. В этих условиях потребляемая мощность IGBT составляет 0,1125 Вт.

2.7 Выбор выходного конденсатора

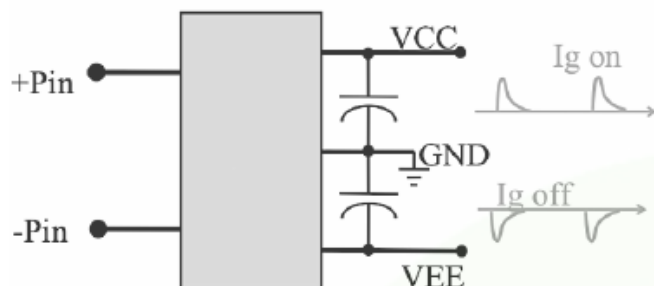


Рисунок 10 – Ток нагрузки источника питания для IGBT-драйвера

При пульсирующей нагрузке IGBT-драйвера мгновенный ток достаточно высок, чтобы генерировать пульсации выходного напряжения, которые будут добавляться к сигналу затвора и вызывать искажения. Чем меньше пульсация, тем выше будет SNR (отношение сигнал/шум) управляющего сигнала. В свою очередь, пульсации уменьшаются, в частности, за счёт увеличения ёмкости конденсаторов. Рекомендуется, чтобы параллельные конденсаторы были подключены к положительному и отрицательному источникам питания, чтобы обеспечить стабильность напряжения. Ниже приведены некоторые рекомендации:

2.7.1 Ёмкость и ESR

Пульсации на выходе IGBT-драйвера связаны с выходной емкостью и ESR. Снижение пульсаций на выходе источника питания (пиковое напряжение менее 200 мВ) может быть достигнуто только за счет:

$$C \geq C_{\min} = \frac{i_g \times dt}{\Delta U} = \frac{Q}{\Delta U} \quad ; \quad R_c \leq R_{c \max} = \frac{\Delta U}{I_{g_peak}}$$

Возьмем в качестве примера IGBT с емкостью заряда и разряда затвора 2500 нС, в наихудшей ситуации ток достигнет $\pm 5\text{A}$ при напряжении затвора $+15/-10\text{V}$. Чтобы пульсации источника питания были меньше 200 мВ, эквивалентная емкость должна составлять не менее 10 мкФ, а ESR - не более 5 Ом. Но приведенные выше формулы учитывают только пульсации, другие факторы также могут привести к увеличению пульсаций напряжения и должны приниматься во внимание.

2.7.2 Максимальный пульсирующий ток

Высокий пульсирующий ток может повлиять на срок службы электролитического конденсатора. Таким образом, конденсаторы следует правильно использовать в соответствии с документацией. Согласно формуле тока затворного резистора, пульсирующий ток каждого электролитического конденсатора должен быть:

$$i_{RMS} = i_p \sqrt{\frac{t_p \times f}{3}}$$

Вышеуказанные значения могут быть измерены тестом, но допустимое значение пульсирующего тока должно быть ниже расчетного.

2.8 Принцип обнаружения неисправностей и обратной связи

Под неисправностью подразумевается короткое замыкание в нагрузке IGBT-транзистора. При этом транзистор выйдет из состояния насыщения и его V_{ce} быстро возрастет, что приведет к недопустимой мощности рассеивания на IGBT. Чтобы избежать этого, транзистор должен быть выключен и его управление на некоторое время заблокировано.

Устойчивое время короткого замыкания ограничено энергией рассеяния IGBT. Соответствующее номинальное значение приведено в техническом описании. В общем случае, если напряжение на затворе составляет 15 В, то транзистор следует отключить в течение не более 10 мкс после его выхода из состояния насыщения, чтобы избежать выхода из строя.

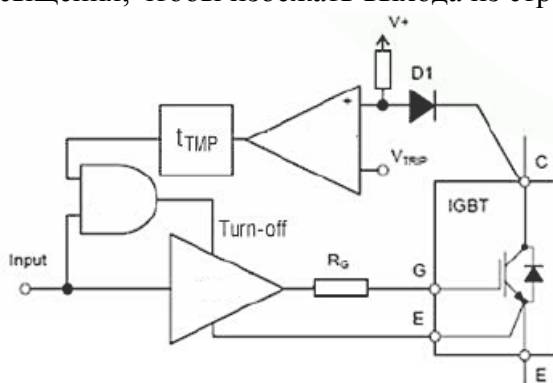


Рисунок 11 – Принцип обнаружения неисправностей и обратной связи

Приведенная схема на рисунке 11 показывает принцип обнаружения неисправности и обратную связь по ней. Драйвер определяет коллекторный потенциал модуля IGBT с помощью блокировочного диода D1 с быстрым восстановлением. Когда входной сигнал находится на высоком уровне (IGBT включен) и как только V_{ce} превысит номинальное значение, компаратор переключится, что приведёт к блокировке на время t_{TMR} . Данная схема имеет характеристики:

Временная задержка обнаружения короткого замыкания: защита не работает, если ненасыщение прекратится в течение данного периода.

Время плавного отключения: для безопасного выключения IGBT драйвер формирует плавное снижение напряжения в затворе.

Время сброса защиты: драйвер блокирует управление транзистором на заданное время, после чего сбрасывает блокировку и управление разрешается.

На рисунке 12 приведена временная диаграмма срабатывания защиты по ненасыщению.

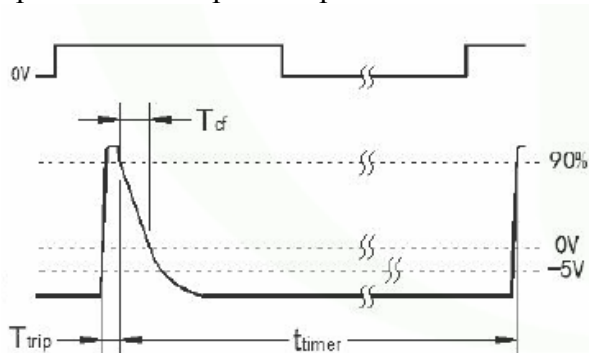


Рисунок 12 – Диаграмма срабатывания защиты по ненасыщению

2.8.1 Временная задержка обнаружения короткого замыкания (T_{trip})

Определение: Время, в течение которого напряжение на затворе IGBT остается высоким в состоянии неисправности (отключения)

Функция: Если V_{ce} не уменьшится вовремя в начале включения IGBT, то это приведет к ошибочному срабатыванию защиты от короткого замыкания. Чтобы избежать этого, драйвер обладает задержкой на срабатывание защиты.

2.8.2 Время плавного выключения (T_{cf})

Определение: Время, в течение которого напряжение на затворе IGBT снижается до 0 В в состоянии неисправности.

Функция: Как только произойдет короткое замыкание, IGBT, из-за индуктивного выброса, может выключиться с недопустимым превышением напряжения на коллекторе. Плавное отключение помогает избежать этого эффекта и обеспечивает безопасное выключение в режиме КЗ.

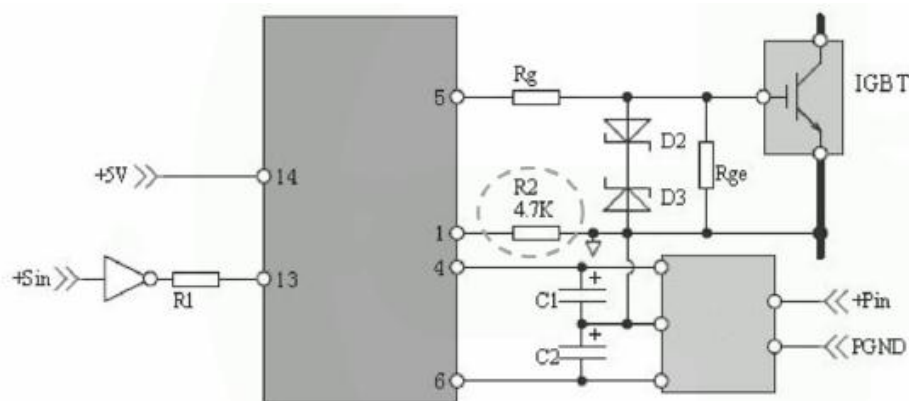
Как правило, IGBT-транзистор выдерживает короткое замыкание в течение 10 мкс, тогда указанные времена должны соответствовать формуле $T_{trip} + T_{cf} \leq 10$ мкс.

2.8.3 Время сброса защиты (T_{timer})

Определение: Время, прошедшее с момента отключения IGBT до следующего сброса в состоянии неисправности (таймер).

Функция: После срабатывания защиты драйвер самостоятельно восстанавливает нормальную работу без внешнего сброса. Длительность блокировки для разных драйверов составляет 1...1000 мс.

2.8.4 Методы отключения защиты по ненасыщению



Где назначение выводов:

- 1: Вход контроля напряжения насыщения
- 4: Вход положительного напряжения питания
- 5: Выходной сигнал
- 6: Вход отрицательного напряжения питания
- 8: Выход статусного сигнала защиты по ненасыщению
- 13: Вход отрицательного сигнала управления
- 14: Вход положительного сигнала управления

Рисунок 13 – Способ отключения защиты по ненасыщению

Для большинства драйверов допускается подключение измерительного коллектор на эмиттер накоротко. Отключение защиты может потребоваться в следующих случаях:

- Проверка и пересмотр системы, работы по отладке преобразователя;
- В преобразователе имеются свои схемы защиты от КЗ и перегрузки;
- Контроль падения напряжения осуществляет один из группы драйверов.

2.9 Защита от пониженного напряжения в затворе

Защита от пониженного напряжения предназначена, прежде всего, для обеспечения закрытого состояния транзистора при подаче/снятии питания драйвера. А так же, в случае если система электропитания выйдет из строя, что приведёт к снижению напряжения управления, т.к. это может привести к выходу транзистора из состояния насыщения, что является аварийной ситуацией.

Во время включения и выключения драйвера неизбежно медленное повышение напряжения. В течение этого времени напряжение источника питания ниже нормального и не соответствует требованиям управления. Защиты от пониженного напряжения блокирует выход драйвера, тем самым защищая транзистор от некорректного управления.

3. Дополнительные рекомендации

3.1 Проверка корректного функционирования драйвера

Данную проверку рекомендуется проводить на опытном образце преобразователя после установки всех настроечных элементов драйвера. Рекомендуется следующая последовательность проверки:

3.1.1 Проверка внешнего источника питания драйвера (если питание внешнее)

Контролируется напряжение включения/выключения и рекомендуется прогон длительностью не менее 1 часа с контролем напряжений и температуры DC/DC-преобразователя.

3.1.2 Проверка управляющего сигнала

Контролируется напряжение включение/выключение и длительность фронтов в затворе (сравнение с ожидаемой длительностью). Так же рекомендуется прогон с контролем температуры затворных резисторов. Дополнительно можно измерить амплитуду импульсного тока, если это значение критично.

3.1.3 Проверка функции защиты

Следует отключить измерительный коллектор от транзистора, подключить к нему источник постоянного напряжения. В штатной работе драйвера плавно увеличить напряжение внешнего источника до момента срабатывания защиты. Измерить напряжение срабатывания, длительности задержки срабатывания, плавного выключения, блокировки. Сравнить с расчётными значениями. В процессе проверки убедиться в наличии статусного сигнала срабатывания защиты.

3.1.4 Проверка дополнительных функций

Если драйвер выполняет дополнительные функции, такие как формирование «мёртвого» времени, блокировка по внешнему сигналу, контроль напряжения питания с выдачей статуса и т.д., то рекомендуется убедиться в их корректном функционировании и соответствии настроечных значений расчётным.

3.2 Шум на переключении IGBT

Колебания тока/напряжения коллектора влияют на обнаружение неисправности драйвера IGBT. Поскольку это может привести к неправильному срабатыванию функций защиты, вызванному переходным значением сигнала (которое на самом деле накладывается на определенный шум переключения), то подавление шума иногда может оказаться необходимым.

На этапе проектирования, при необходимости, рекомендуется регулировать задержку обнаружения короткого замыкания, а так же напряжение срабатывания защиты.

Если этих мер недостаточно, то скорее всего в преобразователе имеется сквозной ток при переключении транзисторов из-за воздействия dv/dt . На рисунке 14 приведён принцип возникновения неправильного переключения транзисторов.

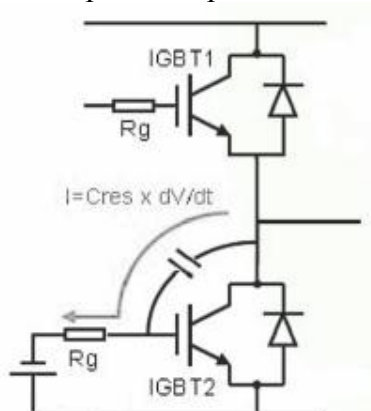


Рисунок 14 – Принцип неправильного переключения транзисторов

Основной диод IGBT 2 находится в состоянии обратного восстановления, и его напряжение увеличивается. Это изменение во времени обозначается как dv/dt . Ток I равен C_{res} (проходная ёмкость транзистора), умноженная на dv/dt , что приводит к увеличению напряжения на затворе через сопротивление R_g затвора. Как только напряжение на затворе превысит пороговое напряжение транзистора, произойдет нештатное включение IGBT 2 и, как следствие, возникнет сквозной ток.

В данной ситуации рекомендуется:

- Дополнительно установить параллельный конденсатор между затвором и эмиттером (рекомендуемое значение: $< 0,1 \times C_{ge}$);
- Увеличить сопротивление затворного резистора, для снижения dv/dt ;
- Увеличить амплитуду отрицательного напряжения на затворе.

3.3 Меры предосторожности

- Не допускается использовать внутренний или внешний DC/DC-преобразователь драйвера в качестве источника питания схемы управления.
- Длина провода, соединяющего драйвер и IGBT, должна быть не более 1 м, а в оптимальном случае не более 0,25 м.
- Провода, соединяющий драйвер и затвор-эмиттер транзистора, должен быть витой парой.
- Соответствующее сопротивление затвора может быть увеличено, чтобы уменьшить бросок напряжения в коллекторе IGBT при выключении.
- Внешние настроечные конденсаторы или резисторы драйвера должны находиться рядом с драйвером, а выбранные значения должны находиться в пределах допустимых диапазонов.
- Рекомендуется выбирать конденсаторы по питанию драйвера с низким ESR и размещать их рядом с драйвером.
- Обратное напряжение блокировочного диода D1 (рисунок 4) должно быть гарантированно выше пробивного напряжения силового транзистора. При необходимости следует установить диоды последовательно для повышения обратного напряжения.