

# Обзор IGBT-драйверов AgileSwitch

Современные драйверы силовых ключей должны отличаться повышенной эффективностью, широким функционалом и высокой надежностью. К сожалению, процесс разработки таких устройств требует большого опыта и значительных финансовых и временных затрат. Все это приводит к росту интереса к законченным модульным решениям. Данная статья посвящена обзору готовых драйверов IGBT-модулей от компании AgileSwitch. Драйверы серий EDEM2, PPEM и HPFM-HPM имеют рейтинг напряжения 600–3300 В и предназначены для создания широкого спектра силовых устройств.

**Вячеслав Гавриков**

[gavrikov-vyacheslav@mail.ru](mailto:gavrikov-vyacheslav@mail.ru)

**Олег Антонов**

[oleg.antonov@microem.ru](mailto:oleg.antonov@microem.ru)

Силовые устройства должны постоянно развиваться, чтобы отвечать все более жестким требованиям, предъявляемым к уровню энергоэффективности. Это вынуждает производителей силовых ключей и модулей совершенствовать характеристики своей продукции — увеличивать токовую нагрузку, уменьшать уровень потерь, повышать безопасность и расширять функционал, что в свою очередь приводит к необходимости создания все более сложных драйверов мощных транзисторов.

Для разработки драйверов для IGBT-модулей нужен солидный опыт, который, к сожалению, все равно не является гарантией успеха. Очень часто более-менее пригодное решение удается получить только после создания нескольких неудачных образцов. Все это приводит к потерям времени и средств. По этой причине среди разработчиков силовой электроники постоянно повышается спрос на готовые решения. И такие решения на рынке есть, например, драйверы от компании AgileSwitch.

Драйверы AgileSwitch могут работать совместно с IGBT-модулями с рейтингом напряжения 600–3300 В в широком спектре приложений: источники бесперебойного питания, сварочное оборудование,

индукционные печи, питание электродвигателей, инверторы для солнечных электростанций и ветрогенераторов, железнодорожный транспорт, электромобили и автомобили с гибридной силовой установкой.

В статье проводится обзор драйверов серий EDEM2, PPEM и HPFM-HPM. Рассматриваются их основные характеристики и особенности.

## IGBT-драйверы компании AgileSwitch

В настоящий момент компания AgileSwitch выпускает три серии драйверов: EDEM2, PPEM и HPFM-HPM, которые могут устанавливаться непосредственно на силовые IGBT-модули (рис. 1). Между собой эти серии отличаются рабочими напряжениями, выходной мощностью, форм-фактором, числом каналов, рабочей температурой и некоторыми функциональными особенностями (табл. 1).

EDEM2 — двухканальные драйверы, предназначенные для управления силовыми IGBT-модулями с корпусным исполнением EconoDual, рейтингом напряжения 600, 1200, 1700 В и выходным током до 600 А. Максимальная мощность каждого выходного канала EDEM2 составляет 2 Вт.

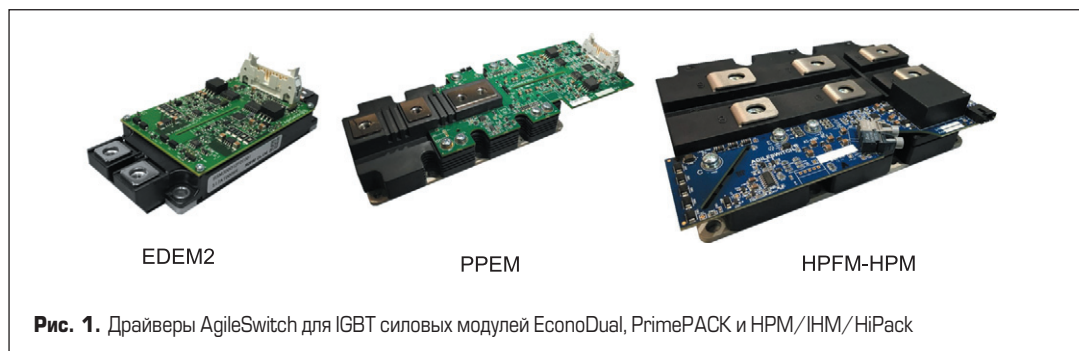


Рис. 1. Драйверы AgileSwitch для IGBT силовых модулей EconoDual, PrimePACK и HPM/IHM/HiPack

Для взаимодействия с EDEM2 используется стандартная логика 3,3; 5; 15 В. Драйверы способны работать с частотой переключений до 50 кГц в широком диапазоне температур -40...+150 °С.

Представители серии EDEM2 имеют встроенный изолированный DC/DC-преобразователь, обеспечивающий гальваническую развязку и напряжение изоляции 3750 В (рис. 2). Кроме того, в состав EDEM2 входит логика управления и мониторинга, с развитой системой защиты.

PPEM — двухканальные драйверы, созданные для работы с силовыми IGBT-модулями в корпусном исполнении PrimePACK.

Структура драйверов PPEM аналогична EDEM2 (рис. 2), однако они применяются для создания более мощных устройств на базе IGBT-модулей с рейтингом напряжения 1200, 1700 В и выходным током до 1400 А. Выходная мощность каждого из каналов PPEM составляет 5 Вт. При этом максимальная частота коммутаций по сравнению с EDEM2 снижена до 15 кГц.

HPFM-HPM — одноканальные драйверы с оптическим интерфейсом, предназначенные для создания наиболее мощных приложений

Таблица 1. Характеристики модулей драйверов AgileSwitch

Параметр	Модель драйвера		
	EDEM2	PPEM	HPFM-HPM
Совместимые корпуса	EconoDual	PrimePACK	HPM/IHM/HiPack
Рейтинг напряжения, В	600, 1200, 1700	1200, 1700	1200, 1700, 3300
Рабочий ток, А	225–600	600–1400	800–3600
Число каналов	2	2	1
Мощность канала, Вт	2	5	7
Логика управления	3,3; 5; 15 В	3,3; 5; 15 В	Оптический двунаправленный канал
Рабочая частота, кГц	50	15	15
Напряжение изоляции, В	3750	3750	6000
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+105		-40...+85
Встроенный изолированный источник питания	есть	есть	есть
Монтаж на силовой модуль	да	да	да
Формирование траектории выключения	да	да	да
Функции мониторинга и защиты	есть	есть	есть
Контроль температуры с внешним термистором	есть	есть	нет
Контроль напряжения шины	есть	есть	нет
Подстройка параметров по требованию пользователя	есть	есть	есть
Производители совместимых силовых IGBT-модулей	Fuji, Infineon, Ixys, Danfoss, SemiKron, Mitsubishi/Powerex Starpower	Fuji, Infineon, Ixys, Danfoss, SemiKron	Fuji, Infineon, ABB, Dynex, Mitsubishi/Powerex

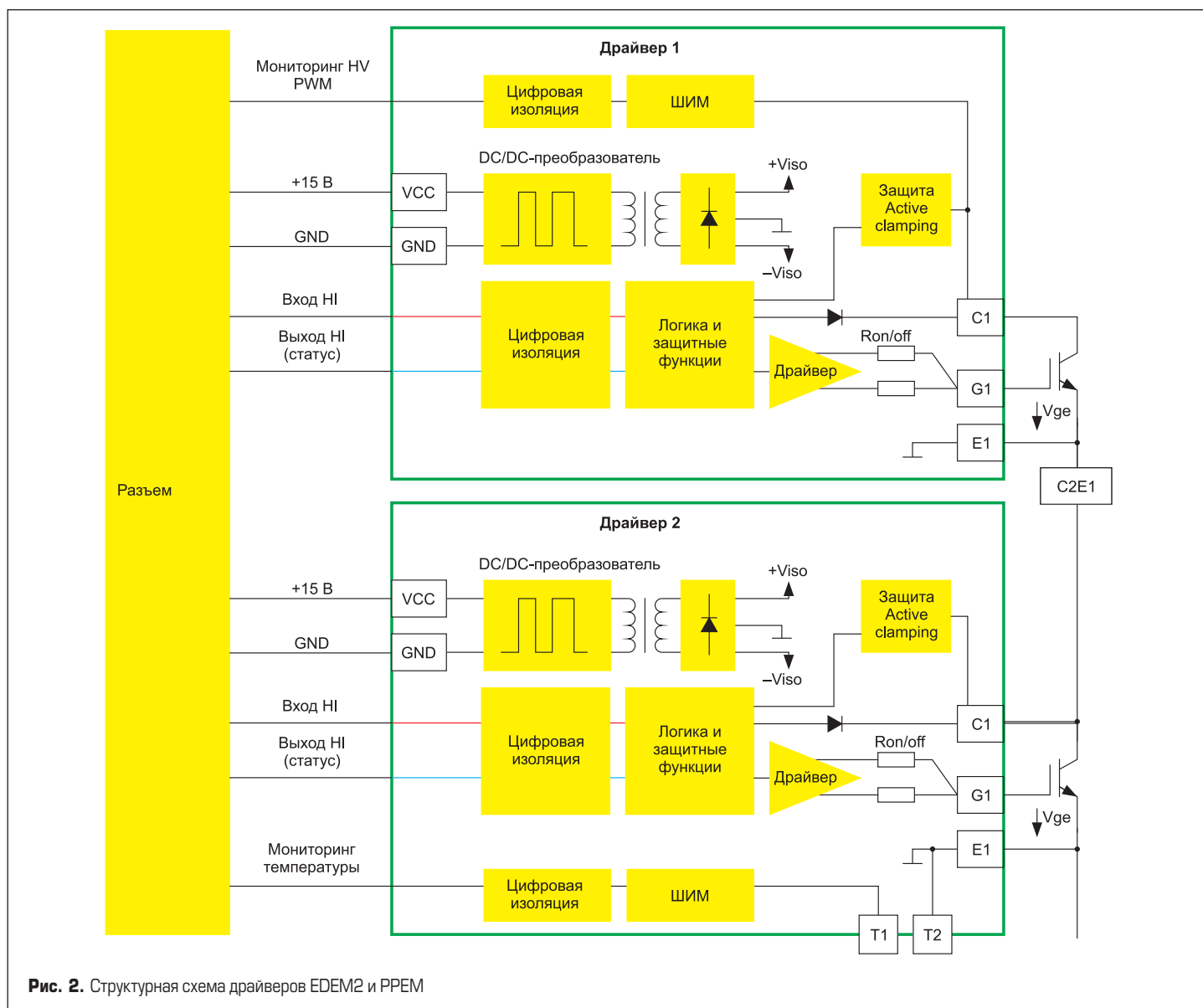


Рис. 2. Структурная схема драйверов EDEM2 и PPEM

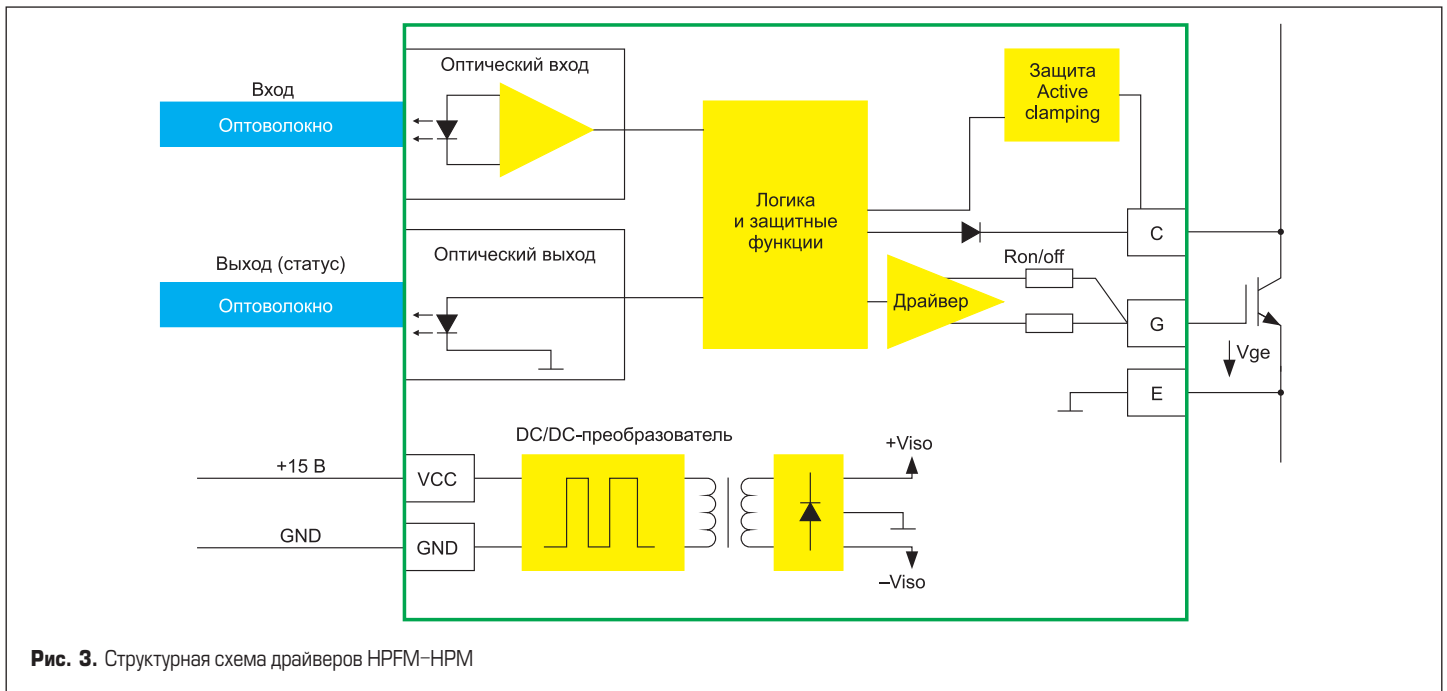


Рис. 3. Структурная схема драйверов HPFM-HPM

на базе IGBT-модулей с корпусным исполнением HPM/INM/HiPack.

Обеспечение электромагнитной совместимости — гигантская проблема для современных низковольтных систем управления. Мощное оборудование (электродвигатели, источники питания и т. д.) генерирует высоковольтные помехи, от которых не всегда легко избавиться. Положение усугубляется и тем, что в производственных цехах одновременно действует множество мощных импульсных устройств. Возникающие высоковольтные кондуктивные помехи, передаваемые по цепям питания, и электромагнитные помехи радиочастотного диапазона способны нарушать работу низковольтных систем управления. В такой ситуации одним из вариантов решения проблемы становится использование оптических каналов связи.

В драйверах серии HPFM-HPM реализован один входной оптический канал для управления силовым ключом и один выходной оптический канал для отслеживания состоя-

ния системы, в том числе для сигнализации о возникновении аварийных ситуаций (рис. 3). Для повышения уровня безопасности напряжение изоляции встроенного DC/DC-преобразователя увеличено до 6000 В. Максимальная выходная мощность HPFM-HPM составляет 7 Вт. Все это позволяет использовать драйверы HPFM-HPM для управления силовыми IGBT-модулями с рейтингом напряжения до 3300 В и током до 3600 А.

Серии EDEM2, PPEM и HPFM-HPM от AgileSwitch имеют целый ряд преимуществ:

- монтаж драйверов непосредственно на IGBT-модуль;
- возможность параллельной работы нескольких драйверов при минимальном рассогласовании времени включения/выключения;
- наличие встроенных функций управления траекторией выключения;
- контроль температуры IGBT-модуля при наличии встроенного термистора (только EDEM2 и PPEM);

- контроль напряжения высоковольтной шины (только EDEM2 и PPEM);
- встроенная система защиты с возможностью обнаружения до восьми аварийных ситуаций;
- подстройка характеристик модулей по требованию заказчика.

Рассмотрим каждую из этих особенностей отдельно.

### Монтаж и параллельная работа драйверов AgileSwitch

К достоинствам драйверов серий EDEM2, PPEM и HPFM-HPM следует отнести возможность непосредственного монтажа на IGBT-модуль. При этом каждый из драйверов разработан специально для конкретного типа корпуса: EDEM2 для IGBT-модулей EconoDual, PPEM для модулей PrimePACK, HPFM-HPM для модулей HPM/INM/HiPack.

В плате каждого из драйверов предусмотрены монтажные отверстия, предназначенные

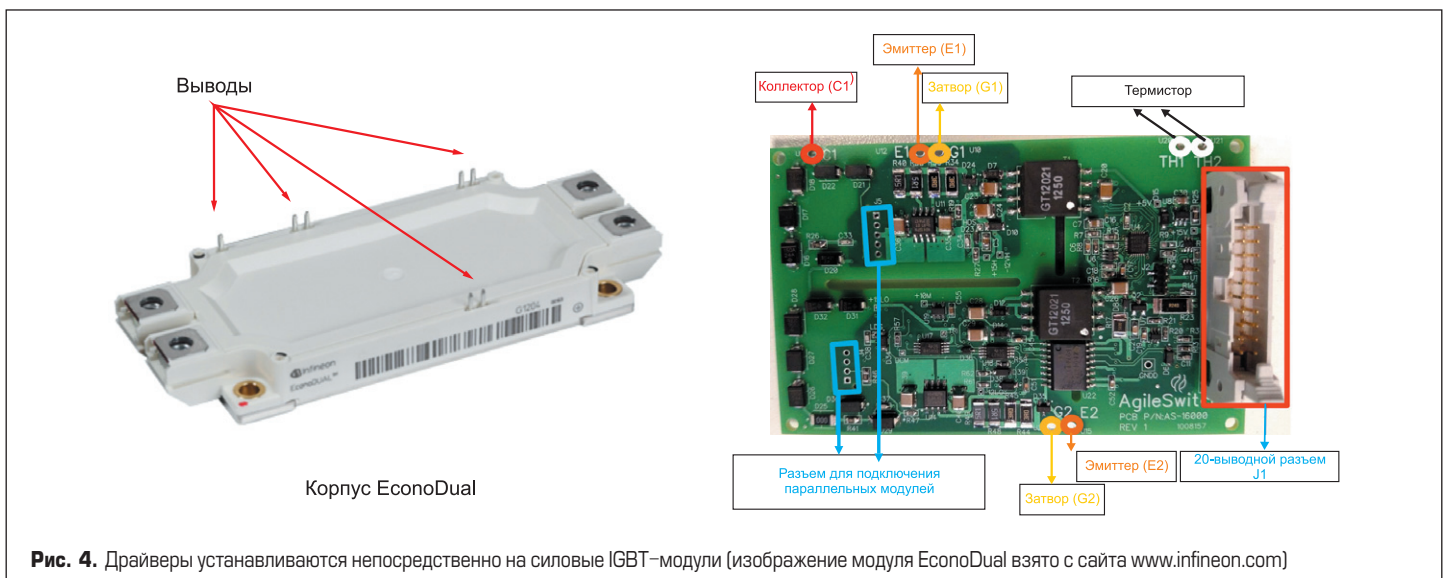


Рис. 4. Драйверы устанавливаются непосредственно на силовые IGBT-модули (изображение модуля EconoDual взято с сайта www.infineon.com)

для выводов IGBT-модулей (рис. 4). Это дает сразу несколько преимуществ: уменьшение длины цепи затвора силового ключа, упрощение монтажа всей системы в целом и снижение габаритов.

Такой подход позволяет использовать драйверы AgileSwitch с широкой номенклатурой IGBT-модулей от различных производителей: Fuji, Infineon, Ixys, Danfoss, Semikron, Mitsubishi/Powerex, Starpower и других. В качестве конкретного примера совместимости можно привести IGBT-модули с рейтингом напряжения 1,2–3,3 кВ от компании Dynex (табл. 2).

При этом компания AgileSwitch производит настройку параметров драйверов по требованию заказчика под конкретный силовой модуль. Более подробно об этом рассказывается в заключительном разделе статьи.

Одно из важных преимуществ драйверов AgileSwitch — возможность параллельного включения нескольких силовых модулей, причем рассогласование времени включения минимально и находится в диапазоне 10 нс. Для связи параллельных драйверов используются дополнительные разъемы (рис. 4).

### Функции для защиты и оптимального переключения IGBT-транзисторов

Как уже было сказано, одна из главных задач для драйвера заключается в повышении эффективности работы силовых ключей. Хорошо известно, что потери мощности транзисторов складываются из двух составляющих — статической и динамической, и чем выше частота переключений, тем значительнее вклад динамических потерь. Если статическая составляющая практически полностью определяется параметром самого ключа, то динамическая составляющая во многом зависит от качества работы драйвера.

Еще одна обязанность драйвера состоит в обеспечении безопасных переключений транзисторов. В драйверах AgileSwitch реализовано сразу несколько механизмов, призванных снизить потери на переключения и обеспечить дополнительную защиту силовых модулей.

**Таблица 2.** Совместимые IGBT-модули компании Dynex

Наименование	Рейтинг напряжения, В	Ток, А	Тип
<b>1,2 кВ IGBT</b>			
DIM1800ESM12-A	1200	1800	Одиночный IGBT
DIM1800ESS12-A			
DIM2400ESM12-A		2400	
DIM2400ESS12-A			
<b>1,7 кВ IGBT</b>			
DIM2400ESM17-A	1700	2400	Одиночный IGBT
<b>3,3 кВ IGBT</b>			
DIM800NSM33-F	3300	800	Одиночный IGBT
DIM1000NSM33-TL		1000	
DIM1000NSM33-TS		1200	
DIM1200ESM33-F			
DIM1500ESM33-TL		1500	
DIM1500ESM33-TS			

### Мягкое двухшаговое выключение (2-Level Turn-Off или Soft Turn Off)

При выключении IGBT-транзисторов возникают выбросы напряжения. Они связаны с наличием индуктивной составляющей нагрузки. В случаях, когда индуктивность нагрузки велика, или при наличии КЗ и значительной паразитной индуктивности напряжение помехи может оказаться достаточным для того, чтобы пробить силовые ключи. Применение двухшагового выключения позволяет избежать подобной ситуации.

Вместо того чтобы скачком выключать транзистор, в первый момент времени драйвер лишь уменьшает напряжение на затворе до определенного уровня. И только в конце периода транзистор выключается окончательно. Таким образом удастся значительно уменьшить выброс напряжения (рис. 5).

### Контроль напряжения насыщения (Desaturation Detection)

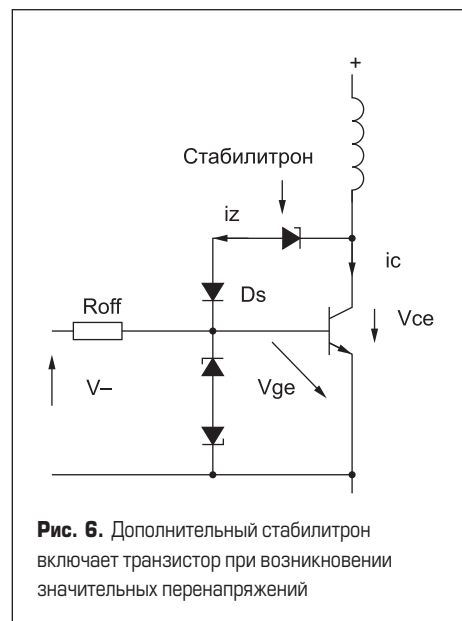
Система мониторинга постоянно измеряет напряжение коллектор-эмиттер силового IGBT-транзистора. При увеличении токовой нагрузки это напряжение увеличивается. В случае возникновения КЗ оно пре-

вышает некоторое пороговое значение, что определяется системой как авария. Далее формируется аварийный сигнал и происходит выключение транзистора.

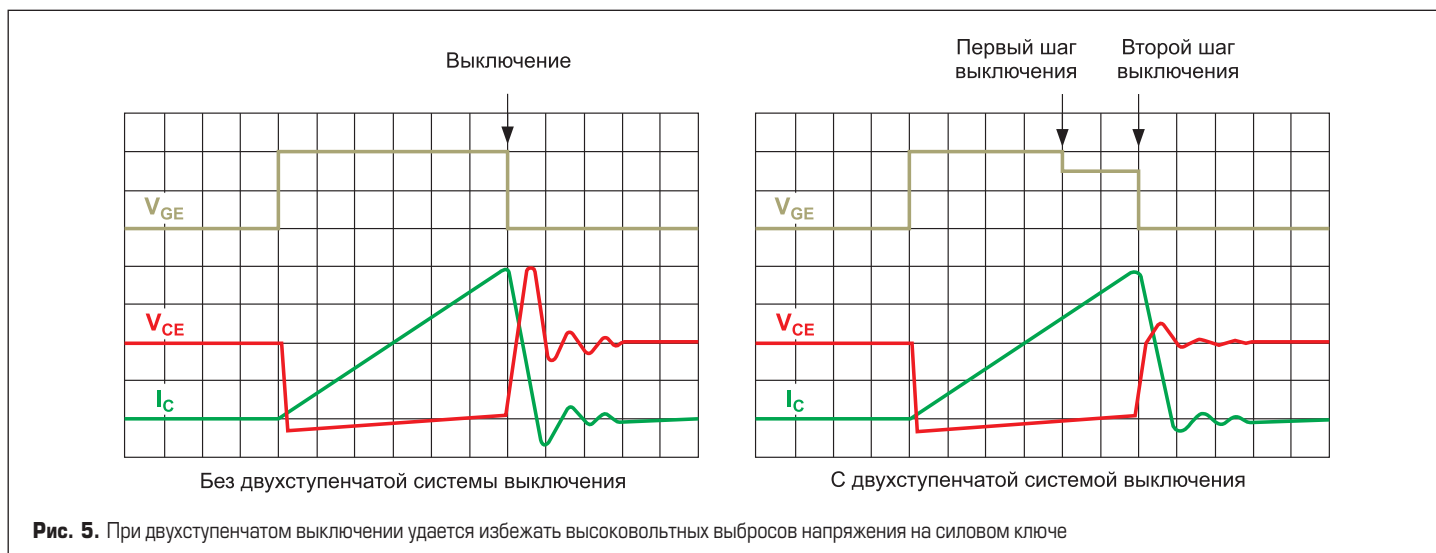
### Активное выключение силовых ключей (Active Clamping)

Как известно, при выключении IGBT-транзистора возникают выбросы напряжения. Длительность их напрямую зависит от энергии, запасенной в индуктивной нагрузке. Для борьбы с мощными импульсами большой длительности используют активное выключение, при котором транзистор остается полупроводящим до тех пор, пока не произойдет рассеивание индуктивной энергии. Для этого предусмотрена дополнительная цепочка с защитными TVS-диодами (рис. 6).

Если за время включенного состояния в нагрузку накопилась значительная энергия, она вызовет перенапряжение на ключе. При этом TVS-диоды открываются и обеспечивают напряжение затвор-эмиттер, необходимое для поддержания IGBT-транзистора в линейном режиме. Когда энергия будет рассеяна, защитные диоды



**Рис. 6.** Дополнительный стабилитрон включает транзистор при возникновении значительных перенапряжений



**Рис. 5.** При двухступенчатом выключении удастся избежать высоковольтных выбросов напряжения на силовом ключе

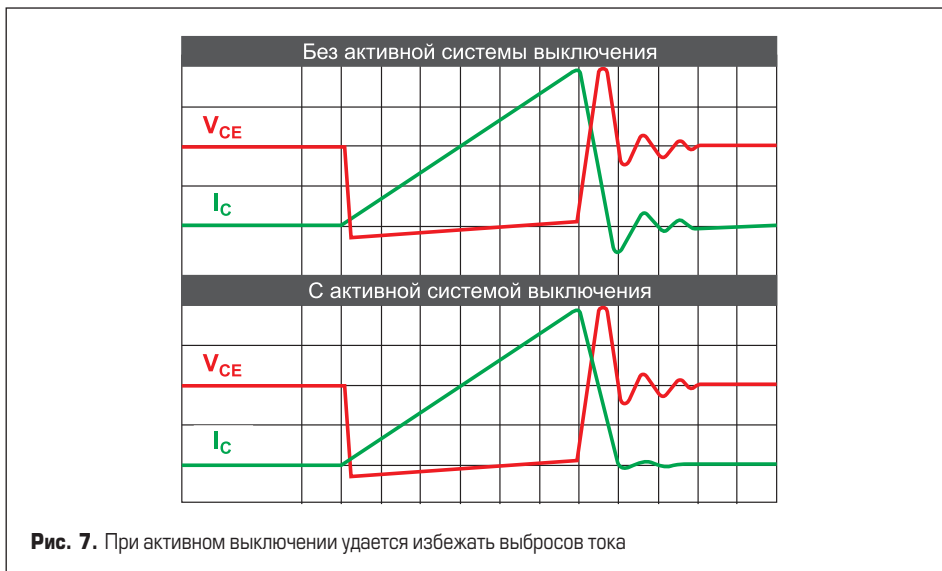


Рис. 7. При активном выключении удается избежать выбросов тока

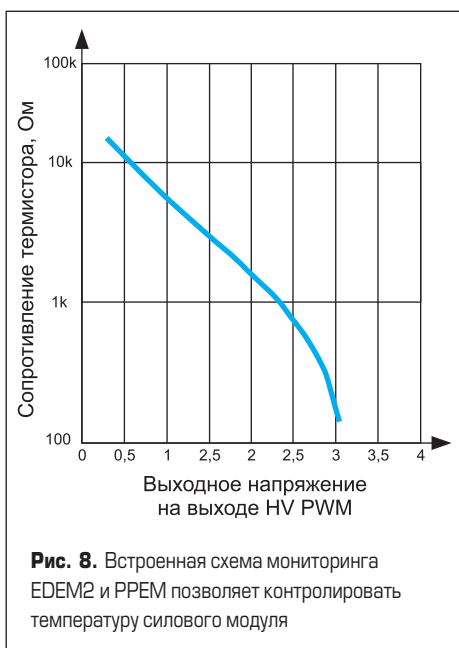


Рис. 8. Встроенная схема мониторинга EDEM2 и PPEM позволяет контролировать температуру силового модуля



Рис. 9. Встроенная схема мониторинга EDEM2 и PPEM позволяет контролировать напряжение высоковольтной силовой шины

закрываются и транзистор выключается окончательно.

Благодаря открытому транзистору удается избавиться от колебаний тока в цепи коллектора (рис. 7).

**Контроль температуры IGBT-модуля и напряжения силовой шины**

Драйверы EDEM2 и PPEM имеют возможность контролировать напряжение силовой высоковольтной шины и температуры силового IGBT-модуля. Для передачи этой информации на специальных выходах драйверов формируется ШИМ-сигнал частотой 25 кГц и амплитудой 3,3 В. Импеданс выходов составляет 1 кОм.

Для измерения коэффициента заполнения ШИМ-сигнала задействуется цифровой таймер, а в качестве альтернативного варианта — аналоговая фильтрация, предусматривающая наличие внешнего фильтра. В таком случае дальнейшая работа ведется с аналоговым сигналом. На рис. 8 приведен пример зависимости выходного напряжения от сопротивления термистора для EDEM2 при использовании аналоговой фильтрации. На рис. 9 изображена зависимость выходного контрольного напряжения EDEM2 от напряжения шины питания с применением аналоговой фильтрации.

**Система обнаружения аварийных состояний**

Драйверы AgileSwitch обеспечивают обнаружение восьми типов аварийных ситуаций (табл. 3), в том числе:

- UVLO — защита от просадки напряжения питания верхнего или нижнего плеча. Например, для драйверов EDEM2 диапазон напряжения питания составляет +14,5...+16 В. По умолчанию аварийной просадкой напряжения считается ситуация, когда напряжение падает ниже 12,8 В. Это значение может быть изменено по требованию заказчика.
- Перенапряжение на выходе.
- Обнаружение насыщения верхнего или нижнего IGBT-транзистора (Desaturation Detection).
- Обнаружение активного выключения верхнего или нижнего IGBT-транзистора (Active Clamping).
- Обнаружение сквозных токов.

В документации на драйверы EDEM2, PPEM и HPFM-NPM приводятся лишь базовые параметры по умолчанию. Многие из них могут быть изменены по требованию заказчика.

Драйверы EDEM2, PPEM и HPFM-NPM являются универсальными; чтобы оптимизировать их для работы с конкретными силовыми IGBT-модулями, следует обратиться к AgileSwitch. Компания указывает целый спектр параметров, которые могут быть изменены по требованию заказчика, начиная от сопротивлений в цепях затворов и заканчивая перепрограммированием длительности мертвого времени (табл. 4).

Таблица 3. Возможности мониторинга аварийных ситуаций модулями драйверов AgileSwitch

Аварийная ситуация	Модель драйвера		
	EDEM2	PPEM	HPFM-NPM
Просадка напряжения на плече HI	есть	есть	есть
Просадка напряжения на плече LO	есть	есть	есть
Перенапряжение	есть	нет	нет
Насыщение на плече HI	есть	есть	есть
Насыщение на плече LO	есть	есть	есть
Активное выключение HI	есть	есть	есть
Активное выключение LO	есть	есть	есть
Сквозной ток	есть	есть	—

Таблица 4. Возможности подстройки и программирования параметров модулей драйверов AgileSwitch

Подстраиваемый параметр	Модель драйвера		
	EDEM2	PPEM	HPFM-NPM
Мертвое время	есть	есть	—
Резистор R <sub>оп</sub>	есть	есть	есть
Резистор R <sub>оff</sub>	есть	есть	есть
Время срабатывания при насыщении (T <sub>sat</sub> )	есть	есть	есть
Напряжение насыщения	есть	есть	есть
Изменение назначения выводов (не всех)	есть	есть	—
Время двухуровневого выключения	есть	есть	есть
Напряжение плавного выключения	есть	есть	есть
Время плавного выключения	есть	есть	есть
Поведение при аварийных ситуациях	есть	есть	есть

**Заключение**

Компания AgileSwitch выпускает три серии драйверов IGBT-модулей:

- EDEM2 — двухканальные драйверы для IGBT-модулей с корпусным исполнением EconoDual, рейтингом напряжения 600, 1200, 1700 В и током до 600 А.
- PPEM — двухканальные драйверы для IGBT-модулей с корпусным исполнением PrimePACK, рейтингом напряжения 1200, 1700 В и током до 1400 А.

- HPFM-HPM — одноканальные драйверы с оптическим интерфейсом для наиболее мощных IGBT-модулей с корпусным исполнением HPM/HPM/HiPack, рейтингом напряжения до 3300 В и током до 3600 А.

Драйверы AgileSwitch имеют целый ряд преимуществ: монтаж выполняется непосредственно на IGBT-модуль, предусмотрена возможность параллельной работы нескольких драйверов при минимальном рассогласовании времени включения/выключения, наличие встроенных функций управления траектори-

ей выключения, контроль температуры IGBT-модуля при наличии встроенного термистора (только EDEM2 и PPEM), контроль напряжения высоковольтной шины (только EDEM2 и PPEM), встроенная система защиты с возможностью обнаружения до восьми аварийных ситуаций, подстройка характеристик модулей по требованию заказчика.

**Литература**

1. [www.AgileSwitch.com](http://www.AgileSwitch.com)