

# Россыпью — хорошо, а интегрально — лучше

## Замена драйверов управления IGBT с дискретными элементами на драйверы в интегральном исполнении

Борис СЕМЕНОВ  
borka@mail.ru

**В статье описан опыт применения драйверов управления IGBT в силовой преобразовательной технике, разработанных на основе дискретных элементов. Приведены результаты замены данных драйверов на интегральные модули производства ЗАО «Электрум-АВ».**

Надежная работа электронной техники в значительной степени определяется составом элементной базы, использованной при ее разработке, а также физическим исполнением этой элементной базы. Иными словами, чем меньше номенклатура и меньшее количество элементов насчитывается в составе электронного устройства, тем надежнее его работа. Кроме этого, немаловажной для обеспечения надежности является замена дискретных узлов на узлы, выполненные в интегральном исполнении. Хорошо известно, что с появлением интегральных микросхем резко сократилось число незащищенных межэлементных электрических связей, а поэтому стало меньше причин для возникновения отказов. Красноречивое тому свидетельство — стремительное уменьшение массы и габаритов персональных компьютеров при росте их функциональных возможностей.

К сожалению, узлы силовой преобразовательной техники в большинстве случаев слабо интегрируются, что ведет к дополнительной сложности при ее разработке, производстве и эксплуатации. Однако и в этой области намечились существенные сдвиги, впрочем, в основном касающиеся схем управления. Разработаны и применяются специализированные интегрированные микроконтроллеры, формирующие управляющие последовательности, которые осуществляют плавный пуск, стабилизацию, различные виды защиты.

Однако следует признать, что элементы силовой части преобразовательной техники по настоящее время разрабатываются на основе дискретной базы, поэтому в конечном итоге качество функционирования разработки зависит не только от качества элементной ба-

зы, но и от того, насколько квалифицированно разработчик соединит эти элементы, насколько полно он учтет влияние паразитных параметров.

Одним из интересных и перспективных шагов на пути интегрирования силовой элементной базы можно считать появление отечественных драйверов управления для IGBT транзисторов и транзисторных сборок. Технические характеристики поставляемых драйверов находятся на уровне (а в чем-то даже и превосходят) лучших зарубежных разработок аналогичного плана. Тем не менее, дискретные драйверы все еще остаются достаточно популярными, поэтому мы расскажем об опыте их применения, упомянем достоинства и недостатки конкретных схемотехнических решений, опишем опыт перехода к интегральным исполнениям.

Проектируя схему управления для силовых транзисторных сборок, разработчик отлично знает, что:

- необходимо обеспечивать «плавающий» потенциал управления «верхним» силовым ключом в полумостовой схеме;
- крайне важно создать быстрое нарастание и спад управляющих сигналов, поступающих на затворы силовых элементов для снижения тепловых потерь на переключение;
- необходимо обеспечить высокую величину импульса тока управления затворами силовых элементов для быстрого перезаряда входных (затворных) емкостей;
- в подавляющем большинстве случаев нужна электрическая совместимость входной части драйвера со стандартными цифровыми сигналами ТТЛ/КМОП (как правило, поступающими от микроконтроллеров).

Первым важным событием на пути интеграции драйверов управления стало появление микросхем серий IR21XX и IR22XX, разработанных фирмой International Rectifier. Эти микросхемы нашли широкое применение в маломощной преобразовательной технике, поскольку отвечают всем вышеназванным требованиям. Редкий разработчик силовой техники сегодня не имеет опыта применения данных микросхем, поэтому тем немногим, кто такого опыта не имеет, рекомендуем обратиться, например, к книге [1] или непосредственно на сайт фирмы-производителя [2].

К величайшему сожалению, драйверы фирмы International Rectifier не удается использовать при разработке мощной преобразовательной техники. Почему? Во-первых, недостаточные для управления мощными силовыми приборами максимальные токи перезаряда входных (затворных) емкостей. Во-вторых, отсутствие гальванической развязки между управляющей и силовой частями драйверов. В-третьих, возможное возникновение эффекта защелкивания (блокировки) выходных комбинированных структур драйвера из-за наличия наведенных токов [3].

При разработке статических преобразователей с выходной мощностью 6 и 12 кВт с участием автора статьи было принято решение применить дискретные схемы драйверов. На рис. 1 показана электрическая принципиальная схема драйвера, использованного в составе трехфазного преобразователя сетевого напряжения 380 В/50 Гц в трехфазное напряжение 230 В/400 Гц с выходной мощностью 6 кВт.

Основой схемы служит оптоэлектронный драйвер D2 типа HCPL-3120, обеспечиваю-

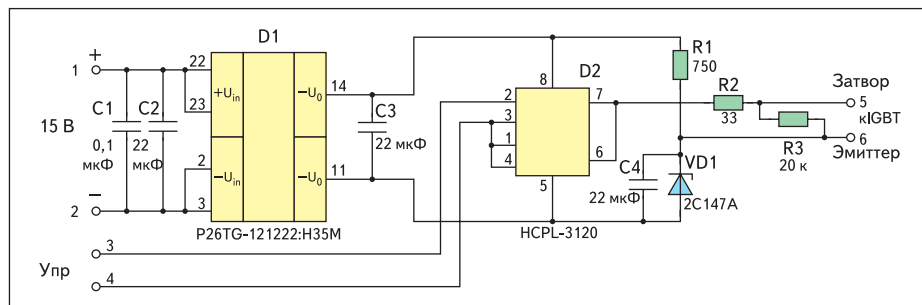


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема драйвера, использованного в составе трехфазного преобразователя сетевого напряжения

ший гальваническую развязку между схемой управления и силовой схемой. В целях реализации гальванической развязки питания драйвера установлен модульный DC/DC-преобразователь D1 с входным номинальным напряжением 15 В и выходным напряжением 24 В. Разработчикам, которые захотят использовать схему в своих проектах, необходимо учесть, что указанный на рис. 1 модульный DC/DC-преобразователь обеспечивает электрическую прочность изоляции между входом и выходом не менее 1500 В по переменному напряжению с частотой 50 Гц и не менее 3500 В по постоянному напряжению. В условиях работы преобразователя DC/DC в составе реального прибора между входом и выходом этого источника гарантированно будет присутствовать напряжение 540 В (выпрямленное напряжение трехфазной сети 380 В/50 Гц), а если принять во внимание возможные коммутационные выбросы напряжения на паразитных индуктивностях, то и все 1000 В.

Стабилитрон VD1 формирует отрицательное напряжение  $-5$  В, «подпирающее» затвор IGBT-транзистора в закрытом состоянии. Резистор R2 задает ток перезарядки затвора, резистор R3 снижает импеданс затвора и предотвращает самопроизвольное открытие IGBT в моменты коммутации.

Описываемый драйвер сопрягается с IGBT-сборкой типа GA125TS120U. Конструктивно он представляет собой печатную плату с «лепестками» под пайку, имеющую размеры  $70 \times 70 \times 25$  мм.

Осциллограмма выходного напряжения драйвера при работе на реальную номинальную активно-индуктивную нагрузку (трехфазные вентиляторы) приведена на рис. 2. Частота управляющего ШИМ-сигнала выбрана равной 10 кГц.

Фиксируется хорошая крутизна фронтов и малая величина выбросов напряжения, возникающих вследствие прохождения силовых коммутационных процессов, что свидетельствует о достаточно высоком качестве функционирования драйвера и обеспечении им основной функции управления.

Теперь настало время влить ложку дегтя в бочку меда, то есть рассказать о недостатках. Во-первых, габаритные размеры драйвера

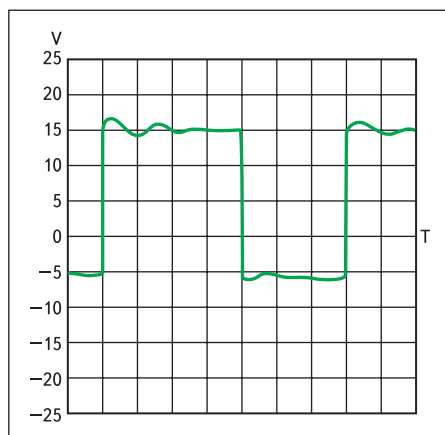


Рис. 2. Осциллограмма выходного напряжения драйвера

оказались достаточно большими. Действительно, для комплектования преобразователя, имеющего в составе трехфазный управляемый мост, необходимо шесть драйверных плат — по две на каждый IGBT-модуль. Все бы ничего, но когда плата сопоставима по габаритным размерам с IGBT-модулем, это обстоятельство в значительной степени осложняет компоновку силового инвертора, сокращает возможности доступа к отдельным узлам для регулировки, ремонта и т. д. Во-вторых, описываемый драйвер не имеет никаких функциональных узлов защиты от возникновения аварийных режимов, а значит, силовую схему преобразователя придется «нагружать» дополнительными датчиками, обнаруживающими перегрузку, короткое замыкание. Кроме этого, сигналы датчиков должны схемотехнически обрабатываться для принятия решений об отключении или о переводе в режим ограничения.

Учитывая названные обстоятельства, для преобразователя мощностью 12 кВт была разработана модифицированная схема двухканального драйвера управления «верхним» и «нижним» IGBT-транзисторами полумоста.

Драйвер, схема которого приведена на рис. 3, имеет два идентичных гальванически развязанных канала. Питание каналов осуществляется высокочастотным преобра-

зователем прямоходового типа на основе микросхемы D7. На элементах D1–D4 построен монитор для схемы защиты от провалов питающего напряжения. Зачем он нужен? Дело в том, что IGBT-транзистор, как и обычный транзистор, допускает работу и в ключевом режиме, и в активной области, с неполным открытием. При пониженном управляющем напряжении на затворе транзистор переходит из ключевой в активную область работы, что ведет к значительному повышению рассеяния тепла на нем и, как следствие, выходу из строя. Работающий в условиях стабильного питающего напряжения преобразователь однозначно обеспечит ключевой режим, а вот при кратковременных провалах сетевого напряжения (особенно при питании его схем управления от быстро сбрасывающих выходные напряжение высокочастотных источников напряжения собственных нужд) легко может наступить отказ. Введенный в схему драйвера монитор отслеживает напряжение его питания и вырабатывает сигнал отключения при снижении этого напряжения ниже опасного уровня.

Описываемый драйвер осуществляет управление IGBT-сборками типа CM200DY24A компании Mitsubishi, обладающими достаточно большой входной емкостью затвора, поэтому потребовалось увеличить мощность его выхода транзисторными усилителями тока на элементах VT1–VT4. Таким образом удалось обеспечить импульсный ток управления не ниже 5 А.

Конструктивно драйвер размещен на плате с размерами  $80 \times 80$  мм, что говорит о почти двукратном сокращении габаритов по сравнению с ранее описанным вариантом (рис. 1). К сожалению, в этом случае также имеется ряд недостатков как схемотехнического, так и технологического характера. Главный технологический недостаток вызван необходимостью использования трансформатора T1 собственного изготовления. Трансформатор разработан в малогабаритном исполнении, магнитопроводом служит ферритовый сердечник броневого типа. Как было уже сказано ранее, межобмоточная изоляция трансформатора должна обеспечивать стойкость к испытательному напряжению не менее 1500 В, что достаточно сложно обеспечить, если изготовитель лишен возможности выполнять качественную вакуумную пропитку трансформаторной катушки.

Рассмотрим теперь схемотехнические недостатки. Они выражаются в отсутствии отдельных полезных защитных функций, которыми ведущие мировые производители «нагружают» свои драйверы, исходя из опыта эксплуатации силовой техники. Для пояснения обратимся к рис. 4. Как показывает практика, более эффективный вариант управление IGBT-транзисторами заключается в раздельном задании токов заряда и разряда входных затворных емкостей. На рис. 4 токи заряда и разряда задаются резисторами R1

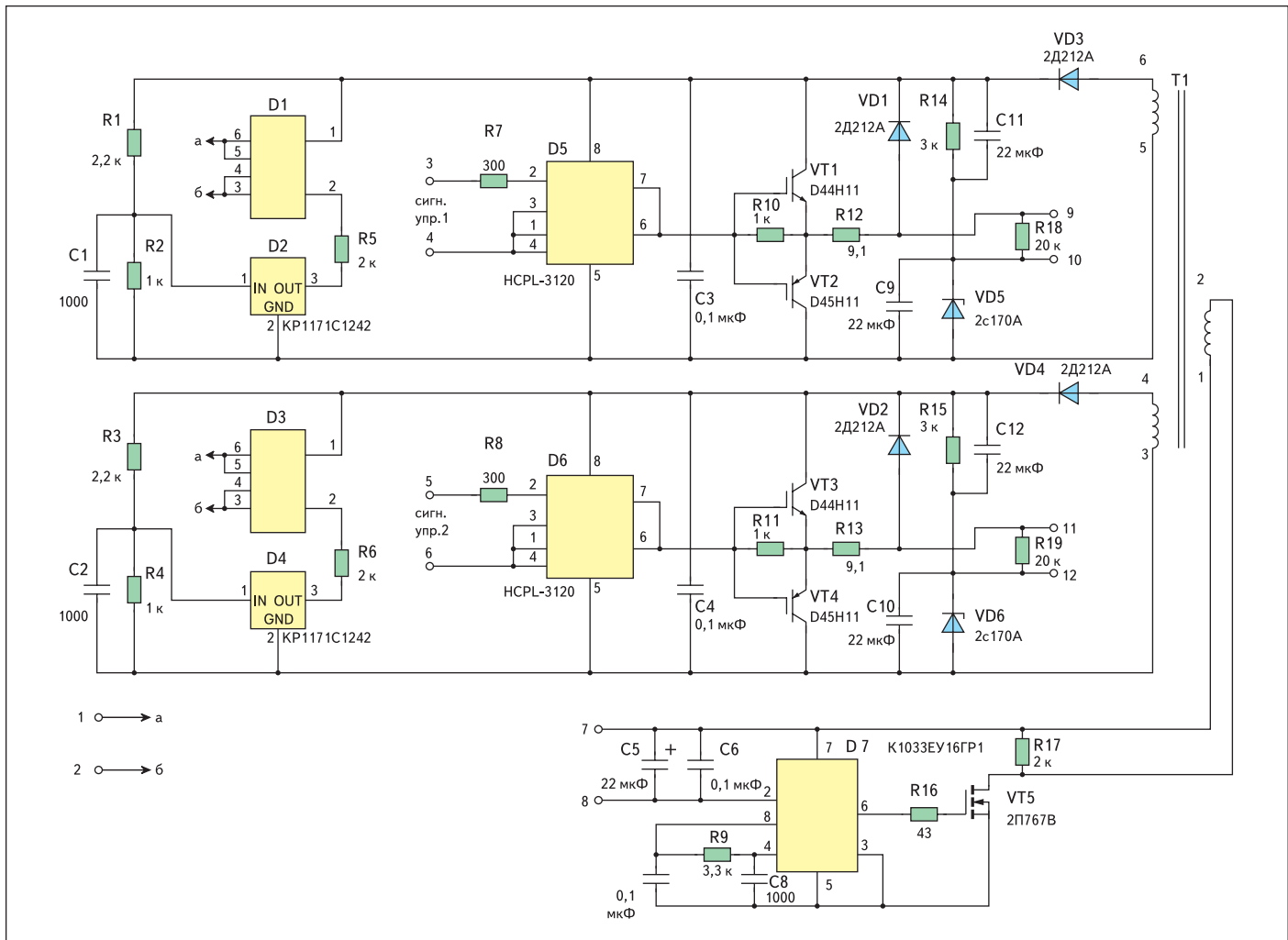


Рис. 3. Принципиальная схема двухканального драйвера управления «верхним» и «нижним» IGBT-транзисторами полумоста

и R2 (для «верхнего» плеча), а также резисторами R3 и R4 (для «нижнего» плеча). Кроме того, значительное внимание уделяется контролю величины напряжения насыщения транзисторов. Схемотехнически эта часть имеет электрические связи «контроль 1»

и «контроль 2», подключающие коллекторы транзисторов к драйверным узлам контроля. Оправдана ли эта идея? Несомненно, и вот почему. Разработчикам силовой техники хорошо известно, что достаточно трудно обеспечить незамедлительное аварийное отклю-

чение силовой части преобразователя при возникновении токовой перегрузки. Классический метод контроля основан на применении датчиков тока на основе эффекта Холла (датчиков Холла) или резистивных шунтов, сигнал с которых обрабатывается электронной схемой защиты. Но, как показала мировая практика, в качестве такого датчика тока можно использовать непосредственно силовой переход «коллектор-эмиттер» IGBT-транзистора, отслеживая величину напряжения насыщения на нем.

В полумостовых преобразовательных схемах необходимо также принимать специальные меры по предотвращению возникновения «сквозных» токов вследствие одновременного открытия транзисторов «верхнего» и «нижнего» плеча. Эта функция в составе интегральных драйверов легко реализуема, причем величина «мертвого времени» (пауза между моментами коммутации VT1 и VT2) может быть отрегулирована с помощью внешних элементов (резисторов или конденсаторов).

На отечественном рынке электронных компонентов сегодня присутствует широкая номенклатура импортных интегральных драй-

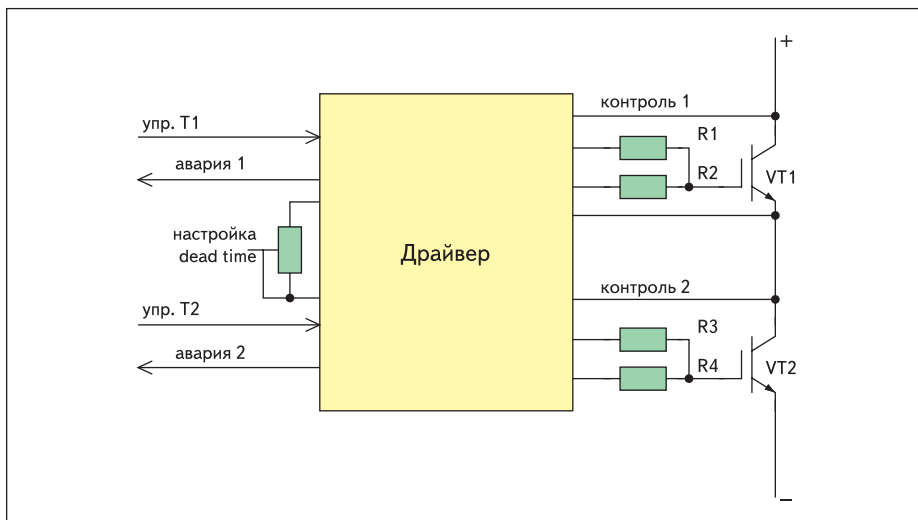


Рис. 4. Структурная схема управления драйвером

веров, обеспечивающих все перечисленные функции, и даже некоторые другие, второстепенного значения, о которых мы здесь не говорим. Учитывая это, производители преобразовательной техники общепромышленного исполнения не ломают голову, а покупают готовые импортные комплектующие. Но разработчикам спецтехники, работающим в рамках государственного заказа, жить в данном изобилии ничуть не легче: спецтехника должна содержать только отечественную комплектацию, предназначенную, вдобавок, для работы в жестких условиях (например, комплектующие с приемкой «5»). Почему не легче — объясняется просто: одних принципиально важных отечественных элементов просто нет «в природе», другие находятся на стадии разработки и неизвестно когда будут доступны для приобретения. Поэтому в ряде случаев приходится использовать отечественные элементы, поставляемые с приемкой ОТК, но фактически удовлетворяющие заданным жестким условиям эксплуатации. Заметим также, что отечественные элементы могут быть интересны и производителям коммерческой электроники с точки зрения сокращения расходов на приобретение и снижения конечной себестоимости продукции.

Сегодня на отечественном рынке появились модульные интегральные драйверы, серийно изготавливаемые ЗАО «Электрум АВ» (г. Орел) [4]. Номенклатура их чрезвычайно широка: выпускаются драйверы управления одиночными силовыми ключами, драйверы управления полумостами, в бескорпусном исполнении (в виде печатной платы) и в защитных корпусах с размерами не более 60×46×12,5 мм, оснащенные широким набором сервисных функций, со встроенными DC/DC-преобразователями и без них (с обеспечением их внешнего подключения). Заинтересованным разработчикам автор рекомендует обратиться к сайту фирмы [4] и получить технические данные конкретных интегральных драйверов.

На взгляд автора, наибольший интерес для применения в конкретных разработках представляют драйверы серии МД2ХХП-Б, поскольку они выполнены в защитном корпусе, а также имеют наиболее оптимальный набор функций:

- контроль напряжения насыщения «коллектор-эмиттер»;
- запрет контроля напряжения насыщения управляемого транзистора при нахождении его в активной фазе (при переключениях) на минимальное время 1 мкс с возможностью регулировки времени запрета;
- номинальный контроль внутренних питающих напряжений (мониторинг питания);
- блокировка управления при возникновении аварийного режима;
- встроенные DC/DC-преобразователи;
- плавное аварийное отключение управляемого транзистора за время 7 мкс;

- блокировка одновременного включения транзисторов «верхнего» и «нижнего» плеча полумоста;
- регулировка величины «мертвого времени»;
- управление с помощью сигналов стандартных уровней КМОП/ТТЛ;
- внешняя сигнализация о возникновении аварийного режима;
- раздельное задание токов управления силовых транзисторов в фазах включения и отключения.

Драйверы серии МД2ХХП-Б имеют следующие основные технические характеристики:

- диапазон напряжения питания — 13,5–16,5 В;
- устойчивость к испытательному напряжению изоляции — 4000 В;
- импульсный ток управления силовыми транзисторами — 1,5; 5,0; 8,0 А (в зависимости от исполнения);
- ток потребления по питанию — не более 200 мА;
- рабочий диапазон температур — от -40 до +100 °С;
- максимальная частота управляющих сигналов — 100 кГц.

На рис. 5 показан внешний вид драйвера серии МД2ХХП-Б, а на рис. 6 — рекомендуемая электрическая схема, которая была опробована в процессе авторских разработок.



Рис. 5. Внешний вид драйверов серии МД2ХХП-Б

Напряжение 15 В, питающее драйвер, поступает на контакты 1–2 платы. Управление осуществляется сигналами с контактов 3–4 относительно «общего» сигнального контакта 5. На контакты 6–7 выведен сигнал «авария» в виде замыкаемого «сухого» контакта твердотельного реле, который транслируется на схему управления статическим преобразователем. Контакты 8–9–10 предназначены для управления IGBT-транзистором «верхнего» плеча полумоста, а контакты 11–12–13 — для управления «нижнего» транзистора полумоста. Конденсаторы С1–С5 являются блокировочными по питанию, а конденсаторы С6–С7 устанавливают время запре-

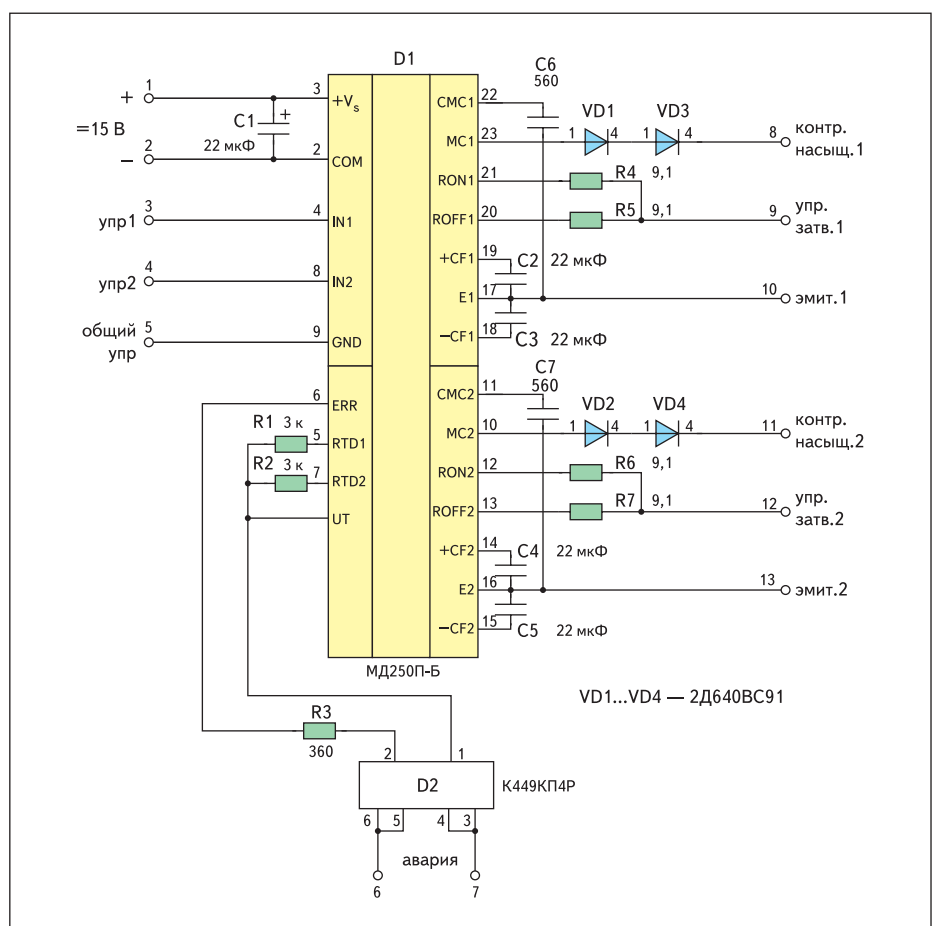


Рис. 6. Рекомендуемая электрическая схема драйвера МД2ХХП-Б

та контроля напряжения насыщения силовых транзисторов. Резисторы R1–R2 задают «мертвое время», которое в данном случае установлено равным 5 мкс. К слову, существуют исполнения драйверов, в которых аналогичный параметр задается не резисторами, а конденсаторами. Резисторы R4–R7 — затворные. Диоды VD1–VD4 снижают величину контролируемого напряжения насыщения, то есть понижают порог срабатывания защиты. Чем большее количество диодов будет включено последовательно, тем более низким окажется порог срабатывания. Добавим, что расчет величины этого порога приведен в технической документации на драйверы.

В результате использования драйвера МД250П-Б вместо схем, построенных на дискретных элементах, удалось существенно (почти в два раза) уменьшить конструктивную высоту узла в сборе, отказаться от трудоемких операций по намотке трансформаторов, повысить надежность преобразователей и в более полной мере оснастить разрабатываемые приборы средствами защиты от аварийных преобразователей. Следующим интересным шагом на пути внедрения интегрального исполнения силовой техники станет отказ от традиционных IGBT-транзисторов в пользу так называемых «интеллектуальных» модулей, в которые встроены интегральные драйверы, а их характеристики согласованы наилучшим образом. Такие компоненты уже имеются в номенклатуре ЗАО «Электрум АВ». ■

### Литература

1. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: Солон-Пресс. 2005.
2. <http://www.w.irf.com>
3. Колпаков А. И. В лабиринтах силовой электроники (сборник статей). СПб: Издательство Буковского, 2000.
4. [www.orel.ru/~voloshin](http://www.orel.ru/~voloshin)