

SKYPER 42 — развитие концепции ядра

Устройство управления 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, ведущие производители драйверов (СТ-Concept, SEMIKRON) пришли к идее «ядра» — универсального модуля управления затворами.

**Йоханнес Крапп
(Johannes Krapp)**

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Для сопряжения ядра SKYPER 32 с модулями IGBT различных типов компания SEMIKRON предлагает серию адаптерных плат [1, 2], на которые устанавливаются резисторы затвора и элементы схемы защиты. Мощность SKYPER 32 составляет 2 Вт на канал, а имеющиеся адаптеры позволяют устанавливать его как на модули серии SEMiX, так и на IGBT в стандартных корпусах. На базе данных компонентов можно создавать инверторы мощностью до 250 кВт (рис. 1).

Недавно в производственной программе SEMIKRON появилось новое ядро схемы управления затворами SKYPER 42, позволяющее существенно расширить мощностные характеристики и функциональные возможности подобных изделий.

SKYPER 32/32PRO — базовый элемент семейства

Универсальный двухканальный модуль управления затворами SKYPER 32/32PRO [1, 2] разрабатывался как основа для построения серии драйверов широкого применения. Устройство содержит набор базовых узлов, необходимых в большинстве практических применений: блок обработки сигнала с изолированным интерфейсом, схему защиты

и мониторинга, выходные каскады управления изолированными затворами и DC/DC-преобразователь для питания выходных каскадов драйвера.

Основные технические характеристики SKYPER 32:

- выходной ток (пиковый) — 15 А;
- мощность (на 1 канал) — 2 Вт;
- заряд затвора управляемого транзистора — до 6,3 мкКл;
- рабочая частота — до 50 кГц;
- напряжение изоляции — 4 кВ (по стандарту EN50178 PD2);
- программируемое «мертвое» время t_{di} ;
- виды защиты: DESAT (desaturation — выход из насыщения), UVLO (Under Voltage LockOut), подавление коротких шумовых импульсов.

Благодаря использованию специализированной интегральной схемы удалось свести к минимуму количество внешних дискретных элементов. Двухканальная микросхема SKiC 2001, разработанная SEMIKRON для применения в драйверах и интеллектуальных силовых модулях серии SKiP, выполняет следующие функции:

- подавление шумовых сигналов;
- нормирование уровней и фронтов входных сигналов;
- мониторинг напряжения питания (UVLO);
- формирование сигнала ошибки;

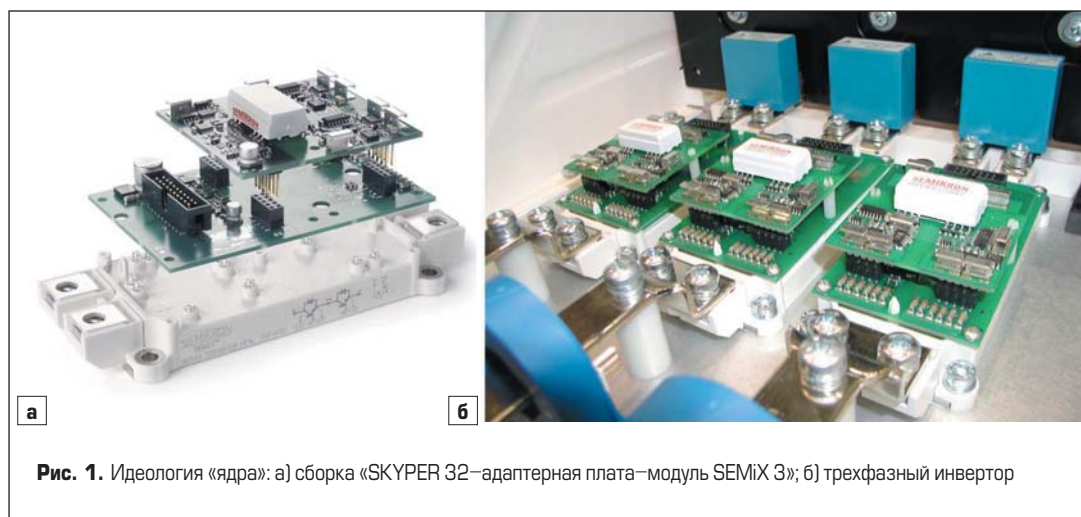


Рис. 1. Идеология «ядра»: а) сборка «SKYPER 32–адаптерная плата–модуль SEMiX 3»; б) трехфазный инвертор

- запрет одновременного включения транзисторов полумоста (функция Interlock), формирование времени задержки переключения t_{dp} ;
- управление встроенным изолированным DC/DC-конвертером.

SKYPER 52 — сверхмощный цифровой драйвер

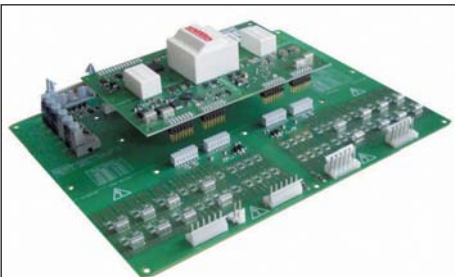


Рис. 2. Цифровой драйвер SKYPER 52 и плата адаптера

В сверхмощном двухканальном драйвере SKYPER 52 [4], предназначенном для управления IGBT с суммарным током коллектора до 10 кА, использован цифровой способ обработки информации. Изолирующий барьер в данном изделии формируется с помощью трех импульсных трансформаторов: два используются для передачи данных, один — для управления DC/DC-конвертером, питающим выходные каскады драйвера. Благодаря сверхнизкому значению паразитной емкости перехода (единицы пФ) и применению дифференциального канала удалось достичь хорошего иммунитета устройства к быстрым перепадам напряжения: SKYPER 52 способен надежно работать при dv/dt до 100 кВ/мкс.

Основные технические характеристики SKYPER 52:

- выходной ток (пиковое значение) I_{out_peak} — 50 А;
- напряжение управления затворами $V_{Gonl/off}$ — ±15 В;
- выходная мощность — 9 Вт на канал;
- мониторинг критического повышения частоты;
- защита от падения напряжения управления UVLO;
- динамическая защита от перегрузки по току и КЗ с индивидуальной настройкой и функцией IntelliOff;
- канал изолированной передачи сигнала датчика (например, температура IGBT);
- диагностический CAN-интерфейс.

Драйвер SKYPER 52 принимает импульсы, вырабатываемые микроконтроллером или ЦСП, на частоте до 100 кГц без ограничения скважности и преобразует их в двуполярные сигналы управления затворами. Цифровые входы и выходы драйвера совместимы с TTL-логикой со стандартными уровнями 3,3 В и 5 В, они могут быть подключены непосредственно к контроллеру без использования устройств сдвига уровня или буферов.

Уникальной особенностью схемы защиты SKYPER 52 является возможность ступенчатого изменения резистора затвора в процессе отключения тока КЗ IGBT (режим IntelliOff). Благодаря этому удается обеспечить высокую скорость отключения аварийного режима при минимальном значении перенапряжения и исключить рост динамических потерь.

Для повышения помехозащищенности в применениях высокой мощности в SKYPER 52 применен метод дифференциальной обработки сигнала. Поток высокочастотных импульсов передается по двум отдельным

линиям и далее обрабатывается с помощью низкоимпедансного инструментального усилителя. Такая схема обеспечивает хорошее подавление синфазных шумов и, как следствие, она имеет низкую чувствительность к электромагнитным помехам. Изолированные статусные сигналы доступны на диагностическом разъеме с CAN-интерфейсом.

Конструктивно SKYPER 52 представляет собой «ядро», подключаемое к затворам параллельных модулей IGBT с помощью адаптерной платы, показанной на рис. 2.

SKYPER 42 — расширение концепции «ядра»

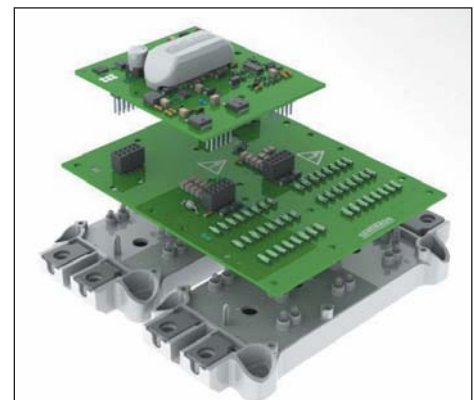


Рис. 3. Драйвер на основе ядра SKYPER 42 способен управлять параллельным соединением двух и трех модулей IGBT

Разработка нового двухканального ядра SKYPER 42 (рис. 3, 4) решала задачи расширения диапазона применения и улучшения показателей надежности.

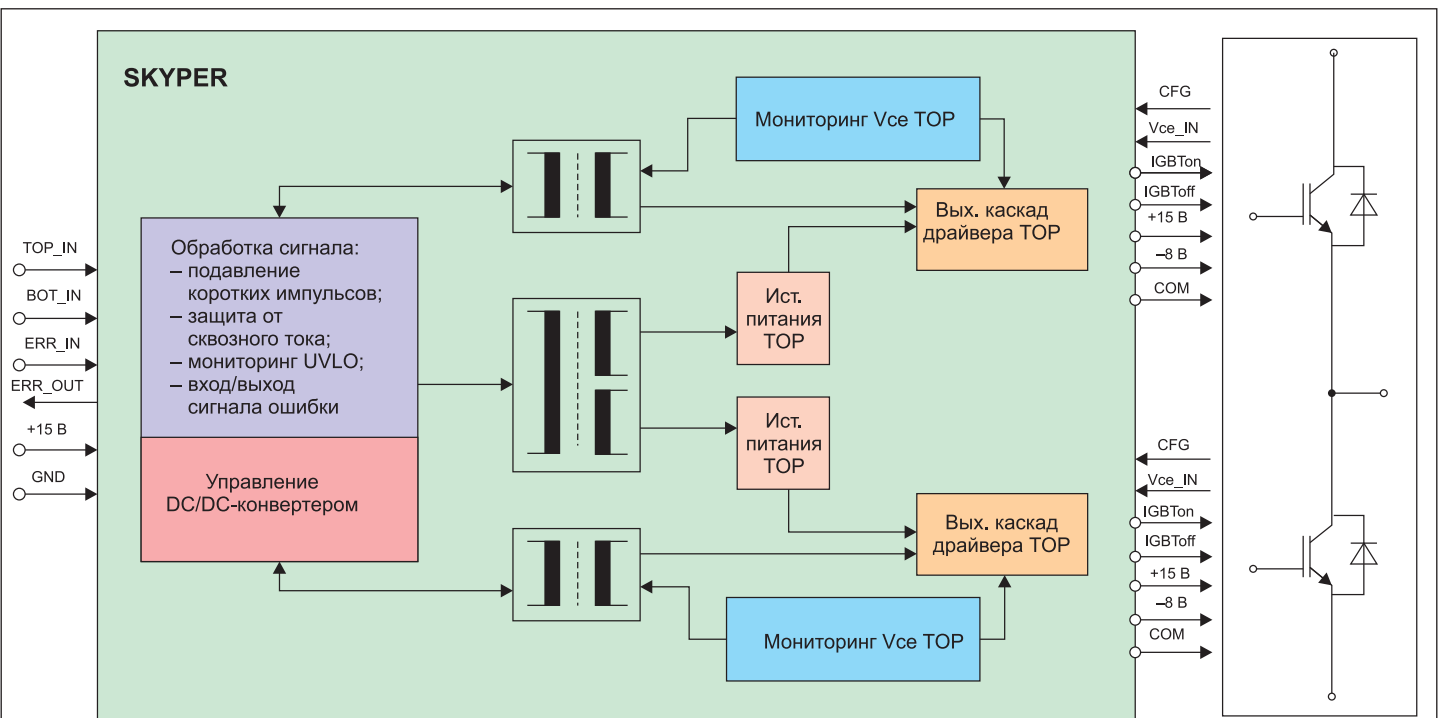


Рис. 4. Функциональная схема SKYPER 42



Рис. 5. Адаптерные платы для сопряжения SKYPER 42: а) с модулями SKiM 63; б) с 2×SEMiX; в) с 2×стандартных IGBT 62 мм

Основные технические характеристики SKYPER 42:

- 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 КЗ (подробно описана в [1, 2]), UVLO (Under Voltage LockOut), подавление коротких шумовых импульсов SPS, программируемое время t_{dr} .

SKYPER 42 предназначен для управления полумостовыми модулями IGBT 12-го и 17-го классов при напряжении DC-шины до 1200 В. Токвые характеристики драйвера позволяют использовать его в составе инверторов мощностью до 1 МВт и выше.

Для подключения SKYPER 42 к силовым ключам различного типа предусмотрена серия плат-адаптеров, позволяющих осуществлять управление как одиночными модулями, так и их параллельным соединением. Виды интерфейсных плат и способ их соединения с «ядром» показаны на рис. 5. Для подклю-

чения затворов параллельных IGBT предусмотрены отдельные коннекторы, на которые подаются согласованные импульсы управления. Симметрирование контрольных сигналов позволяет снизить уровень токовых перегрузок, обеспечить высокую эффективность преобразования, полностью реализовать мощностные характеристики IGBT.

Адаптерные платы осуществляют механический и электрический интерфейс ядра с силовыми модулями, на них устанавливаются компоненты, являющиеся специфическими для конкретного IGBT:

- резисторы затвора R_{gon}, R_{goff} ;
- элементы, необходимые для регулировки чувствительности и постоянной времени схемы защиты DESAT;
- элементы, необходимые для регулировки времени задержки переключения t_{dr} .

Выходные каскады SKYPER 42 образованы комплементарными MOSFET-транзисторами с разделенными истоками. Такая схема позволяет изменять скорость переключения IGBT за счет подбора резисторов включения/выключения затвора $R_{Gon/Off}$. Оптимизация динамических режимов дает возможность снизить уровень потерь и минимизировать величину коммутационных перенапряжений.

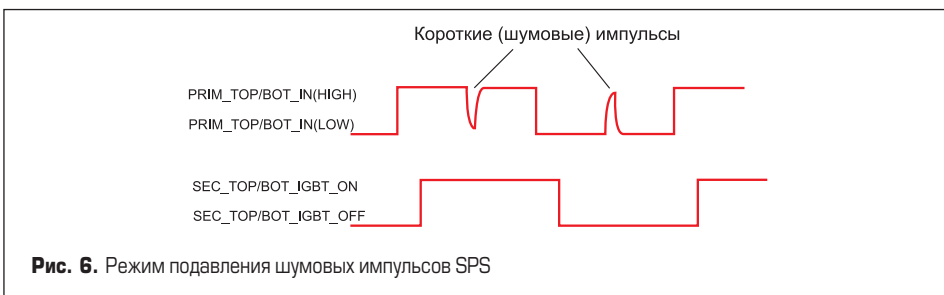


Рис. 6. Режим подавления шумовых импульсов SPS

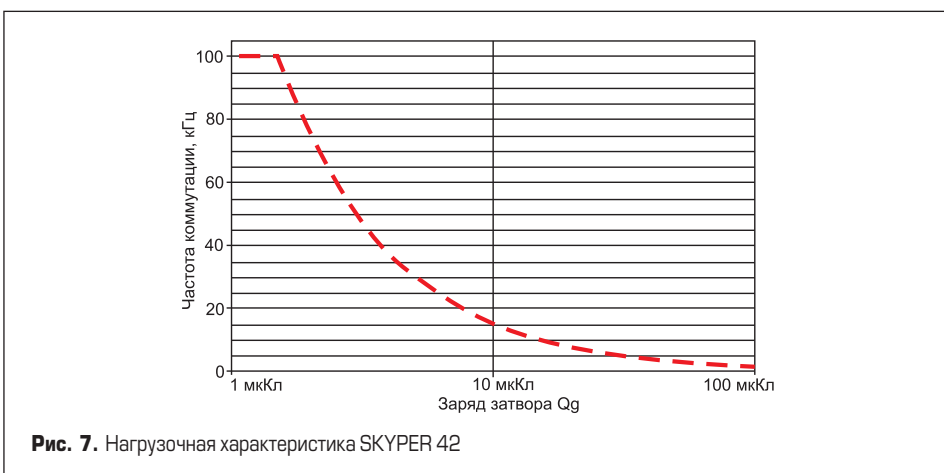


Рис. 7. Нагрузочная характеристика SKYPER 42

Подбор резисторов затвора не позволяет обеспечить абсолютно безопасный уровень динамических всплесков, особенно в режиме отключения тока короткого замыкания (КЗ). Эта задача должна решаться за счет минимизации паразитных индуктивностей при проектировании дизайна звена постоянного тока, а также корректного выбора номиналов снабберов. Отметим, что данное препятствие во многом удалось преодолеть в цифровом драйвере SKYPER 52 благодаря использованию режима «интеллектуального отключения» IntelliOff.

По сравнению с аналогичными устройствами управления, выпускаемыми, например, компанией ST-Concept, драйверы SEMIKRON имеют несколько большее время задержки прохождения сигнала, что обусловлено наличием блока подавления коротких импульсов. Режим SPS позволяет защитить IGBT от попадания высокочастотных шумов в канал управления и, соответственно, от неуправляемого локального перегрева кристаллов. Как показано на рис. 6, все сигналы с длительностью менее 625 нс подавляются, а импульсы включения 750 нс и более подаются на каскады управления затворами. Для большинства конкретных применений такая задержка не ухудшает управляемость и практически не вносит искажений в работу системы. При этом режим SPS позволяет исключить спорадическую высокочастотную коммутацию IGBT, которая может быть вызвана, например, сбоем контроллера или паразитными осцилляциями в цепи управления.

Рабочая частота любого устройства управления изолированными затворами ограничена уровнем рассеиваемой мощности, которая определяется частотой коммутации и суммарным зарядом затвора Q_G IGBT [3]. Максимальное значение частоты F_{max} рассчитывается по формуле: $F_{max} = I_{OUTav}/Q_G$, где I_{OUTav} — среднее значение выходного тока (150 мА для SKYPER 42).

Драйвер SKYPER 42 разработан для управления полумостовыми каскадами IGBT с максимальным зарядом затвора (на 1 импульс), не превышающим 100 мкКл. При работе с величинами Q_G , превышающими 2,5 мкКл, необходима установка внешних бустерных емкостей из расчета 4 мкФ/1 мкКл.

Значение заряда, необходимого для переключения IGBT, приводимое в технической документации в виде графика $V_G = f(Q_G)$, зависит от размера кристалла, напряжения DC-шины и напряжения затвора. При расчетах характеристик драйвера необходимо учитывать, что он осуществляет коммутацию напряжения в пределах V_{Gon} и V_{Goff} . Для SKYPER 42 эти величины составляют +15 и -7 В, т. е. на каждом цикле коммутации напряжение затвора меняется на $dV_G = 22$ В. Мощность, рассеиваемая схемой управления, определяется произведением среднего тока I_{OUTav} , на dV_G . Нагрузочная характеристика драйвера SKYPER 42, связывающая рабочую частоту и величину максимального заряда затвора, приведена на рис. 7.

Надежность и помехозащищенность

При разработке SKYPER 42 была проведена модификация основных узлов схемы, начиная с управляющего контроллера. В изделии использован помехозащищенный 15-V интерфейс, внедрен новый цифровой блок подавления шумовых импульсов. Передача управляющих сигналов и импульсов управления изолированным источником питания осуществляется с помощью специализированных трансформаторов со сверхнизкой проходной емкостью, что позволило довести иммунитет к dv/dt до 100 кВ/мкс. Для повышения надежности работы преобразовательной системы в SKYPER 42 реализован режим стабилизации амплитуды импульсов управления затворами IGBT. Благодаря оптимизации топологии печатной платы и применения специального экранирующего слоя помехозащищенность изделия в два раза превышает уровень, оговоренный стандартами EN.

Квалификационные испытания SKYPER 42 проходят по расширенной программе в режимах, имитирующих реальные условия применения. В результате принятых мер показатель $MTBF$ (наработка на отказ) драйвера в соответствии со стандартом SN29500 составляет более 2 млн часов, что в три раза превышает стандартные требования к компонентам данного класса.

Приведем для примера расчет предполагаемого количества отказов в год N_f для драйвера SKYPER 42. Предположим, что изделие в течение года находится в эксплуатации

220 дней, по 8 ч в день. Тогда время работы за год $T_{op} = 220 \times 8 = 1760$ ч. Поскольку $MTBF$ для драйвера SKYPER 42 составляет не менее 2 млн часов при температуре окружающей среды +40 °С, интенсивность отказов $FIT = 1/MTBF = 500 \times 10^{-9}$ (ч⁻¹).

При этом $N_f = FIT \times T_{op} \times 100\% = 500 \times 10^{-9} \times 1760 \times 100\% = 0,088\%$ /год. Количество компонентов, работающих в течение года без отказов $n_s = MTBF/T_{op} - 1 = 1135$. Это означает, что 1 из 1136 драйверов, в среднем, должен выйти из строя в течение года при данных условиях эксплуатации.

Расчитываемый процент брака зависит от времени работы; например, при $T_{op} = 400$ ч количество прогнозируемых отказов будет гораздо меньше:

$N_f = 500 \times 10^{-9} \times 400 \times 100\% = 0,02\%$ /год, или 200 ppm (parts per million, промилле).

Все компоненты серии SKYPER подвергаются 100% выходному контролю электрических параметров, а также тестам на устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Перечень испытаний и номера соответствующих стандартов приведены в таблице 1.

Заключение

Разработка нового устройства управления затворами SKYPER 42 в дополнение к выпускаемым SKYPER 32 и 52 позволила практически полностью перекрыть диапазон мощностей промышленных преобразователей.

Основные характеристики компонентов семейства SKYPER приведены в таблице 2.

Среднее время наработки на отказ SKYPER 42 в три раза превышает средние показатели доступных на рынке мощных схем управления затворами. Оптимизированная конструкция платы, использование уникального экрана ЕМI и встроенный блок подавления шумовых импульсов гарантируют высокий уровень защиты от электромагнитных помех. SKYPER 42 способен управлять параллельным соединением IGBT 12-го и 17-го классов с суммарным зарядом затвора 50 мКл, что позволяет драйверу работать в инверторах мощностью свыше 1 МВт.

Гальваническая развязка управляющих импульсов и работа изолированного DC/DC-конвертера SKYPER 42 обеспечивается специализированными импульсными трансформаторами. Встроенный источник питания вырабатывает напряжение +15/-7 В, необходимое для работы выходных каскадов и формирования сигналов включения/выключения затворов.

Простота применения драйвера SKYPER 42 обеспечивается благодаря наличию серии плат-адаптеров, предназначенных для сопряжения устройства управления с модулями различного типа. Предусмотрена возможность работы с параллельным соединением IGBT, подключаемым к отдельным коннекторам, на которые подаются согласованные сигналы управления. Симметрирование параллельного режима работы позволяет снизить уровень токовых перегрузок, обеспечить высокую эффективность преобразования, полностью реализовать мощностные характеристики кристаллов IGBT. Оптимизация динамических режимов работы дает возможность минимизировать величину коммутационных перенапряжений и исключить необходимость применения режима активного ограничения V_{ce} .

При разработке SKYPER 42 был использован многолетний опыт компании SEMIKRON в проектировании схем управления и лучшие решения, примененные в схемах SKYPER 32 и 52. Требования по улучшению тепловых режимов, повышению помехозащищенности, уменьшению габаритных размеров и простоте использования являются ключевыми для современных промышленных применений. Все они реализованы в новой разработке SEMIKRON — мощном двухканальном драйвере SKYPER 42.




Литература

1. Hermwille M., Grasshof T. SKYPER — Modern and Simple Driver // Power Systems Design. 2004. № 6.
2. Колпаков А. SEMiX + SKYPER = адаптивный интеллектуальный модуль IGBT // Силовая электроника. 2005. № 1.
3. Колпаков А. DriverSEL — простой и эффективный инструмент разработчика // Силовая электроника. 2005. № 2.
4. Колпаков А. SKYPER 52 — сверхмощный цифровой драйвер IGBT // Силовая электроника. 2008. № 3.
5. www.semikron.com

Таблица 1. Виды и условия сертификационных испытаний драйверов SKYPER

Вид испытаний	Условия испытаний	Стандарт
Электрические характеристики	$T_a = -40/+25/+85$ °С	SEMIKRON
Напряжение изоляции	4,0 кВ (ACrms), 60 с	EN50178
Диэлектрические свойства (частичный разряд)	Исп. напряжение >1500 В (AC) @ Q ≤ 10 пКл	VDE 0110-20
Термоциклирование	100 циклов, $T_{jmax}..T_{jmin}$	IEC 60068-2-14 Test Na
Климатика	85 °С, 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, 5 г, дважды по каждой оси (x, y, z)	IEC 68-2-6
Удары	Полусинус. импульсы, 30 г, три по каждой оси в двух направлениях	IEC 68-2-27

Таблица 2. Основные характеристики драйверов семейства SKYPER

Тип	SKYPER 32/32PRO	SKYPER 42	SKYPER 52
Внешний вид			
Количество каналов	2	2	2
Гальваническая изоляция	+	+	+
Напряжение изоляции, кВ	4	4	4
Средний выходной ток, mA	50	150	300
Пиковый выходной ток, A	15	30	50
Суммарный заряд затвора, мКл	6,3	50	100
Рабочая частота (max), кГц	50	100	100
Напряжение управления, В	15	15	Дифференциальное 3,3/5
Напряжение питания, В	15	15	24
Подавление шумовых импульсов	+	+	+
Защита UVLO	+	+	+
Формирование t_{dv}	+	+	+
Формирование сигнала ошибки	+	+	+
Стробирование (Half Logic Signal)	-	+	+
Динамическая защита DSCP	+	+	+
Режим STO (SSD)	+	-	+
Функция IntelliOFF	-	-	+
Платы адаптеров	+	+	+