

# Новые IGBT-модули большой мощности Mitsubishi Electric

## и их интеграция с драйверами затворов компании Isahaya Electronics

Юрий Петропавловский

**И**нтегральные IGBT-модули большой мощности Mega Power Dual (MPD), входящие в серию NF, компания Mitsubishi Electric начала выпускать еще в середине 2000 года. В приборах этой серии использовались IGBT 5-го поколения, выполненные по технологии CSTBT (траншейный биполярный транзистор с накоплением заряда). К приборам этого типа относятся модули CM900DUC-24NF (900 A/1200 В), CM-1000DUC-34NF (1000 A/1700 В), CM1400DUC-24NF (1400 A/1200 В), представляющие собой полумосты с антипараллельными диодами (два IGBT + два диода). Внешний вид модулей показан на рис. 1. Модули MPD предназначены для

применения в инверторах высокой мощности для ветрогенераторов, источников бесперебойного питания и приводов электродвигателей, их применение позволяет избежать необходимости параллельного включения нескольких модулей — для большинства целевых приложений достаточно одного.

Преимущества модулей MPD серии NF определяются как отличные характеристики кристаллов CSTBT, используемых во всех приборах серии NF, так и конструктивные особенности самих модулей. Структура CSTBT (Carrier Stored Trench Gate Bipolar Transistor), приведенная на рис. 2, отличается от структуры обычного тренч-транзистора наличием дополнительного *N*-слоя между *P*-базовым и *N*-слоем, названным слоем запирающего (Carrier storage N layer), или барьерным слоем. Барьерный слой способствует концентрации в нем «дырок» и ограничивает их перемещение в *P*-базовый слой, что приводит к существенному снижению напряжения включения  $V_{ce(sat)}$  [1].

В CSTBT-кристаллах была также оптимизирована вертикальная структура транзисторов, получившая название Light Punch Through (LPT), суть технологии заключается в оптимизации *n*-, *n*<sup>+</sup>-областей и коллекторного слоя таким образом, чтобы обеспечить минимальное напряжение  $V_{ce(sat)}$  при поддержании устойчивых переключений в области безопасной работы (SOA). В результате приборы 5-го поколения обладают существенно меньшей энергией переключения, что привело к снижению потерь переключения и почти полному устранению остаточного тока [2].

Для снижения паразитной индуктивности внутренней разводки в модулях MPD, как и во всех приборах серии NF, для разводки звена постоянного тока при-

**История компании Isahaya Electronics Corporation (IDC, г. Исахайя, префектура Нагасаки, Япония) началась с основания в 1973 г. полупроводниковой компании Isahaya Electronic Industry Co Ltd., нацеленной на массовое производство транзисторов малой мощности. В 1979 г. предприятие начало сборку гибридных микросхем Mitsubishi Electric. В 1985 г. в качестве инжинирингового подразделения производственной компании была создана самостоятельная компания IDC Co Ltd. В 1986 г. Isahaya Industry приступила к производству гибридных микросхем разработки Mitsubishi Electric, а в 1991 г. Isahaya Industry и IDC были объединены в единую компанию с современным названием Isahaya Electronics Corporation. Производство первых драйверов затворов IGBT — M57959L (рис. 6) и M57962L было начато в 1992 г., микросхемы получили широкое распространение и выпускались также под торговыми марками Mitsubishi Electric и Powerex. В 2003 г. от Mitsubishi Electric в компанию переведен бизнес гибридных микросхем, а в 2007 г. начато производство драйверов затворов IGBT серии VLA500 для силовых модулей Mitsubishi Electric и Powerex. Компания расположена в одном из крупнейших японских промышленных кластеров Kita-Kyushu (Silicon Island Kyushu), в котором дислоцируются десятки полупроводниковых фабрик, дизайн-центров и предприятий ведущих японских электронных корпораций [6].**



Рис. 1. Внешний вид модуля MPD

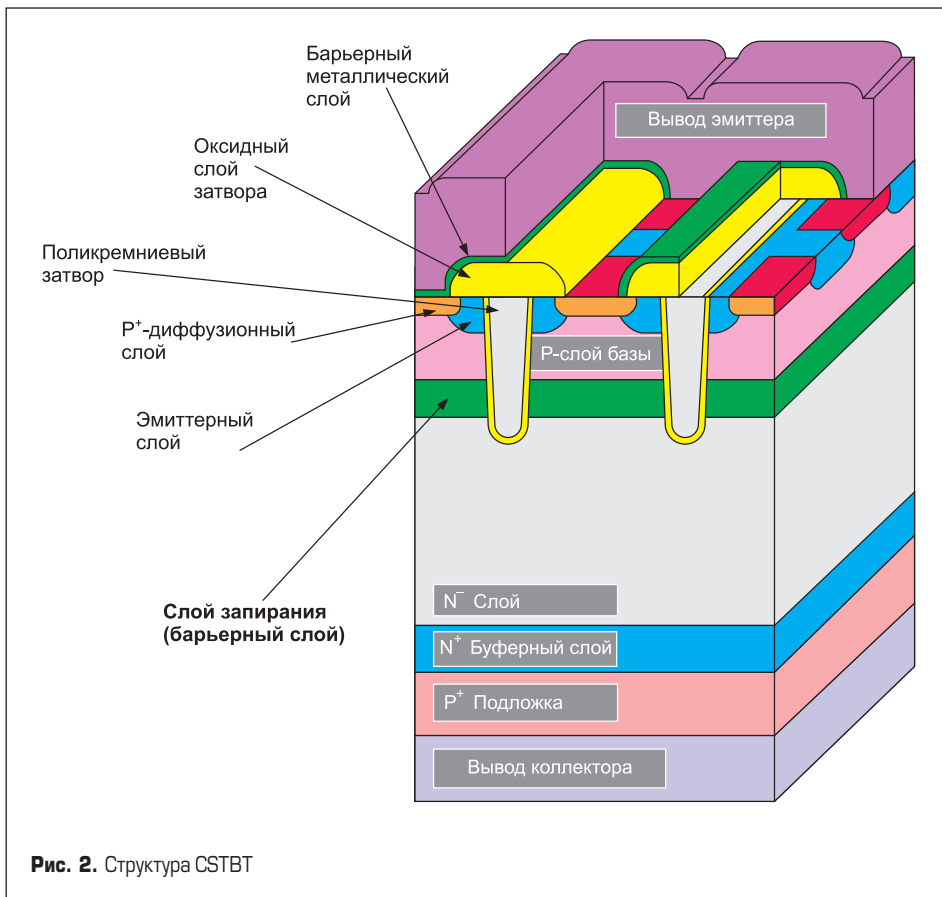


Рис. 2. Структура CSTBT

менена специальная многослойная низкоиндуктивная шина, что позволило снизить внутреннюю индуктивность разводки до 16 нГн и уменьшить выбросы напряжения.

В связи с успехом применения модулей MPD компания продолжила работу над расширением их номенклатуры и улучшением параметров. На международной выставке PCIM-2009 в Нюрнберге компания официально представила силовые IGBT-модули (такие же полумосты) на номиналы 2500 А/1200 В и 1800 А/1700 В, получившие название New-MPD и вошедшие в состав серии NX. В каталог компании 2014 г. включены модули New-MPD типов CM1800DY-34S и CM2500DY-24S (серия NX-S). Внешний вид приборов показан на рис. 3. В новых модулях применены IGBT 6-го поколения на основе технологии CSTBT и усовершенствованные антипараллельные диоды. Основным целевым назначением модулей CM1800DY-34S являются инверто-

ры для систем ветроэнергетики, а модули CM2500DY-24S найдут применение, в основном, в качестве инверторов солнечных электростанций [3].

Кристаллы новых модулей IGBT, как и всех приборов серии NX, выращиваются на более тонких (на 25%) полупроводниковых пластинах, траншейные затворы в них расположены ближе, чем у приборов 5-го поколения. Другой их особенностью является использование технологии Plugged Cell Merged (PCM) для оптимизации числа и шага Trench-ячеек в кристалле, это дает возможность получить низкое значение напряжения насыщения, сохраняя при этом низкий ток насыщения при коротких замыканиях. Использование PCM позволяет обеспечить ток КЗ в пять-восемь раз больше номинального тока при длительности импульсов до 20 мкс без выхода приборов из строя и использования дополнительных ограничителей тока. Подвергнулся оптими-

зации и профиль легирующих примесей слоя запирания (Doping profile of CS layer).

Перечисленные меры привели к снижению напряжения  $V_{ce(sat)}$  примерно на 0,55 В (150 А/1200 В) в сравнении с аналогичными приборами 5-го поколения, уменьшению энергии выключения на 25% (14,5 мДж/имп. в сравнении с 19,4 мДж/имп. при  $I_c = 150$  А,  $V_{ce} = 600$  В,  $T_j = +125$  °С), заряда затвора — на 60% (650 в сравнении с 1130 нК/импульс при тех же параметрах). Кроме того, новые кристаллы могут выдерживать кратковременный перегрев до температуры +175 °С.

Новые антипараллельные диоды для модулей 6-го поколения производятся на вдвое более тонких полупроводниковых пластинах, чем диоды, используемые в приборах 5-го поколения. Прямое напряжение диодов снижено на 0,3 В при энергии переключения  $E_{rr} = 8$  мДж/имп. ( $I_f = 150$  А,  $T_j = +125$  °С), максимально допустимая температура кристаллов также увеличена до +175 °С. Перечисленные усовершенствования привели к общему снижению общей мощности потерь на 15–18% на частотах переключения 5–10 кГц [4].

Претерпела изменения и конструкция модулей New-MPD. С целью увеличения количества термоциклов при производстве исключены внутренние паяные соединения — используется прямая ультразвуковая сварка. Снижению теплового сопротивления способствует применение в качестве материала базовой пластины из алюминия, основание приборов разделено на несколько отдельных секций, что обеспечивает лучший контакт с радиатором охлаждения. Управляющие терминалы модулей размещены в центре корпуса, это позволяет устанавливать печатные платы непосредственно на модуль — так, как показано на рис. 4.

В модули интегрировано несколько параллельно включенных кристаллов IGBT и диодов (по 5+5 в каждом плече), для их подключения к внешним терминалам использованы усовершенствованная четырехслойная шина постоянного тока и шестислойная шина переменного тока (рис. 5). Это решение позволило уменьшить внутреннюю индуктивность IGBT до 5 нГн, а общую паразитную индуктивность модулей до 40 нГн.



Рис. 3. Внешний вид модуля New-MPD



Рис. 4. Модуль New-MPD с установленным драйвером затворов

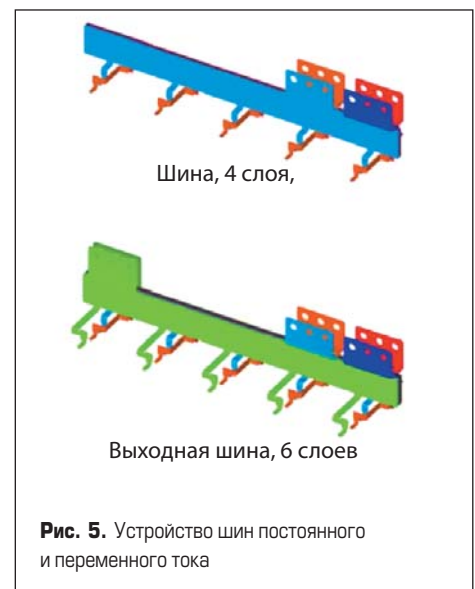


Рис. 5. Устройство шин постоянного и переменного тока



Рис. 6. Внешний вид микросхемы M57959L

В модули также встроены терморезисторы с отрицательным ТКС, конструкция приборов позволяет легко реализовать жидкостное (водяное) охлаждение. Основные параметры модулей CM1800DY-34S (в скобках приведены отличающиеся параметры CM2500DY-24S):

- максимальное напряжение  $V_{ces}$  — 1700 В (1200 В), область безопасной работы модулей 1200 В (900 В);
- максимальный ток коллектора  $I_c$  — 1800 А (2500 А) при  $T_{корп} = +105^\circ\text{C}$ , мощность рассеяния — 11 535 Вт при  $T_{корп} = +25^\circ\text{C}$ ;

- диапазон рабочих температур кристаллов  $-40\dots+150^\circ\text{C}$ , кратковременно до  $+175^\circ\text{C}$ , максимальная температура корпуса  $+125^\circ\text{C}$ ;
- напряжения насыщения (по терминалам) — 2,2 В (1,8 В) при  $T_j = +25^\circ\text{C}$ ; 2,45 В (2,05 В) при  $T_j = +150^\circ\text{C}$  и  $I_c = 1800\text{ А}$  (2500 А);
- прямое напряжение «эмиттер–коллектор»  $V_{ce}$  (определяется антипараллельными диодами) — 2/2,05 В (1,8/1,8 В) соответственно;
- входная/выходная емкости — не более 460/48 нФ (250/50 нФ), заряд затвора — 8400 нК (5800 нК);
- время нарастания/спада импульсов — 200/500 нс (200/300 нс) при  $V_{ce} = 1000\text{ В}$  (600 В),  $I_c = 1800\text{ А}$  (2500 А);
- время восстановления обратного сопротивления диодов  $t_{rr}$  не более 350 нс (300 нс);
- энергия включения/выключения  $E_{on}/E_{off}$  — 722/509 (174/259) мДж/импульс;
- внутреннее сопротивление затворов 1,1 Ом на каждый кристалл, сопротивление внутренних проводников силовых терминалов/кристалл — 0,11 мОм;
- номинальное сопротивление встроенного терморезистора 5 кОм при  $T = +25^\circ\text{C}$ ;
- тепловое сопротивление переход IGBT/корпус — 13 К/кВт, диод/корпус — 22 К/кВт;

габариты модуля 310×142×51 мм [5]. При проектировании силовых IGBT-инверторов перед инженерами всегда стоит задача выбора — разрабатывать драйверы затворов самостоятельно или использовать готовые решения, если таковые имеются. Для использования совместно с рассматриваемыми модулями New-MPD компания Isahaya Electronics (IDC) разработала драйверы затворов VLA553, выполненные на печатных платах с присоединительными размерами, позволяющими их непосредственную установку на рассматриваемые модули.

В каталоге IDC 2014 г. представлены гибридные микросхемы, драйверы IGBT, DC/DC-конвертеры, модули интерфейсов для интеллектуальных силовых модулей, линейные микросхемы для систем питания, транзисторные и диодные сборки, дискретные полевые и биполярные транзисторы. Кроме Mitsubishi Electric и Powerex, компания разрабатывает драйверы IGBT для различных линеек силовых модулей компаний Fuji и Infineon [7].

Для модулей New-MPD компанией специально разработаны драйверы затворов VLA553-01R (для CM2500DY-24S) и VLA553-02R (для CM1800DY-34S). Печатные платы драйверов устанавливаются непосредственно

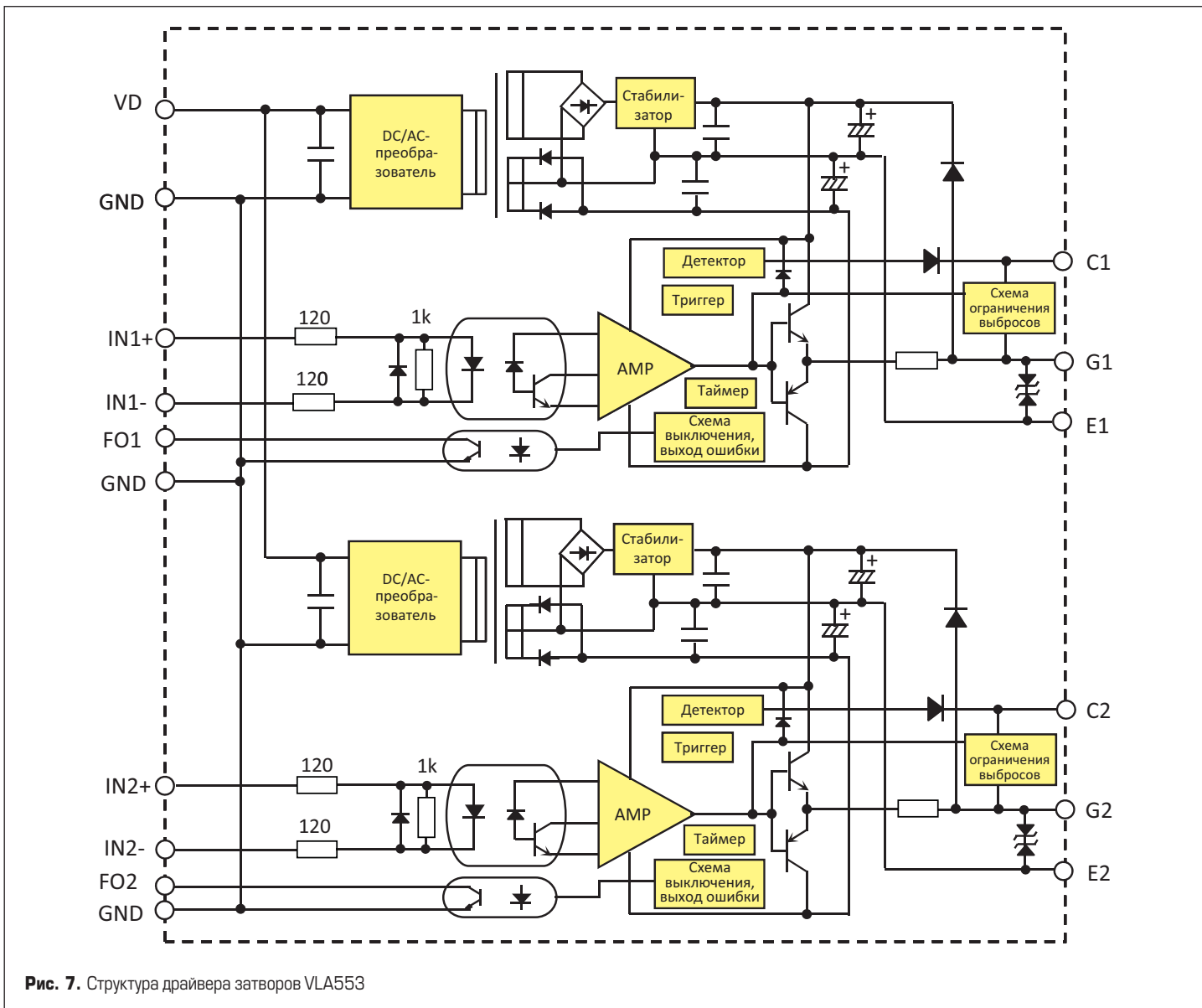


Рис. 7. Структура драйвера затворов VLA553

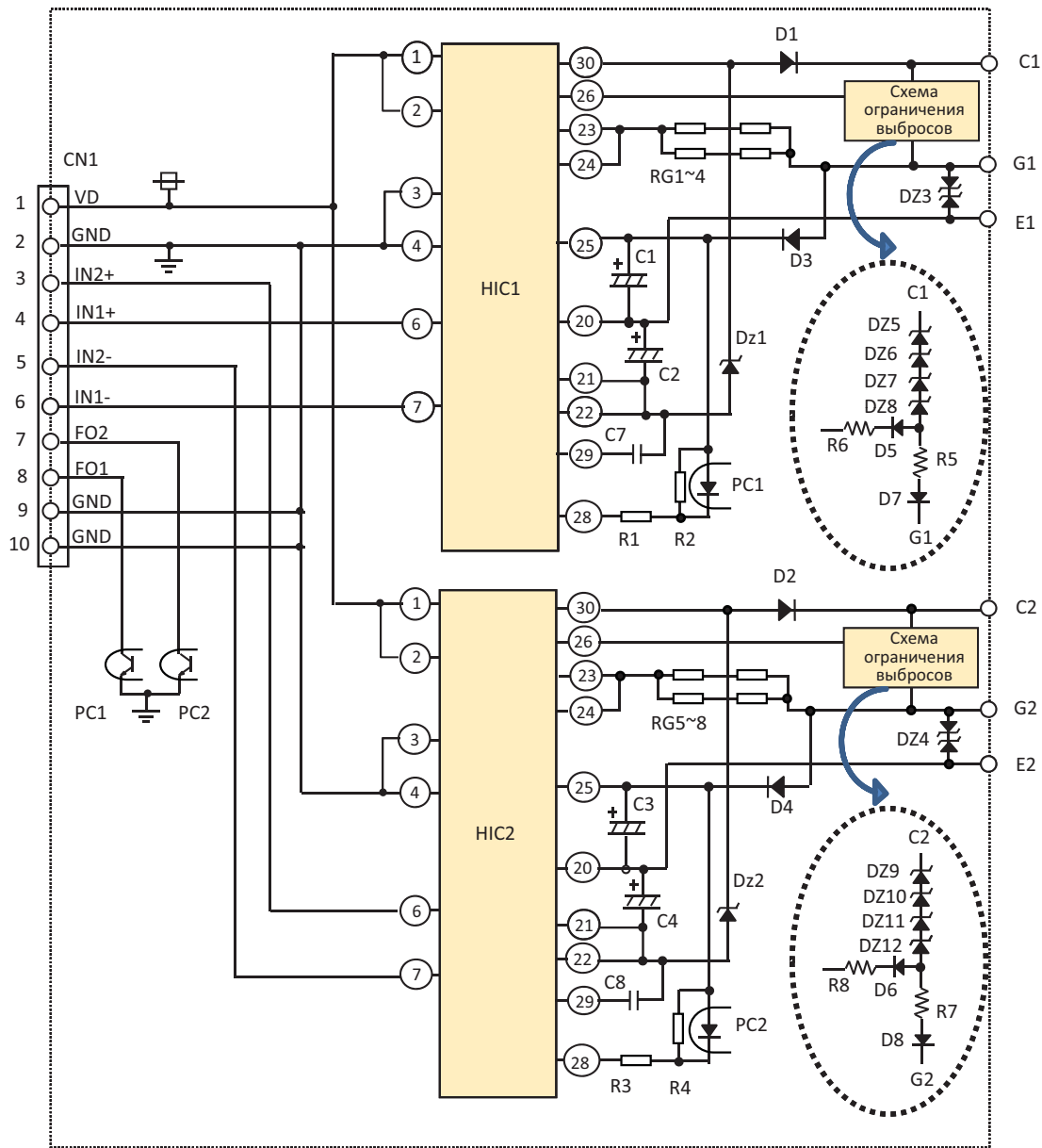


Рис. 8. Электрическая принципиальная схема драйвера VLA553



Рис. 9. Внешний вид драйвера VLA553

на IGBT-модули и фиксируются к управляющим терминалам винтами М4. Оба изделия выпускаются и под торговой маркой компании Powerex, часть активов которой принадлежит Mitsubishi Electric [8].

Структурная схема драйверов приведена на рис. 7, изоляция цепей управления от выходных цепей осуществляется через оптроны, а изоляция низковольтной цепи питания Vd — через импульсный трансформатор DC/DC-преобразователя. Электрическая принципиальная схема драйверов приведена на рис. 8, основой драйверов служат микросборки HIC1, HIC2 типа VLA553 разработки IDC, вместе с другими электронными компонентами установленные на печатной плате. Коллекторы, затворы и эмиттеры мощных IGBT подключаются к выводам C1/C2, G1/G2, E1/E2 драйвера соответственно. Резисторы затворов RG1–RG8 и конденсаторы C7, C8 на поставляемые производителем драйверы

не устанавливаются, требуемые для конкретных приложений компоненты устанавливают потребители. Внешний вид драйверов показан на рис. 9. Основные особенности и параметры драйверов:

- встроенные изолированные DC/DC-преобразователи для каждого канала;
- выходной пиковый ток до ±24 А;
- встроенная схема защиты от коротких замыканий с мягким выключением;
- встроенная схема ограничения напряжения на коллекторах;
- КМОП-совместимый входной интерфейс;
- напряжение питания на шине VD +15 В;
- частота переключения до 5 кГц;
- время задержки включения/выключения не более 1 мкс.

Исполнения приборов отличаются параметрами схем ограничения выбросов напряжения на коллекторах IGBT: общее напряжение стабилизации цепочек DZ5–DZ8, DZ9–DZ12 — 900 В (исполнение 01R) и 1350 В (02R). Диаграммы, иллюстрирующие характер процессов при выключении IGBT (спаде тока коллектора), приведены на рис. 10, где  $V_{off\_surge}$  — максимальная амплитуда выброса на шине постоянного тока при запираании транзистора;  $V_z$  — номинальное напряжение стабилизации схемы ограничения;  $V_{osc\_peak}$  — максимальная амплитуда колебательного процесса;  $V_{DC\_Link}$  — напряжение шины постоянного тока.

Схема ограничения (Collector Clamp Circuit) включается в работу драйверов при достижении напряжением на коллекторах IGBT зна-

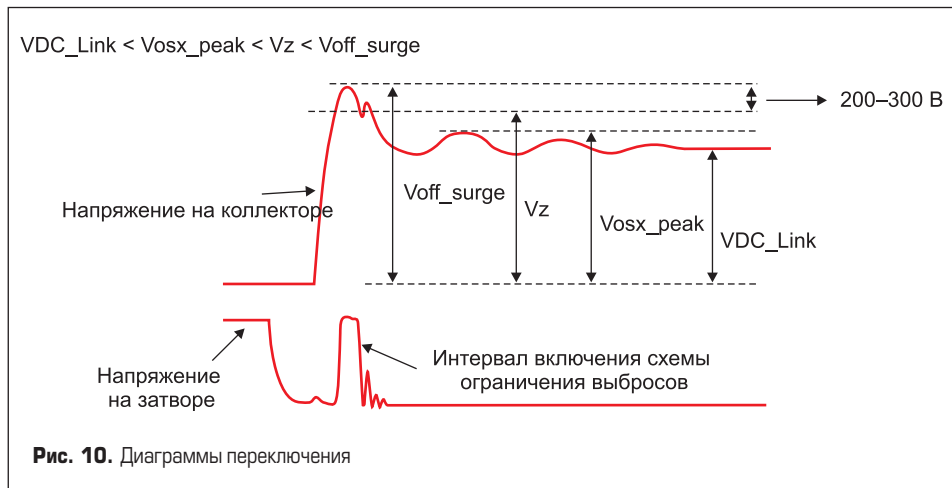


Рис. 10. Диаграммы переключения

чения  $V_z$  и выключается при его уменьшении ниже порога срабатывания схемы (нижняя диаграмма на рис. 10). На интервале активного времени работы на затворы IGBT через схему ограничения подаются противофазные открывающие импульсы, повышающие их потенциалы и, как следствие, снижающие скорость изменения токов коллекторов. В это время IGBT работают в активной области своей выходной характеристики и преобразовывают энергию, накопленную паразитными индуктивностями, в тепло. Процесс ограничения длится до полного высвобождения энергии из паразитной индуктивности, что в целом повышает устойчивость работы инверторов.

Наличие на платах драйверов четырех установочных мест для подключения резисторов

затворов (RG1–RG4/RG5–RG8, рис. 8, 9) позволяет разработчикам инверторов реализовать различные варианты подключения затворов IGBT, в том числе через диодно-резистивные цепи с разделением на ветви заряда (RG on) и разряда (RG off) затворов. Схема подключения драйвера VLA553 к модулю CM2500DY-24S приведена на рис. 11.

Основные функции драйверов определяются, в основном, гибридными микросхемами VLA552-01R, предназначенными для управления силовыми N-канальными IGBT с рейтинговыми параметрами до 1700 В/3600 А и выполненными в корпусах с выводами в один ряд габаритами 88×42×11 мм. Микросхема предназначена для широкого спектра промышленных приложений, входы

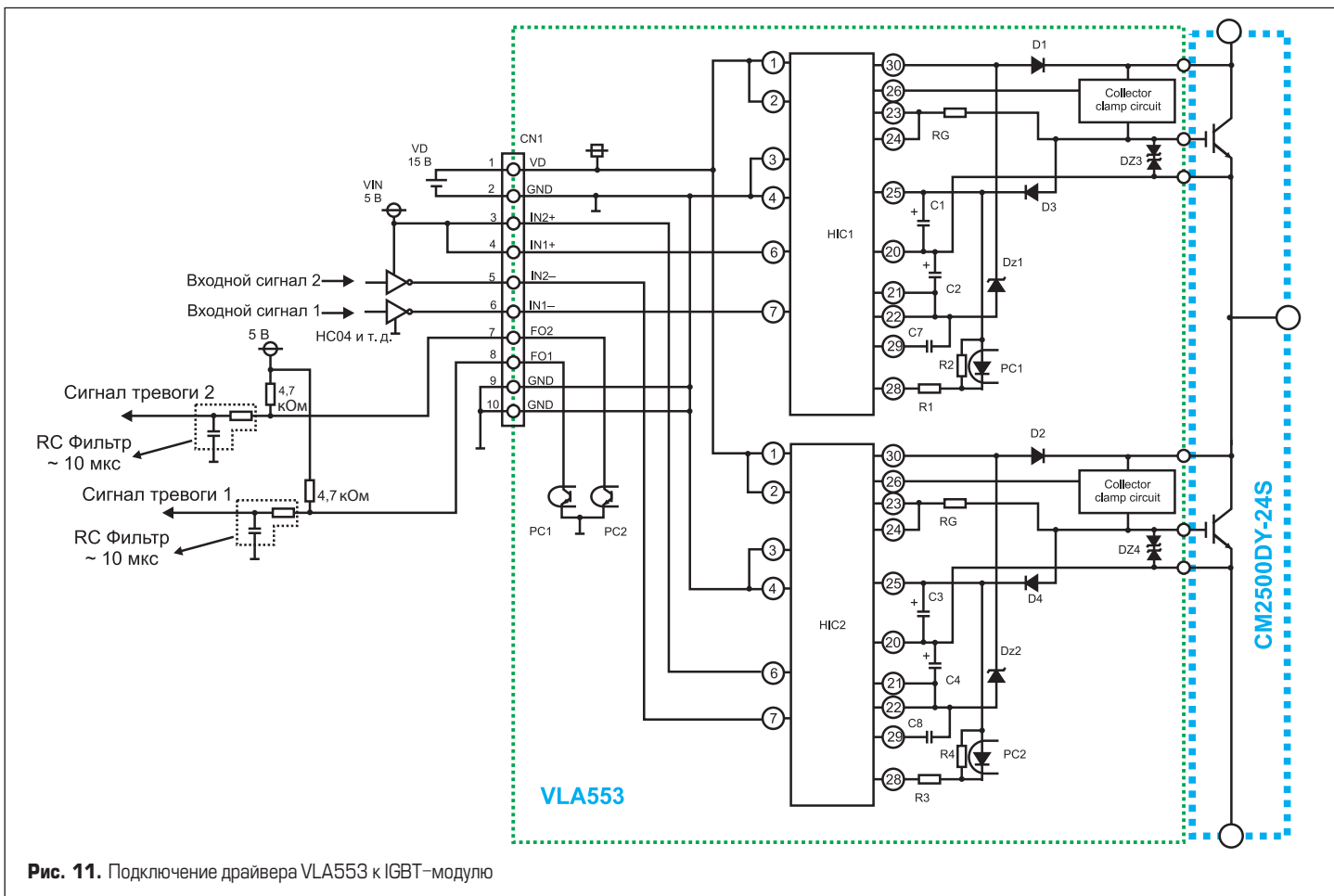


Рис. 11. Подключение драйвера VLA553 к IGBT-модулю

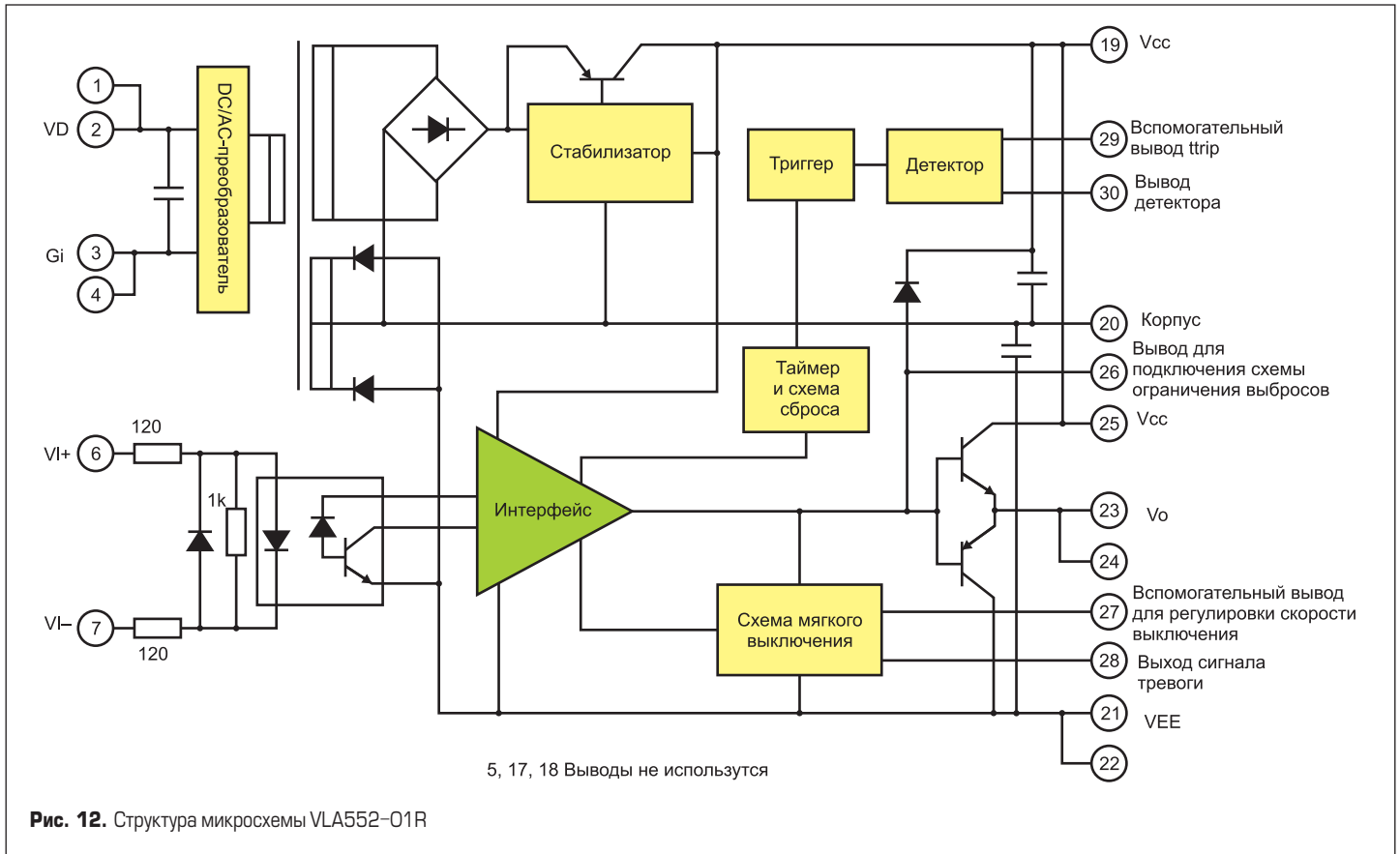


Рис. 12. Структура микросхемы VLA552-01R

и выходы микросхемы изолированы, напряжение изоляции 4000 В (rms). Структура микросхемы приведена на рис. 12, в ее состав входят: DC/DC-конвертер на основе импульсного трансформатора с двумя вторичными обмотками для получения положительного (VCC) и отрицательного (VEE) напряжений; линейный стабилизатор напряжения VCC; входной интерфейс на базе оптрона; интерфейсный усилитель с выходным каскадом на комплементарных транзисторах; схема защиты от ко-

ротких замыканий; схема мягкого выключения. Основные параметры микросхемы:

- напряжение питания  $V_d$  — 14,2–15,8 В;
- входное напряжение (Pull-up Voltage)  $V_{in}$  — 4,75–5,25 В, входной ток 10–16 мА;
- частота переключения до 10 кГц;
- минимальное сопротивление затвора (внешнее) 0,33 Ом;
- напряжение питания драйвера затвора  $V_{CC}$  — 15,2–17,5 В,  $V_{EE}$  — -(6–8) В;
- эффективность источника питания 72%;

- время задержки включения/выключения — не более 1 мкс, нарастания/спада — не более 1,2 мкс;
- максимальный выходной ток —  $\pm 24$  А (длительность импульса 3 мкс);
- диапазон рабочих температур -25...+70 °С, максимальная температура поверхности корпуса +100 °С.

Пример включения микросхемы в качестве драйвера мощного IGBT приведен на рис. 13 (напряжение  $V_d = 15$  В,  $V_{in} = 5$  В). Требования

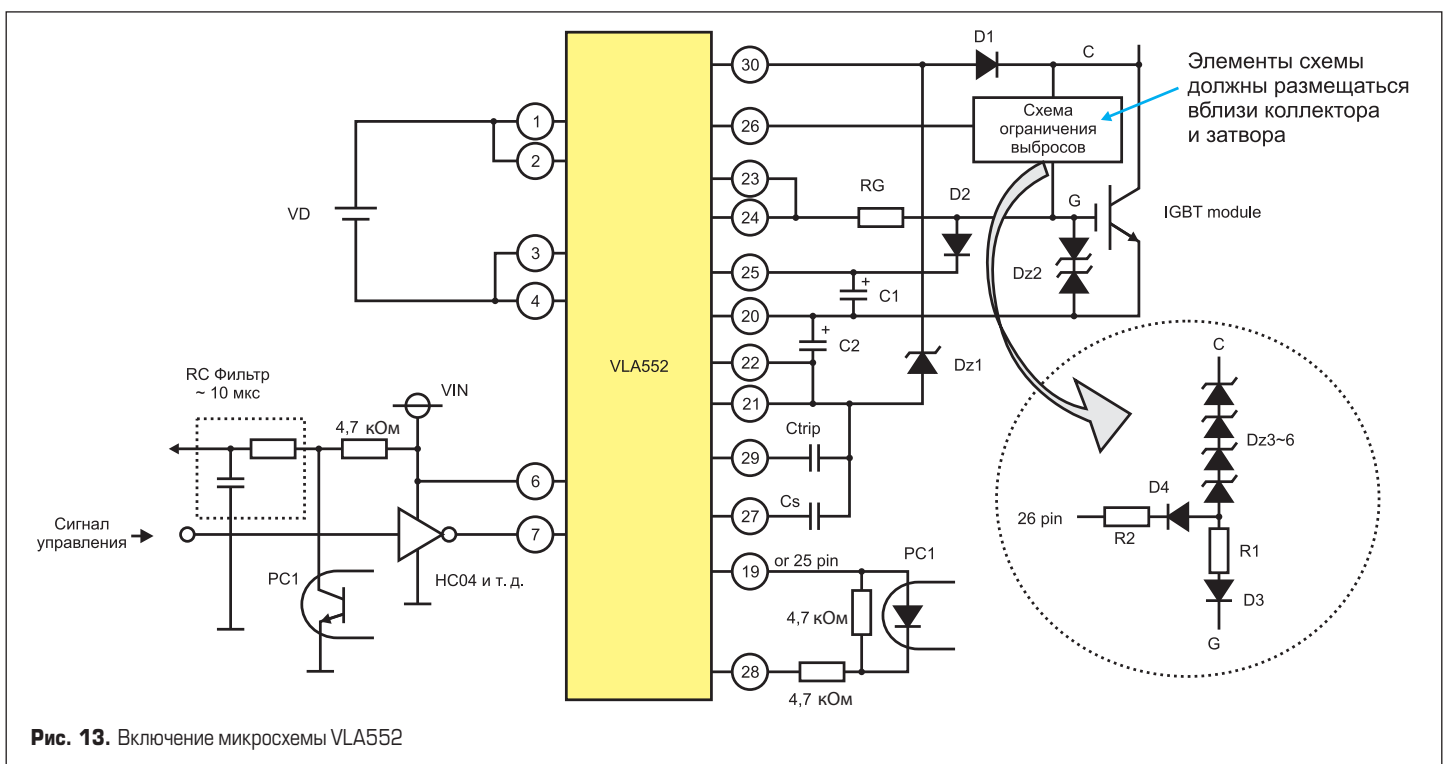
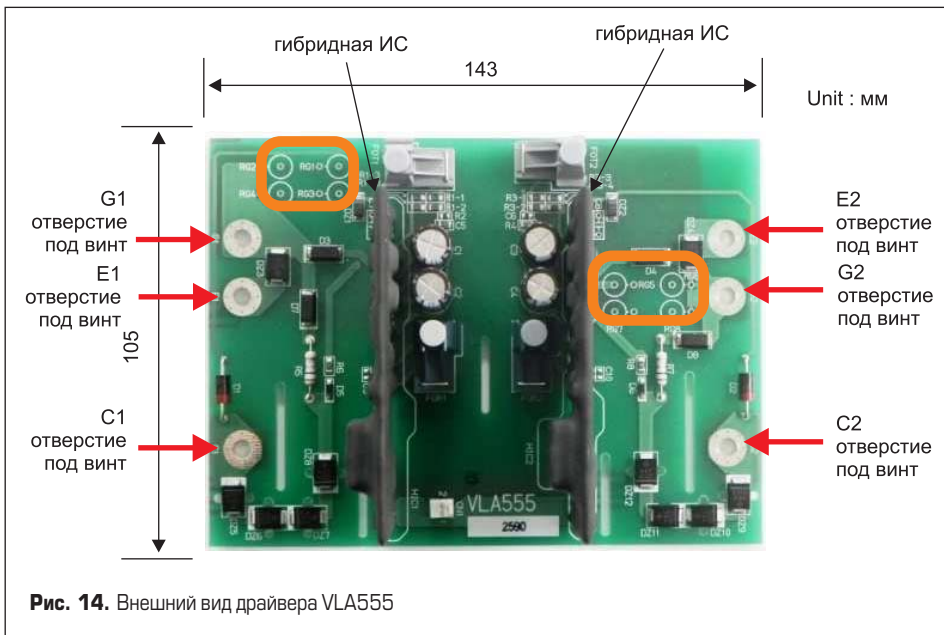


Рис. 13. Включение микросхемы VLA552



максимального тока коллектора IGBT, сопротивления затвора, параметров снабберной схемы, индуктивности силовой шины постоянного тока и типом (качеством) основного конденсатора фильтра в цепи  $V_{pn}$

- D1 — диод с быстрым восстановлением обратного сопротивления ( $t_r$  не более 200 нс), например RP1H фирмы Sanken.
- D2–D4 — диоды с барьером Шоттки с пиковым током (IFSM) более 60 А.
- C1, C2 — 450 мкФ × 35 В (с низкими потерями).
- R1 — 1 Ом/1 Вт; R2 — 10 Ом/0,25 Вт.
- $C_{trip}$  — определяется сопротивлением затвора,  $C_s$  — определяется уровнем выбросов напряжения на коллекторе IGBT.

При разработке силовых IGBT-инверторов Isahaya Electronics предлагает разработчикам и конструкторам печатных плат драйверов ряд рекомендаций. Накопительные и фильтрующие конденсаторы следует располагать как можно ближе к микросхеме. С целью снижения электромагнитных излучений следует минимизировать размеры зоны платы, в которой установлены компоненты, подключаемые к затвору IGBT. Диод D1 следует выбирать с таким же максимальным обратным напряжением, как и  $V_{ces}$  подключаемого IGBT. В случае отсутствия необходимости исполь-

к элементам схемы, рекомендуемые Isahaya Electronics:

- В качестве оптрона РС предлагается использовать прибор TLP781 фирмы Toshiba или аналогичный по параметрам.
- Стабилитроны: Dz1 — 30 В/0,5–1 Вт; Dz2 — 18 В (неполярный); Dz3–Dz6 — выбирается

из условия  $V_{pn} < V_z < V_{ces}$ , где  $V_{pn}$  — постоянное напряжение силовой шины постоянного тока,  $V_z$  — общее напряжение стабилизации цепочки стабилитронов,  $V_{ces}$  — максимальное напряжение коллектор-эмиттер IGBT. Более точно общее напряжение стабилизации выбирается с учетом величины  $V_{pn}$

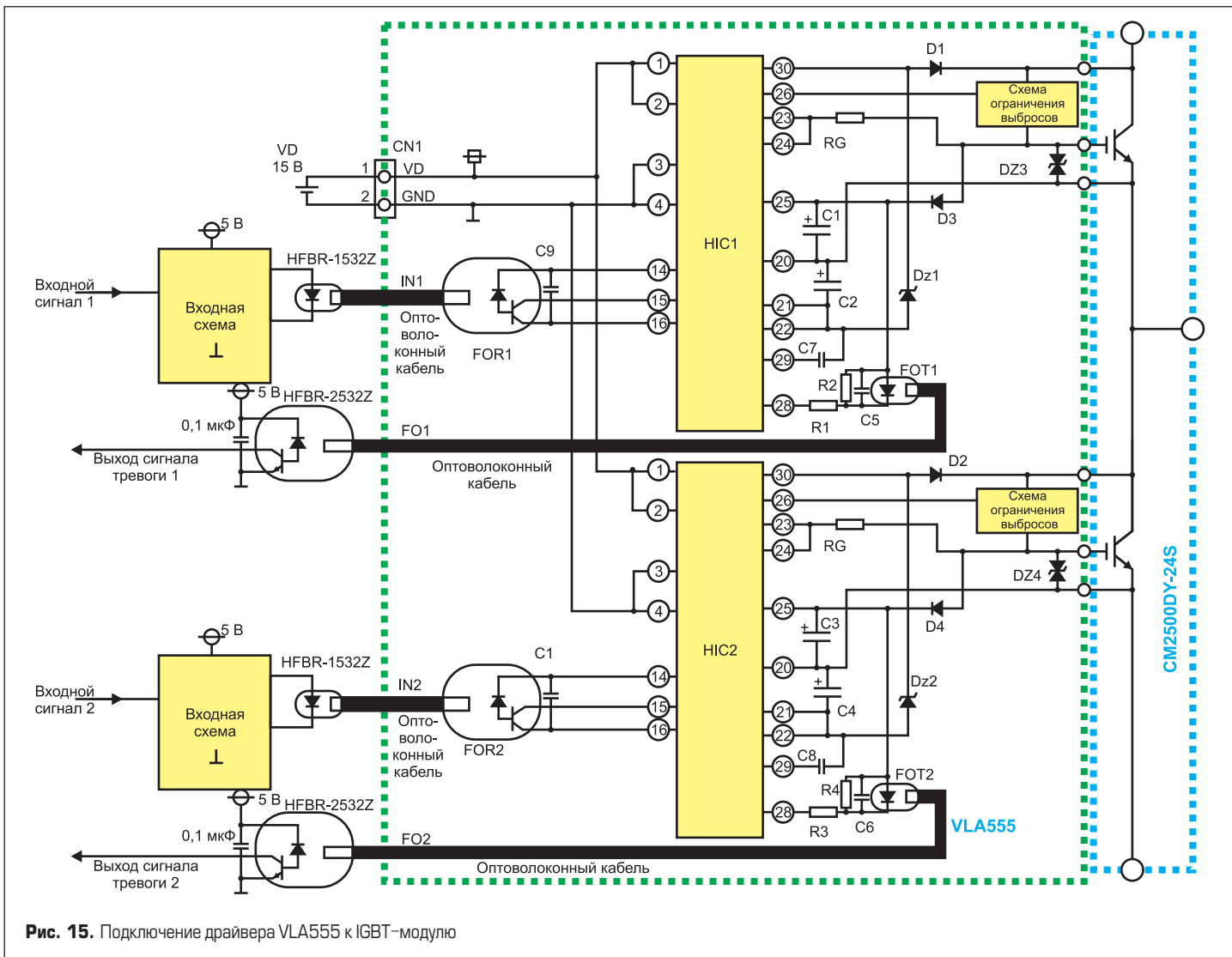


Рис. 15. Подключение драйвера VLA555 к IGBT-модулю

зования встроенной в микросхему защиты от короткого замыкания следует соединить выводы 30 и 20 через резистор сопротивлением 4,7 кОм, в этом случае диод D1 и стабилитрон Dz1 не нужны.

В 2014 г. Isahaya Electronics представила ряд новых продуктов, в том числе новый драйвер затворов IGBT VLA555-01R, предназначенный для использования совместно с силовыми IGBT-модулями New-MPD компаний Mitsubishi Electric и Powerex. Внешний вид модулей показан на рис. 14, схема подключения драйвера к модулю CM2500DY-24S — на рис. 15.

Главным отличием нового драйвера является применение оптических входных интер-

фейсов, дополнительных оптических передатчиков HFBR-1532Z и оптических приемников HFBR-2532Z компании Avago Technologies вместо разъема CN1 у драйверов VLA553, что позволило увеличить напряжение изоляции до 6000 В (1 мин). В новых модулях применены модифицированные в части входов управления гибридные микросхемы HIC1, HIC2, однако основные параметры новых драйверов соответствуют параметрам драйверов VLA553.

#### Литература

1. [www.ineltron.de/english/PDD-PRX\\_present\\_MegaPowerDual.pdf](http://www.ineltron.de/english/PDD-PRX_present_MegaPowerDual.pdf)

2. Фукалов Р. Модули IGBT серии Mega Power Dual // Силовая электроника. 2006. № 3.
3. [www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/igbt\\_newmpd\\_note\\_e.pdf](http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/igbt_newmpd_note_e.pdf)
4. [www.mitsubishielectric-mesh.com/download/document/20130712Zldmc.pdf](http://www.mitsubishielectric-mesh.com/download/document/20130712Zldmc.pdf)
5. [sem.mitsubishielectric.eu/products/power\\_semiconductors/igbt\\_modules](http://sem.mitsubishielectric.eu/products/power_semiconductors/igbt_modules)
6. [www.idc-com.co.jp/english/history/index.html](http://www.idc-com.co.jp/english/history/index.html)
7. [www.idc-com.co.jp/english/product/hybridic/pdf/SELECTIONGUIDE251007-2.pdf](http://www.idc-com.co.jp/english/product/hybridic/pdf/SELECTIONGUIDE251007-2.pdf)
8. Петропавловский Ю. Современные интегральные силовые модули DIP-IPM фирм Mitsubishi и Powerex // Силовая электроника. 2009. № 4.