Обухов Д.В., Санталов А.М., Стенин С.Л., Струнин Д.В., Хоцянова О.Н.

Драйверы для полевых и IGBT транзисторов.

Ведущие производители силовой электроники предлагают широкий спектр изделий, начиная с дискретных приборов, модулей и драйверов к ним, и заканчивая готовыми преобразователями. Разработчики силовой электроники все чаще обращаются к готовым техническим решениям, однако они по-прежнему сталкиваются с проблемой выхода из строя мощных дорогих ключей при аварийных режимах. Сделав небольшие изменения в подключении серийных драйверов, можно существенно повысить эффективность работы защиты при аварийных режимах.

В таблице 1 приведены характеристики используемых в настоящее время драйверов для полевых и IGBT транзисторов.

Таблица 1. Характеристики драйверов.

Тип драйвера	Выходной ток, в А		Защита ключа от КЗ	Функциональные характеристики	Фирма изготовитель
	Вытека-ющий	Втека-ющий			
1	2	3	4	5	6
IR2110	2	2	нет	драйвер двух ключей	International Rectifier
IR2121	1	2	Порог 230 мВ	драйвер одного ключа	International Rectifier
IR2127	0,2	0,42	порог 250 мВ	плавающий потенциал эмиттера	International Rectifier
HCPL-3120	2	2	нет	оптоизолированный вход	Agilent (Hewlett Packard)
HCPL-314J	0,4	0,4	нет	два оптоизолирован-ных драйвера	Agilent (Hewlett Packard)
HCPL-316J	2	2	Порог 7 В	оптоизолированный вход	Agilent (Hewlett Packard)
UC3710	6	6	нет	высокоскоростной драйвер	Unitrode
MAX4420	6	6	нет	высокоскоростной драйвер	Maxim
SKAI100	1,5	1,5	есть	полнофункциональная плата драйвера	Semikron
SKHI22	8	8	есть	гибридный модуль с двумя драйверами	Semikron
SKHI24	15	15	есть	гибридный модуль с двумя драйверами	Semikron
L6353	6	6	порог регули-руется	кристалл имеет защиту от перегрева	STMicroelectronics

Продолжение таблицы 1.

Обычно в драйверах силовых ключей защита от перегрузки по току строится на контроле напряжения насыщения транзистора. При каждом срабатывании защиты происходит локальный перегрев кристалла. Величина теплового напряжения зависит от значения тока, при котором срабатывает защита, и времени протекания этого аварийного тока через ключ, то есть от быстродействия драйвера. В технических характеристиках на транзистор указывается допустимое число срабатываний защиты на КЗ. Например, для IGBT модуля SKM400GB125D фирмы Semikron допустимое число срабатываний на КЗ меньше 1000.

В данной статье проведен анализ и сравнение двух интегральных драйверов: драйвер фирмы Agilent HCPL-316J, и микросхема L6353 фирмы STMicroelectronics. Прежде чем перейти к конкретным схемам, разберем основные проблемы, которые возникают при разработке силовых преобразователей.

Задача драйвера - обеспечить работу силового ключа в области безопасных режимов. Для IGBT транзисторов эта область прямоугольная, с ограничением мощности, накладываемым перегревом кристалла.

Рассмотрим алгоритм работы идеального драйвера:

1. После подачи сигнала управления драйвер должен обеспечить оптимальное включение транзистора
2. При переходе транзистора из закрытого состояния в открытое невозможно контролировать его выход из насыщения. В этот промежуток времени t_d необходим запрет на срабатывание защиты.
3. По истечении интервала времени t_d драйвер должен контролировать уровень падения напряжения на открытом транзисторе (обозначается Vcesat).
4. При превышении значения Vcesat установленного порога драйвер должен "мягко" запирать силовой транзистор и выдавать сигнал ошибки.

Большинство драйверов имеют упрощенные схемы, не позволяющие реализовать запрет на срабатывание защиты в интервал времени t_d. Вместо этого на измерительном входе драйвера используют интегрирующую цепь. **Такие драйверы имеет гарантированное время запаздывания на срабатывание защиты в течение которого нарастает аварийный ток. Избавившись от этого запаздывания можно уменьшить тепловой удар при аварии, увеличив тем самым срок службы транзистора.**

Кроме тепловых ударов по кристаллу, на полевых и IGBT транзисторах необходимо устранять перенапряжения на коллекторе при выключении. В случае аварийного отключения необходимо выключать транзистор "мягко", поскольку при больших скоростях спада тока происходит уменьшение рабочего напряжения ключа из-за наличия паразитных индуктивностей в цепи коллектора. Выходная область безопасных режимов для разных скоростей выключения при КЗ показана на рис. 1 на примере модуля SKM400GB125D.

При скорости выключения 5000 А/мкс и индуктивности цепи коллектора меньше 25 нГн происходит уменьшение допустимого напряжения шины питания с 1200 В до 1100 В. Для минимизации паразитных индуктивностей необходимо максимально близко к выводам модуля размещать снабберные цепи. Например, собственная индуктивность снабберного конденсатора 940C6P68K составляет 23 нГн. Целесообразно, если позволяет конструкция, использовать конденсаторы, которые крепятся непосредственно к выводам модуля, например снабберные конденсаторы типа PMB (каталог Dacpol) или SCD (каталог Richardson Electronics). Их заявленная собственная индуктивность менее 20нГн.

Помимо работы снабберных цепей эта проблема может быть решена за счет драйвера. На рис. 2 показана внутренняя структура микросхемы HCPL-316J.

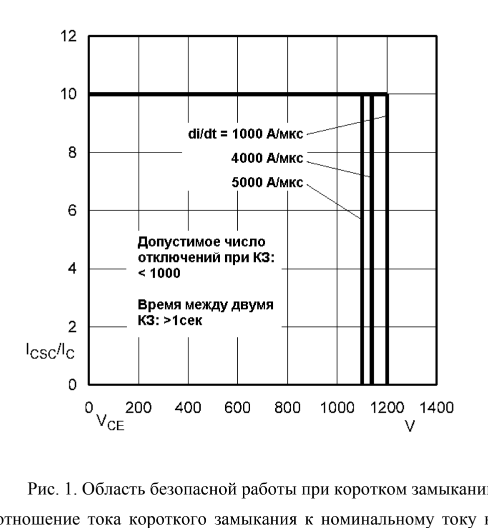

Рис. 1. Область безопасной работы при коротком замыкании.

Icsc/Ic – отношение тока короткого замыкания к номинальному току коллектора, Vce – допустимое напряжение на коллекторе транзистора.

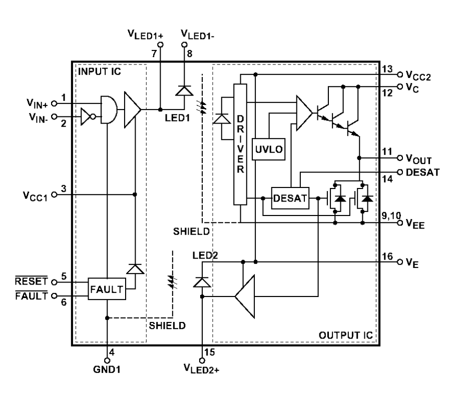

Рис. 2. Внутренняя структура микросхемы HCPL-316J.

Слева показаны входы управления, справа – оптически развязанный выходной каскад драйвера.

В таблице 2 приведено назначение выводов этой микросхемы.

Таблица 2. Назначение выводов микросхемы HCPL-316J.

Вывод	*Назначение вывода*
Vin+	Прямой вход управления
Vin-	Инверсный вход управления
Vcc1	Вход питания цепей управления на первичной стороне (4.5- 5.5В)
GND1	"Земля" управления.
RESET	Сброс сигнала ошибки.
FAULT	Выход сигнала ошибки (открытый коллектор)
Vled1+	Не подключается. Используется для тестов микросхемы.
Vled1-	Должен подключаться к земле.
Ve	Общий вывод (подключается к эмиттеру силового транзистора)
Vled2+	Не подключается. Используется для тестов микросхемы.
DESAT	Вход диагностики выхода транзистора из насыщения.
Vcc2	Положительное напряжение питания вторичной стороны.
Vc	Коллектор выходного каскада из трех транзисторов по схеме Дарлингтона.
Vout	Выход на затвор силового ключа.
Vee	Отрицательное напряжение питания вторичной стороны.

Драйвер фирмы Agilent HCPL-316J имеет функцию "мягкого" выключения. На рис.3 схематично показаны осциллограммы напряжений при аварийном выключении транзистора.

Когда напряжение Vdesat на входе DESAT превышает значение (7±0,5) В, напряжение на затворе Vout начинает плавно, в течение 2-3 мкс, уменьшаться до нуля, затем резко спадает до отрицательного уровня питания драйвера Vee. При таком способе выключения скорость спадания тока di/dt небольшая, и, соответственно, на паразитных индуктивностях силовой схемы возникают

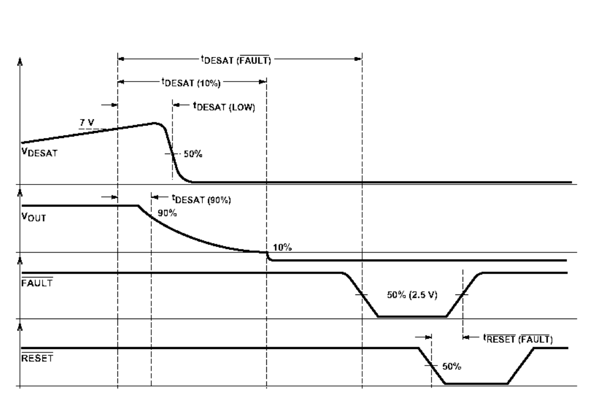

Рис. 3. Осциллограммы на HCPL-316J при аварийном выключении транзистора.

небольшие перенапряжения.

К недостаткам драйвера L6353 фирмы STMicroelectronics следует отнести отсутствие встроенной функции мягкого выключения, эта функция реализуется с помощью дополнительных элементов.

Поскольку выключение транзистора при аварийных токах есть главная задача драйвера, остановимся на этом режиме подробнее. На рис.4 показана стандартная схема подключения драйвера HCPL-316J.

В микросхеме к выводу DESAT подключены источник вытекающего тока на 250 мкА, транзистор для разряда конденсатора Cdst (на рис. 4 его емкость равна 100 пФ), и компаратор, сравнивающий напряжение Vdesat с значением (7±0,5) В. В закрытом состоянии ключа напряжение Vout на затворе силового транзистора равно значению напряжения на отрицательной шине питания драйвера (в данном случае -5 В), а конденсатор Cdst разряжен внутренним транзистором драйвера до нуля. В момент подачи сигнала на открытие ключа, выход Vout подключается к напряжению Vc. При этом на выводе Vout значение напряжения будет на 2В меньше, чем значение напряжения на выводе Vc. Это объясняется наличием в структуре выходного каскада драйвера трех транзисторов, включенных по схеме Дарлингтона. Нужно внимательно подбирать напряжение питания Vc, исходя из желаемой степени насыщения силового транзистора. Рекомендуется запитывать выходной каскад драйвера напряжениями +18 В и -5 В.

При поступлении сигнала на включение силового транзистора, конденсатор Cdst начинает заряжаться от внутреннего источника тока. Силовой транзистор во включенном состоянии этот конденсатор разряжает через отсекающий диод Ddesat. Напряжение на выводе Vdesat при этом определяется как сумма падения напряжения на диоде Ddesat (при токе 250 мкА значение падения напряжения имеет серьезный разброс), и напряжения Vcesat. В таблице 3 для сравнения приведены падения напряжения для двух приборов: SKM400GB125D (1200В на 400А) и SKM145GB174D (1700В на 145А), при температуре кристалла 25°C и 125°C.

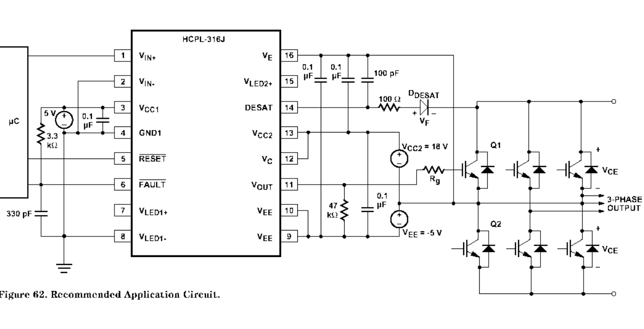

Figure 62. Recommended Application Circuit.

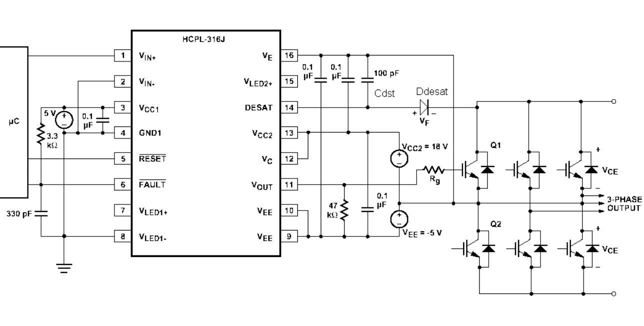

Рис. 4. Схема подключения HCPL-316J

Таблица 3.

Ток, А	Тип прибора	Падение при 25°C	Падение при 125°C
200	SKM400GB125D	2,8	3,4
400	SKM400GB125D	3,8	4,7
100	SKM145GB174D	2,7	3,2
200	SKM145GB174D	4,0	4,8

С учетом падения напряжения на диоде Ddesat, при рабочем токе ключа, мы получим значение напряжения на выводе Vdesat 3...5 В. Как показывет практика, для простых преобразователей, где не принципиально при каком токе нужно выключать транзистор, можно не подбирать защитное напряжение. Но в ряде случаев при подборе защитных цепей нужно проявить особый подход, например, при разработке преобразователей частоты для вентильного или синхронного двигателей с постоянными магнитами. В таких электроприводах сбой в работе системы управления может вызвать неправильную коммутацию силовых ключей и размагничивание ротора. При этом, грамотно разработав драйвер силовых ключей, можно отказаться от установки датчиков токов на выходных фазах.

На рис. 5 показана осциллограмма напряжения на выводе Vdesat (красным цветом, к нему же относится и шкала напряжений) и сигнал ошибки (синим цветом). Осциллограмма снята с драйвера L6353 фирмы STMicroelectronics. Преобразователь - трехфазный мостовой инвертор.

Порог срабатывания драйвера L6353 настроен на значение напряжения 7,5 В. При рабочем токе среднее значение напряжение на выводе Vdesat равно 5,5...6 В, но, дополнительно, на него накладывается сигнал помехи. В случае, показанном на рис. 5, помеха наводилась при включении другого ключа трехфазного инвертора. На осциллограмме видно, что уровень помехи такой, что срабатывает защита драйвера. У драйвера L6353 заявленное время на выключение и выработку сигнала ошибки менее 400 нс. В рассматриваемом случае это время больше, возможно, из-за небольшой разницы напряжений порога и измеряемого Vdesat. После срабатывания защиты (синий сигнал на рис.5) виден начальный процесс

Рис. 5. Осциллограмма напряжения на выводе Vdesat

выключения силового ключа (значение напряжения на конденсаторе Cdesat растет до 12 В), затем внутренний транзистор драйвера L6353 этот конденсатор разряжает до нуля. Помеху можно задавить простыми мерами, увеличив значение емкости Cdesat, что приведет к увеличению задержки на аварийное отключение. Поскольку нас этот вариант не устраивает, разберем причины возникновения этой помехи на выводе Vdesat.

Основная причина – длинные провода от драйвера до затвора силового транзистора. Два провода, идущие на затвор и эмиттер, должны обязательно быть витой парой, а их длина - минимальной. В одном из разработанных коллективом авторов преобразователе на 65 кВт вышеуказанная проблема была решена уменьшением длины этих проводов с 9 до 5 сантиметров. Если эти провода длинные или неплотно перевиты, то при больших скоростях переключения транзисторов и высоких рабочих напряжениях на провода затвора и эмиттера наводится помеха. Чем больше контур, тем больше изменения напряжения на затворе. Изменения отражаются на коллекторе транзистора, поскольку степень его насыщения зависит от напряжения на затворе. Длина проводов более 10 сантиметров нежелательна. Кроме уменьшения длины, целесообразно резистор Rg (рис. 4) располагать непосредственно на затворе транзистора, а не рядом с драйвером. При таком расположении наводка на затвор существенно уменьшается.

Еще один фактор, влияющий на уровень помехи на измерительном входе DESAT – наводка на провод, идущий от коллектора транзистора на отсекающий диод Ddesat. В драйвере HCPL-316J ток смещения отсекающего диода Ddesat равен 250 мкА. Любая наводка вызывает существенное изменение падения напряжения на диоде Ddesat. Для преобразователей мощностью свыше 10 кВт ток смещения нужно иметь в диапазоне 2...5 мА. Необходимо проектировать преобразователь таким образом, чтобы длина всех проводов, соединяющих транзистор с драйвером, была минимальна. Для мощных ключей, например, FF400R12KL4C, можно проектировать драйвер с непосредственным креплением к выводам модуля.

На рис. 6 представлена разработанная авторами схема подключения драйвера на микросхеме HCPL-316J. В таком виде он используется для ключей SKM400GB125D в преобразователе частоты на 65 кВт, частота переключений – 200 Гц.

Основные отличия от стандартной схемы, приведенной на рис. 4:

- Увеличение тока смещения диода Ddesat (VD2 на рис. 6) за счет резистора R1.
- Уменьшение порога срабатывания защиты за счет стабилитрона VD1.
- Бланкирование при включении силового ключа. Перед включением транзистора значение напряжения на конденсаторе C3 равно минус 12 В (разряжается через резистор R5). При включении транзистора через резисторы R1 и R5 в течение 3...4 мкс происходит заряд конденсатора C3 до 7В, в это время защита не срабатывает. После заряда конденсатора до значения, превышающего порог срабатывания (7±0,5) В, измеряемое напряжения Vcesat по цепи VD2-VD1-R2-VD3 поступает на вход драйвера DST. При этом, конденсатор C2 выполняет роль фильтра этого сигнала. Для исключения подачи на измерительный вход DST отрицательного напряжения использован диод VD3, левое плечо. Чтобы внутренний источник тока не зарядил конденсатор C2 до напряжения, превышающего порог срабатывания 7 В, он шунтирован резистором R8. От внутреннего источника тока, при сопротивлении R8 равном 10 кОм, конденсатор может зарядиться не более чем до 2.5 В, что ниже порога срабатывания защиты.

Драйвер HCPL-316J может заряжать затвор силового транзистора током 2 А. В схеме приведенной на рис. 6 этот ток ограничен при помощи резистора R4.

Цепи управления HCPL-316J имеют ТТЛ уровни, оптически развязаны с выходным каскадом. Драйвером можно управлять как прямым, так и инверсным сигналами (входы Vin+ и Vin-). В схеме на рис.5 использовались оба сигнала, поскольку входные цепей выполнены так, чтобы исключить включение двух транзисторов в стойке. Если возможен выбор между полярностью управления, то рекомендуем в микросхеме HCPL-316J использовать инверсный вход, как наиболее помехоустойчивый.

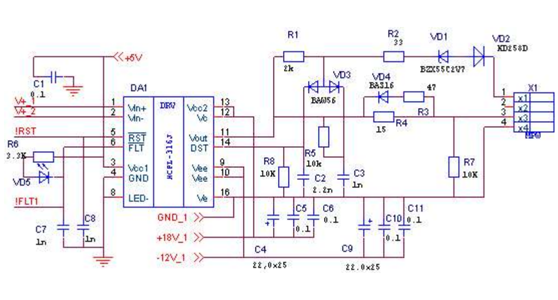

Рис. 6. Рекомендуемая схема подключения HCPL-316J.

Так как входы и выходы драйвера HCPL-316J находятся под воздействием быстро изменяющихся потенциалов, через паразитные емкости внутренних оптронов могут наводиться серьезные помехи. Рекомендуем шунтировать выход FLT сигнала ошибки емкостью 470...1000 пФ.

Рассмотрим драйвер L6353. Его структурная схема приведена на рис. 7.

Драйвером L6353 можно управлять прямым или инверсным сигналами и даже сигналом с обмотки импульсного трансформатора. В таблице 4 приведено назначение выводов микросхемы L6353. Выход на затвор разделен на два вывода, открывающий OUT1 и закрывающий OUT2. Это позволяет не использовать диод, в случае, когда требуется иметь разные номиналы резисторов на окрытие и на закрытие силового ключа.

Таблица 4. Назначение выводов микросхемы L6353.

Вывод	*Назначение вывода*
OUT1	Выход, с которого подается на затвор силового ключа положительное напряжение.
Vcc	Положительное напряжение питания.
Vpos	Коллектор выходного каскада.
CLAMP_PROG	Программируется порог напряжения на затворе при "мягком" включении.
INV-OUT	Инверсный выход, позволяет подключать драйвер противофазного ключа.
ALARM	Выход сигнала ошибки.
MON_DELAY	Программируется длительность "мягкого" включения. В это время не диагностируется выход ключа из насыщения.
Vref	Внутренний источник опорного напряжения 5В/10мА.
INPUT	Сигнал управления. Имеет логические уровни, может быть прямым, инверсным, реагирует на сигналы импульсного трансформатора.
DELAY	Время задержки перед включением силового транзистора. Может использоваться для программирования «мертвого времени».
SELECT	Используется для выбора входного сигнала (прямой, инверсный, от трансформатора)
ON_LEV_PROG	Установка порога напряжения для защиты ключа от выхода из насыщения.
ON_SENSE	Аналогичен входу DESAT. Отслеживает напряжение на ключе. Если оно превышает установленный порог- вырабатывается сигнал ошибки.
Vss	Отрицательное напряжение питания.
COM	Земля.
OUT2	Выход, с которого подается на затвор силового ключа отрицательное напряжение

В отличие от драйвера HCPL-316J микросхема L6353 не имеет гальванической развязки, однако она более функциональна и имеет большой выходной ток – 6 А. Кристалл этой микросхемы имеет защиту от перегрева. Когда температура кристалла превышает 130 °C, на выходе ALARM формируется сигнал ошибки. При возрастании температуры до значения 160 °C происходит выключение выходного каскада. Обе температурные защиты имеют гистерезис 20 °C. В драйвере L6353 предусмотрен режим включения силового транзистора, который в микросхеме HCPL-316J реализуется с помощью дополнительных элементов (схема на рис. 6). При помощи RC цепочки на выводе MON_DELAY задается время, в течение которого внутренняя логика игнорирует напряжение на ON_SENSE. Более того, предусмотрен механизм, позволяющий в это время подавать на затвор не полное напряжение, а запрограммированное резистивным делителем на входе CLAMP_PROG.

На рис. 8 показан процесс включения транзистора с драйвером L6353.

После подачи сигнала управления отрабатывается задержка по времени tdelay, программируемая RC цепочкой на выводе DELAY. Затем на выходе OUT1 драйвера появляется напряжение Vcl, его уровень Vcl=6xVclamp_prog. Этот уровень можно регулировать в диапазоне 7...11 В. Если вывод CLAMP_PROG не подключен, то уровень напряжения на выходе OUT1 будет равен 9 В. Этот уровень напряжения держится на выходе в течении времени tmon_delay, заданного RC цепочкой на выводе MON_DELAY. За это время силовой транзистор плавно

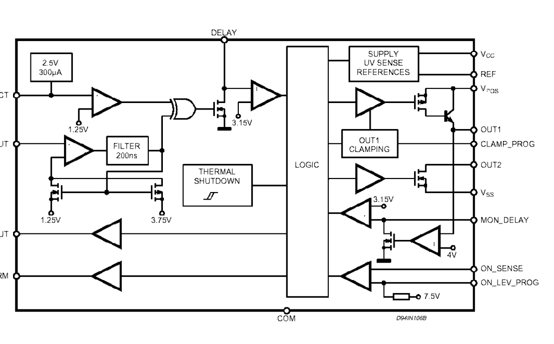

Рис. 7. Структура микросхемы L6353.

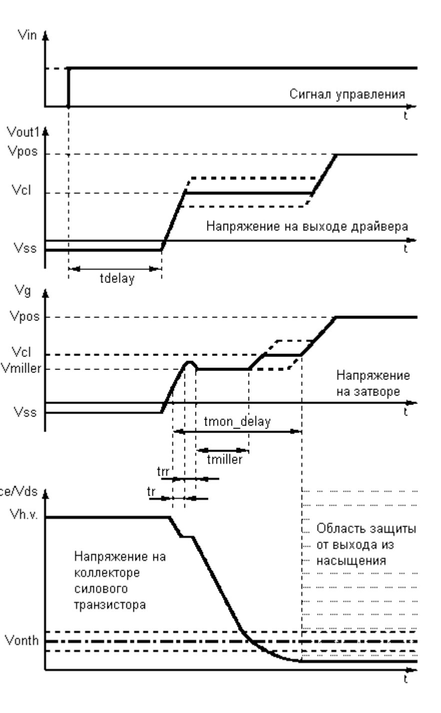

Рис. 8. Процесс включения транзистора с драйвером L6353.

включается, при этом ток через него ограничен в соответствии с поданым на затвор напряжением.

Применяя функцию программирования напряжения Vcl можно столкнуться со следующей проблемой. Если задан невысокий уровень Vcl, то у силового ключа будет затянут процесс включения, и потребуется увеличивать время tmon_delay. Кроме того, при меньшем напряжении на затворе у силового транзистора будет более высокое напряжение насыщения Vcesat. Оно может оказаться выше запланированного нами порога срабатывания защиты, но не из-за большого тока, а из-за недостаточного напряжения на затворе. В этом случае защита сработает сразу по истечении интервала tmon_delay, несмотря на то, что в этот момент на затвор подается номинальное напряжение.

По истечении времени tmon_delay начинается контроль за выходом транзистора из насыщения. Порог срабатывания защиты Vonth задается делителем на входе ON_LEV_PROG и определяется как Vonth=6xVon_lev_prog. Порог Vonth можно изменять в диапазоне 5...15 В. На практике было замечено, что при задании уровня Vonth чуть меньше 5 В внутренняя логика работы драйвера нарушается, поэтому не рекомендуем задавать его меньше 6 В. Если вывод ON_LEV_PROG не подключен, то порог защиты будет равен 7.5 В, если вывод подключить к "земле", защита отключается.

На рис. 9 представлен фрагмент схемы драйвера для транзистора FF400R12KL4C фирмы EUPEC. Силовой ключ работает в схеме понижающего регулятора мощностью 75 кВт с частотой ШИМ – 5 кГц.

Как и в драйвере HCPL-316J, напряжение насыщения контролируется через отсекающий диод. К выводу ON_SENSE внутри микросхемы подключен источник тока на 200 мкА. Ток смещения рекомендуется увеличить при помощи дополнительного резистора R1.

Элементы схемы, на которые не указаны номиналы, в данном применении на плату не устанавливались.

Порог срабатывания защиты в драйвере установлен по умолчанию на 7,5 В, а допустимое напряжение насыщения подстроено с помощью стабилитрона VD1.

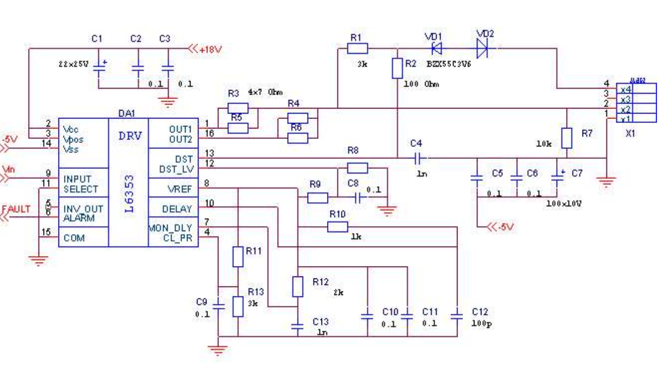

Рис. 9. Фрагмент схемы драйвера на L6353.

Предложенные схемы драйверов были испытаны в преобразователях частоты для вентильных двигателей с постоянными магнитами, мощностью 32...65 кВт.

Внешний вид этих драйверов показан на рис. 10 и рис.11 .

Работа драйверов проверена при эксплуатации в составе станций управления погружными вентильными электродвигателями центробежных насосов для добычи нефти. При испытаниях и эксплуатации станций в течение года и более отказов в работе драйверов и выхода из строя IGBT модулей не произошло.

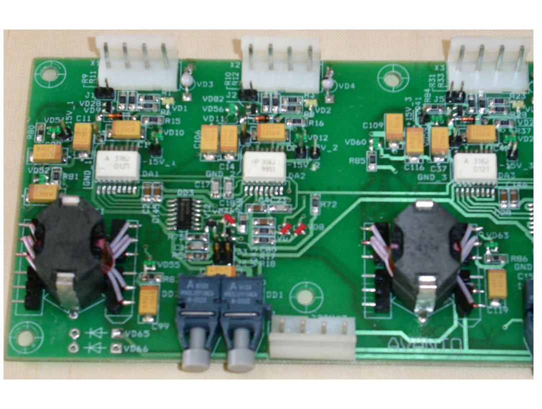

Рис. 10. Драйвер инвертора на HCPL-316J.

Рис. 10. Драйвер ключа регулятора на L6353.