

SKYPER 42LJ —

новый драйвер цифрового семейства SEMIKRON

Устройство управления изолированными затворами IGBT является одним из самых ответственных узлов силовой секции преобразователя, в значительной степени определяющим надежность и эффективность работы всей системы. Стремясь к максимальной унификации схемы и конструкции, многие ведущие производители драйверов пришли к идее универсального «ядра», предназначенного для решения широкого круга задач.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

В 2009 г. в производственной программе SEMIKRON появился драйвер SKYPER 42, обладающий повышенной мощностью и расширенными функциональными возможностями. Уникальной особенностью этого ядра является наличие серии плат-адаптеров, позволяющих подключать устройство управления к двум и более модулям.

Рынок ставит новые задачи, связанные в первую очередь с увеличением эффективности преобразования, что достигается, в частности, за счет параллельного и последовательного соединения нескольких инверторных ячеек. Одним из наиболее действенных методов увеличения КПД при этом является чере-

дование фаз («интерливинг»). Однако этот способ предъявляет очень высокие требования к качеству передачи сигнала. Новое ядро драйвера SKYPER 42LJ (Low Jitter) компании SEMIKRON объединяет преимущества цифровой передачи данных и широкие функциональные возможности.

SKYPER 32/42 — базовые «ядра» семейства

Основные технические характеристики SKYPER 42 (рис. 1):

- суммарный заряд затвора IGBT до 50 мкКл;
- гальваническая изоляция сигналов управления по стандарту EN50178 PD2;
- напряжение изоляции 4 кВ;
- выходной ток (пиковый) 30 А;
- мощность (на 1 канал) 4 Вт;
- рабочая частота до 100 кГц;
- стойкость к dv/dt до 100 кВ/мкс;
- виды защиты: DSCP — динамическая от перегрузки по току и K3 (подробно описана в [1, 2]), UVLO (Under Voltage LockOut), подавление коротких шумовых импульсов SPS, программируемое время t_{dr} .

Драйвер SKYPER 42 предназначен для управления полумостовыми модулями IGBT 06, 12 и 17 класса в инверторах мощностью до 1 МВт при напряжении DC-шины до 1200 В. Соединение ядра с силовыми ключами различного типа производится с помощью плат-адаптеров, позволяющих осуществлять управление как одиночными ключами, так и их параллельной группой (рис. 2). Для подключения затворов IGBT предусмотрены отдельные коннекторы, на которые подаются согласованные импульсы управления. Симметрирование контрольных сигналов позволяет обеспечить равномерную нагрузку параллельных IGBT и снизить уровень токовых перегрузок.

Адаптерные платы осуществляют механический и электрический интерфейс ядра и силовых модулей, на них устанавливаются компоненты,

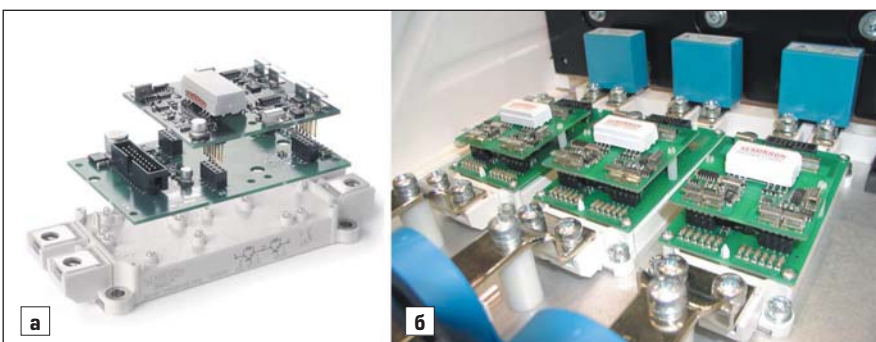


Рис. 1. Концепция «ядра»: а) соединение драйвера SKYPER 32 и модуля IGBT SEMiX через интерфейсную плату; б) трехфазный инвертор



Рис. 2. Адаптерные платы для сопряжения SKYPER 42: а) с модулями SKiM 63/93; б) 2×SEMiX; в) 2×IGBT 62 мм

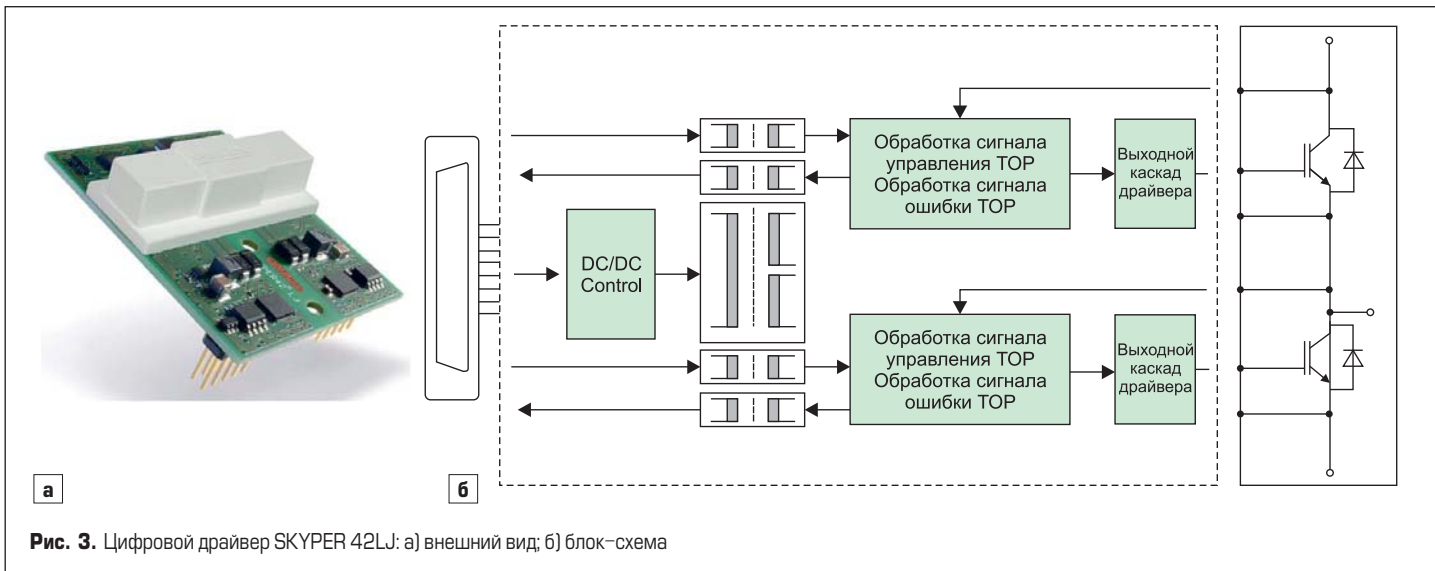


Рис. 3. Цифровой драйвер SKYPER 42LJ: а) внешний вид; б) блок-схема

являющиеся специфическими для конкретного IGBT (резисторы затвора, элементы, необходимые для настройки схемы защиты и регулировки «мертвого времени» t_{dt}). Одно из наиболее интересных решений показано на рис. 2а, где драйвер SKYPER 42 подключен к 500-А трехфазному модулю SKiM 93 через плату, объединяющую входы управления затворов IGBT трех плеч, образуя таким образом полумост с номинальным током около 1400 А.

Выходные каскады SKYPER 42 образованы комплементарными MOSFET с разделенными истоками, что позволяет оптимизировать динамические параметры IGBT в режиме включения и выключения и уменьшить величину коммутационных перенапряжений.

Рабочая частота драйвера IGBT ограничена уровнем рассеиваемой мощности, определяемой также суммарным зарядом затвора Q_G [5]. Максимальное значение частоты F_{max} рассчитывается по формуле: $F_{max} = I_{OUTav} / Q_G$ где I_{OUTav} — среднее значение выходного тока. Драйвер SKYPER 42LJ разработан для управления полумостовыми каскадами IGBT с максимальным значением Q_G (на 1 импульс), не превышающим 30 мкКл.

Величина заряда, необходимого для переключения IGBT, приводится в технической документации в виде графика $V_G = f(Q_G)$. Она зависит от размера кристалла, напряжения DC-шины и характеристик затвора. При расчете параметров драйвера необходимо учитывать, что он осуществляет коммутацию напряжения в пределах V_{Gon} и V_{Goff} . Для SKYPER 32/42 эти величины равны соответственно +15 и -7 В, т. е. на каждом цикле коммутации перепад dV_G составляет 22 В.

SKYPER 42LJ — цифровой драйвер со сверхнизким джиттером

Идеи, заложенные в проекте ядра SKYPER 42, были использованы при разработке его менее мощного варианта SKYPER 42LJ. Основная задача в этом случае состояла в существенном улучшении временных характеристик за счет применения цифрового способа передачи данных.

На рис. 3 приведена структурная схема драйвера SKYPER 42LJ. От базовой версии он отличается использованием независимых каналов передачи контрольных импульсов, сигналов ошибки и управления источником питания выходных каскадов. Кроме того, SKYPER 42LJ способен блокировать коммутацию транзисторов при повышении напряжения на коллекторе до опасного уровня. При разработке версии 42LJ была проведена модернизация алгоритмов защиты, позволяющая применять данное устройство в составе трехуровневого инвертора (схема 3L NPC). Потребность в стандартном драйвере 3L NPC, для которого SEMIKRON выпускает серию стандартных модулей в различных корпусах [3], назрела давно.

Двухканальный драйвер SKYPER 42LJ предназначен для управления полумостовыми модулями IGBT с рабочим напряжением 600, 1200 и 1700 В. При средней выходной мощности 3 Вт (на канал) устройство способно рабо-

тать с силовыми ключами с током до 1000 А. Специализированная микросхема (ASIC) высокой степени интеграции осуществляет независимое управление изолированным источником питания выходных каскадов и формирование потока данных, что гарантирует прецизионную передачу сигнала при уровне джиттера $\pm 1,2$ нс и фазовой ошибке менее 20 нс во всем диапазоне рабочих температур (рис. 4). Подобные временные характеристики, а также стабилизация напряжения затвора обеспечивают симметричную работу параллельных силовых ключей без использования выравнивающих индуктивностей. Благодаря цифровому способу обработки данных параметры SKYPER 42LJ не зависят от разброса номиналов компонентов и не меняются в течение срока службы.

По сравнению с аналогичными устройствами управления, выпускаемыми, например, компанией ST-Консерт, драйверы SEMIKRON имеют несколько большее время задержки про-

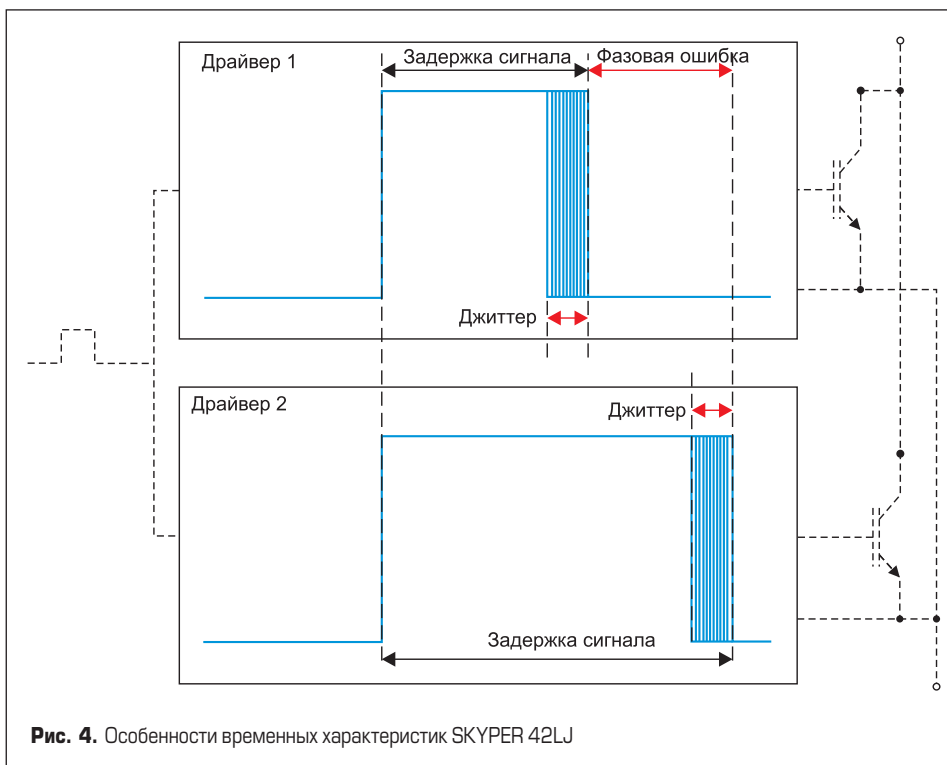
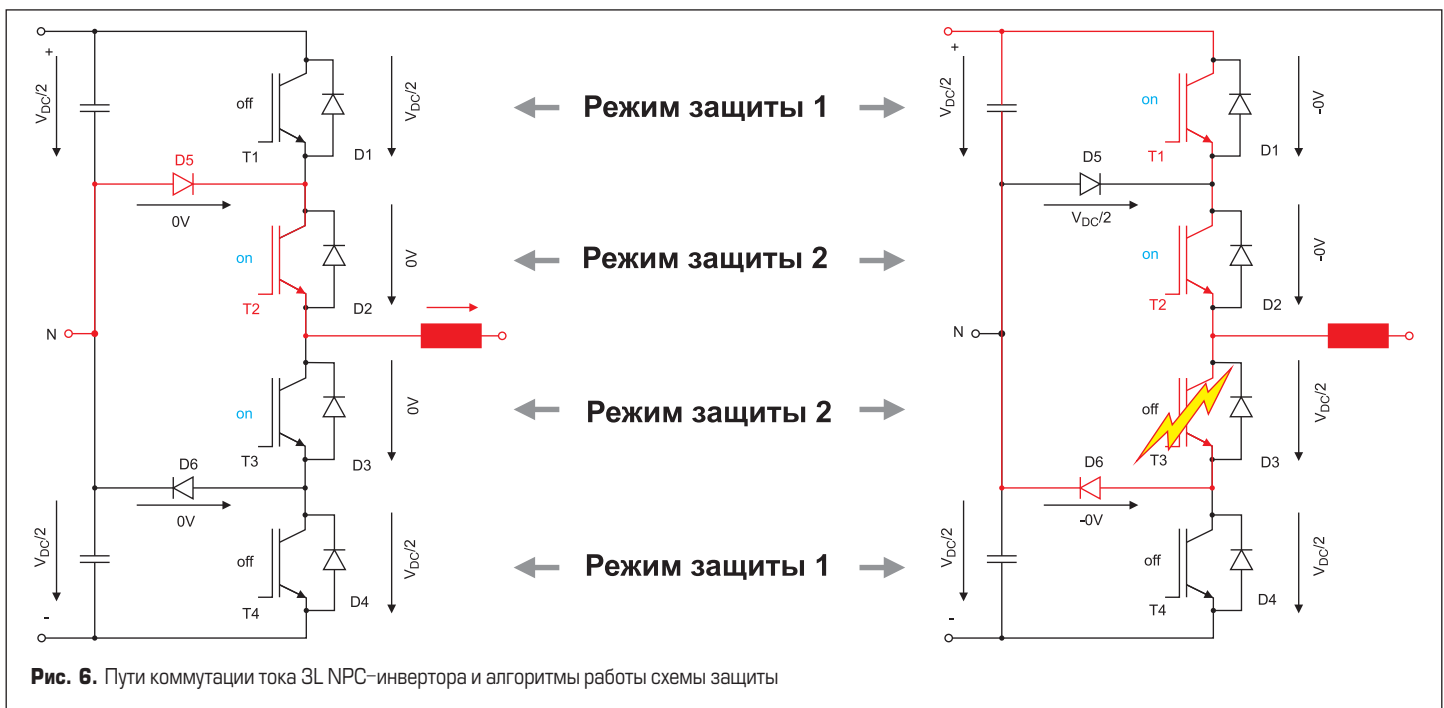
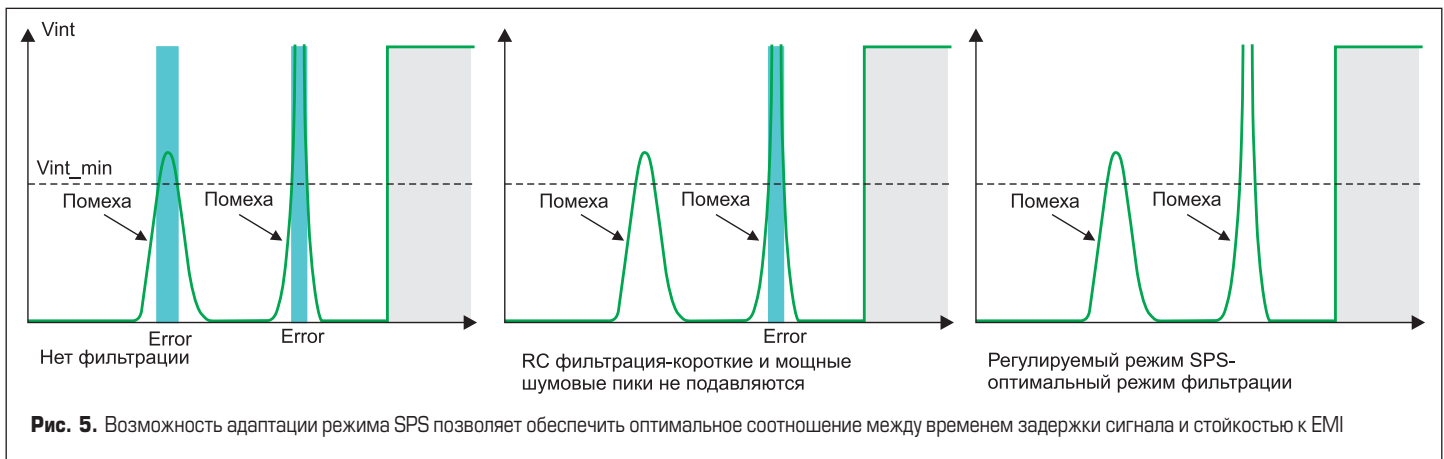


Рис. 4. Особенности временных характеристик SKYPER 42LJ

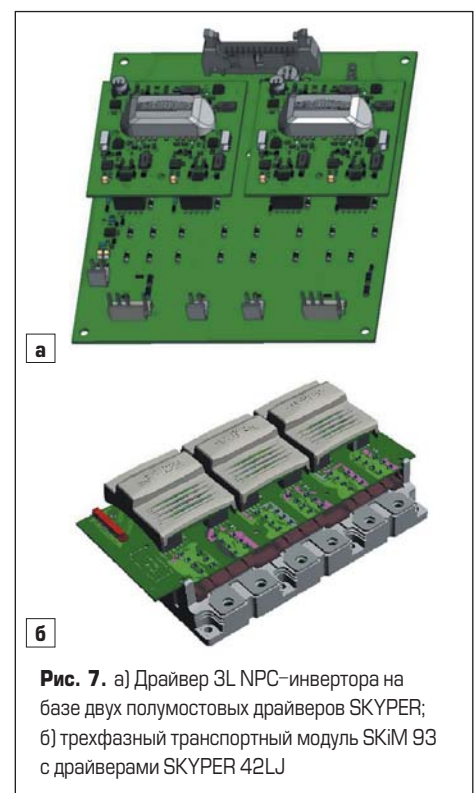


хождения сигнала, что обусловлено наличием блока подавления коротких импульсов SPS (Short Pulse Suppression). Режим SPS позволяет исключить спорадическую высокочастотную коммутацию IGBT, которая может быть вызвана, например, сбоями центрального процессора или паразитными осцилляциями в контрольных цепях. Фильтр SPS работает в обратном направлении, предотвращая проникновение коммутационных помех в канал управления. Он подавляет все сигналы длительностью менее 625 нс (300 нс для версии LJ) и создает соответствующую задержку, однако в большинстве практических применений это не влияет на управляемость и практически не вносит искажений в работу системы. У SKYPER 42LJ предусмотрена возможность регулирования времени подавления шумовых импульсов (рис. 5), что позволяет адаптировать ядро для конкретной задачи и обеспечить минимальное время задержки прохождения сигнала и высокую стойкость к электромагнитным помехам.

На рис. 6 показаны возможные пути коммутации тока в фазе трехуровневого инвертора. Как видно из схемы, стойка 3L NPC-преобразователя может рассматриваться как два последовательно соединенных полумоста IGBT. Однако при

этом есть два принципиальных отличия в алгоритмах управления. Существуют режимы, когда оба ключа в модуле открыты, поэтому функция InterLOCK в драйвере должна быть отключена. Кроме того, при перегрузке по току и выходе из насыщения (DESAT) IGBT следует закрывать не одновременно, а в строго определенной последовательности. Транзисторы T1 и T4 при обнаружении аварии должны блокироваться мгновенно (режим защиты 1). Если же состояние DESAT фиксируется для T2 или T3, то эта информация должна по изолированному каналу транслироваться на управляющий контроллер, который будет отключать транзистор через некоторое время, определяемое режимом работы схемы (режим защиты 2). То же самое относится к многоуровневой схеме (MLI), состоящей из последовательного соединения однофазных ячеек [4].

Все описанные выше функции реализованы в схеме управления SKYPER 42LJ. Разделение каналов передачи контрольных импульсов и сигналов неисправности обеспечивает быструю реакцию в аварийных режимах в двух- и трехуровневых схемах и исключает перекрестную связь. Внешний вид устройства управления 3L NPC-инвертором показан на рис. 7а.



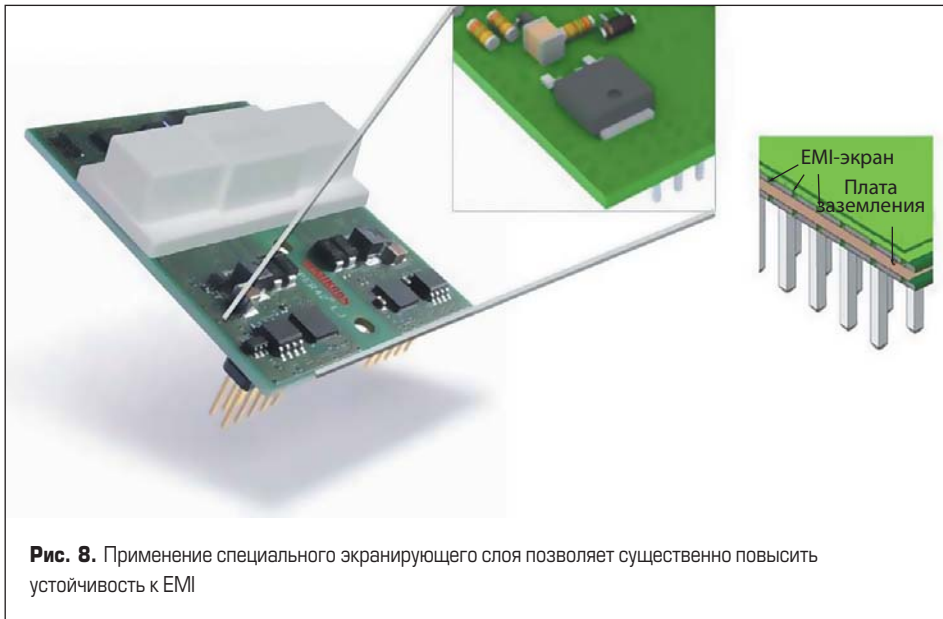


Рис. 8. Применение специального экранирующего слоя позволяет существенно повысить устойчивость к EMI

На базе ядра SKYPER 42LJ компанией SEMIKRON разработан трехфазный драйвер модуля SKiM 63/93 (рис. 76), предназначенного для применения в тяговых приводах электрического и гибридного транспорта. Особенностью силовых ключей серии SKiM является использование технологии низкотемпературного спекания для установки кристаллов, что позволило обеспечить наивысшие показатели стойкости к термоциклированию и расширить температурный диапазон [6].

Надежность и помехозащищенность

При разработке SKYPER 42 была проведена модификация всех основных узлов устройства и спроектирована новая специализированная микросхема (ISiC). В изделии использован помехозащищенный 15-В интерфейс, внедрен настраиваемый цифровой блок подавления шумовых импульсов. Передача управляющих сигналов и импульсов управления изолированным источником питания осуществляется с помощью трансформатора со сверхнизкой проходной емкостью, что позволило довести иммунитет к dv/dt до 100 кВ/мкс. В SKYPER 42 / 42LJ реализован режим стабилизации амплитуды импульсов управления затворами IGBT, это позволило значительно уменьшить влияние эффекта Миллера.

Помехозащищенность компонентов семейства SKYPER 42 вдвое превышает уровень, оговоренный стандартами EN. Этого удалось достичь путем оптимизации топологии печатной платы и применения специального экранирующего слоя, соединенного переходными отверстиями с общим проводом по контуру платы (рис. 8). Устойчивость к электромагнитным шумам повышена и у управляющей микросхемы, размещенной в металлокерамическом корпусе. Напряжение изоляции между сигнальными и силовыми цепями доведено до 7 кВ.

В результате принятых мер показатель MTBF (наработка на отказ) драйвера в соответствии со стандартом SN29500 составляет более 6 млн ч, что в 8–9 раз превышает стандартные показатели

компонентов данного класса. Квалификационные испытания SKYPER 42LJ проходят по расширенной программе в режимах, имитирующих реальные условия применения.

Приведем расчет предполагаемого количества отказов в год (N_f) при условии, что изделие в течение года находится в эксплуатации 220 дней по 8 ч в день, т. е. время работы за год $T_{op} = 220 \times 8 = 1760$ ч. При $MTBF = 6$ млн ч и температуре окружающей среды $+40^\circ\text{C}$ интенсивность отказов $FIT = 1/MTBF = 170 \times 10^{-9}$ (ч⁻¹). При этом $N_f = FIT \times T_{op} \times 100\% = 170 \times 10^{-9} \times 1760 \times 100\% = 0,023\%$ /год. Количество компонентов, работающих без отказов (n_s), определяется следующим образом: $n_s = MTBF/T_{op} - 1 = 3408$. Это означает, что только один из 3408 драйвер-

ров, в среднем, должен выйти из строя в течение года при данных условиях эксплуатации.

Впервые в практике SEMIKRON в схеме SKYPER 42LJ предусмотрена возможность активного ограничения напряжения на коллекторе (Active Clamping). Режим Active Clamping широко используется рядом производителей (например, ST-Concept) в высоковольтных преобразователях. Активное ограничение достигается путем включения между коллектором и затвором цепочки из n импульсных стабилизаторов с напряжением пробоя V_Z . При превышении порогового уровня, определяемого суммарной величиной $n \times V_Z$, транзистор открывается и переходит в линейное состояние, принимая на себя энергию перенапряжения.

Компания SEMIKRON не рекомендует применять режим Active Clamping в низковольтных устройствах и не применяет его в своих разработках. Кроме того, что IGBT в линейном режиме должен рассеивать колоссальную энергию, использование такой схемы увеличивает риск возникновения дребезга в цепи затвора, что может привести к неуправляемой высокочастотной коммутации.

При корректно спроектированном звене постоянного тока возникновение опасного перенапряжения на коллекторах исключено во всех условиях эксплуатации. Это подтверждается испытаниями на устойчивость к короткому замыканию, проводимыми для каждой выпускаемой SEMIKRON силовой сборки. На рис. 9 показаны результаты подобного теста, полученные при включении каждого из шести транзисторов трехфазного инвертора на КЗ-нагрузку с распределенной индуктивностью около 1 мкГн. Испытания проводятся при $V_{DC} = 850$ В, что является максимально допустимой величиной для IGBT 12 класса. Как видно из рисунка, пиковая

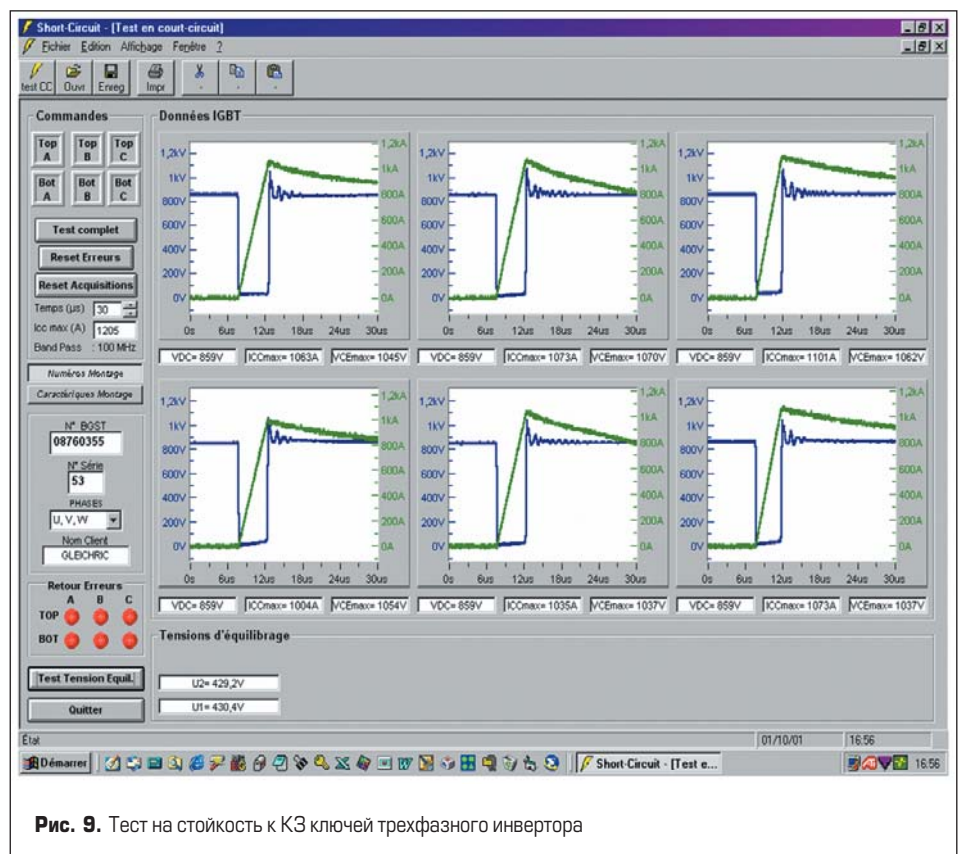


Рис. 9. Тест на стойкость к КЗ ключей трехфазного инвертора

Таблица. Виды и условия сертификационных испытаний драйверов SKYPER

Вид испытаний	Условия испытаний	Стандарт
Электрические характеристики	$T_a = -40/+25/+85\text{ }^\circ\text{C}$	SEMİKRON
Напряжение изоляции	4,0 кВ (ACrms), 60 с	EN50178
Диэлектрические свойства (частичный разряд)	Исп. напряжение >1500 В (AC) при $Q \leq 10$ пКл	VDE 0110-20
Термоциклирование	100 циклов, $T_{stmax}-T_{stmin}$	IEC 60068-2-14 Test Na
Климатика	85 °C, 85% RH	IEC 60068-1
Напряжение пробоя	Силовые и сигнальные терминалы: 4 кВ/5 кГц	EN61000-4-4
Устойчивость к ESD	Контактный разряд: 6 кВ. Грозовой разряд: 8 кВ	EN61000-4-4
Радиочастотные поля	80–1000 МГц; 10 В/м; 80% AM 1 кГц	EN61000-4-4
Радиочастотные помехи	80–1000 МГц; 10 В/м; 80% AM 1 кГц	EN61000-4-4
Вибрация	Синусоидальная, 5g, 2 ч по каждой оси (x, y, z)	IEC 68-2-6
Удары	Полусинус. импульсы, 30g, 3 по каждой оси в двух направлениях	IEC 68-2-27

величина напряжения «коллектор–эмиттер», измеренного непосредственно на силовых терминалах модулей, даже в этом случае находится на безопасном уровне.

Однако в трехуровневом преобразователе очень сложно обеспечить идеальную копланарность шин, поэтому распределенная индуктивность звена постоянного тока оказывается достаточно большой. Кроме того, при работе с плохими сетями режим Active Clamping может стать последним «рубежом обороны», способным спасти IGBT от внешней высоковольтной помехи. Поэтому у драйвера SKYPER 42LJ предусмотрена возможность активизации режима активного ограничения по входам CLMP TOP/BOT. Если сигнал на этих входах превышает пороговый уровень, схема защиты блокирует импульсы выключения затвора на время обнаружения состояния перенапряжения.

Все компоненты серии SKYPER подвергаются 100%-ному выходному контролю электрических параметров, а также тестам

на устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Перечень испытаний и номера соответствующих стандартов приведены в таблице.

Заключение

Применение цифровых технологий в устройствах управления изолированными затворами MOSFET/IGBT позволяет существенно улучшить их временные характеристики и показатели надежности, расширить функциональные возможности. Драйвер SKYPER 42LJ стал вторым после SKYPER 52 [7] компонентом семейства, в котором реализована передача данных по дифференциальному каналу с помощью пакета высокочастотных импульсов. Благодаря этому удалось уменьшить разброс временных параметров, а также сделать их независимыми от изменения номиналов компонентов схемы и стабильными в течение всего срока службы.

Среднее время наработки на отказ (MTBF) SKYPER 42LJ в несколько раз превышает средние показатели доступных на рынке мощных схем управления затворами. Оптимизированная конструкция платы, использование уникального ЕМІ-экрана и встроенный блок подавления шумовых импульсов гарантируют высокий уровень защиты от электромагнитных помех.

Цифровой способ транслирования данных и возможность настройки алгоритма схемы защиты позволяют применять SKYPER 42LJ в трехуровневых инверторах с фиксирующими диодами (3L NPC) и многоуровневых схемах (MLI).

Литература

1. SKYPER 42, 42LJ. Техническое описание. SEMİKRON. 2012.
2. M. Hermwille, T. Grasshof. SKYPER – Modern and Simple Driver // Power Systems Design. 2004. № 6.
3. Колпаков А. Трехуровневые преобразователи. Инструкция по эксплуатации // Силавая электроника. 2012. № 1.
4. Колпаков А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей // Силавая электроника. 2007. № 2.
5. Колпаков А. DriverSEL — простой и эффективный инструмент разработчика // Силавая электроника. 2005. № 2.
6. Колпаков А. Оптимизация характеристик силовых модулей для сложных условий эксплуатации // Силавая электроника. 2008. № 1.
7. Колпаков А. SKYPER 52 — сверхмощный цифровой драйвер SEMİKRON // Силавая электроника. 2008. № 3.