

ТЕМАТИЧЕСКОЕ  
ПРИЛОЖЕНИЕ  
К ЖУРНАЛУ  
КОМПОНЕНТЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ

12+

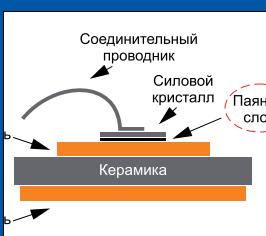
№ 6'2023  
ДЕКАБРЬ

# СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

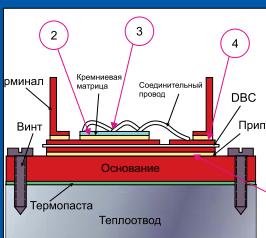
ISSN 2079-9322

## Все компоненты для силовой электроники

- IGBT-модули
- SiC-модули
- Дискретные IGBT, MOSFET, SiC, GaN
- Конденсаторы электролитические, плёночные, силовые и снабберные
- Драйверы для управления IGBT-модулями
- Тиристорные и диодные модули
- Датчики тока на эффекте Холла
- Промышленные разъёмы, кабельные вводы



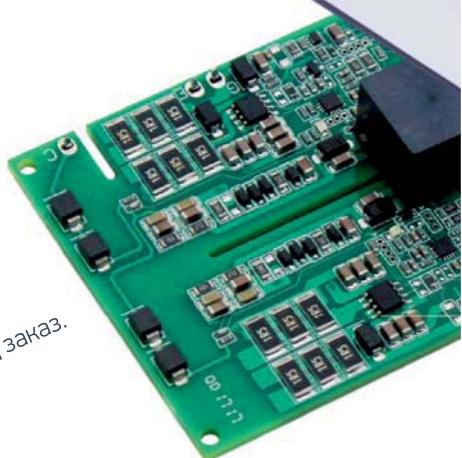
Повышение надежности  
SiC-модулей



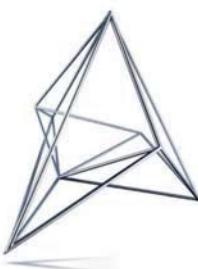
Развитие технологий  
модулей IGBT



▼ Поставки со склада и под заказ.



Symmetron

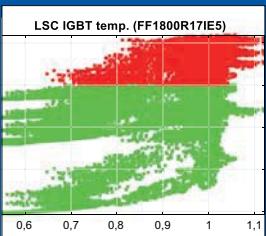


МОСКОВА  
Ленинградское шоссе, д. 69, к. 1  
Тел.: +7 495 961-20-20  
moscow@symmetron.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
ул. Таллинская, д. 7  
Тел.: +7 812 449-40-00  
spb@symmetron.ru

НОВОСИБИРСК  
ул. Блюхера, д. 71б  
Тел.: +7 383 361-34-24  
sibir@symmetron.ru

[www.symmetron.ru](http://www.symmetron.ru)



Новые решения  
для ветроэнергетики

# IGBT МОДУЛИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА



- ▷ Промышленное исполнение
- ▷ Техническая поддержка на всех этапах разработки устройств
- ▷ Консультации в подборе IGBT модуля в соответствии с режимами эксплуатации
- ▷ Возможность разработки силовых блоков в соответствии с требованиями потребителя
- ▷ Поставка с драйвером\*

\*по запросу

Напряжение: 1200/1700 В

Номинальный ток: 75-600 А



форма для заказа



**ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС**

+7 (4862) 44-04-79  
[www.proton-electrotex.com](http://www.proton-electrotex.com)

реклама



РОССИЙСКИЙ МАРКЕТПЛЕЙС ЭК

**ПОКУПАЙТЕ И ПРОДАВАЙТЕ  
ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ  
НА PTfind.RU**

Поставщик

pt **FIND**

Покупатель

Информация о  
свободных складских  
остатках

• Актуальная база  
электронных компонентов по  
складам РФ  
• Полный логистический цикл

• Быстрый поиск  
• Покупка дефицитных  
компонентов со склада  
в РФ  
• Срок доставки 3-7 дней

**ВЫГОДНО ПОСТАВЩИКУ! ВЫГОДНО ПОКУПАТЕЛЮ!**

[www.ptfind.ru](http://www.ptfind.ru)  
[info@ptfind.ru](mailto:info@ptfind.ru)



ссылка на  
презентацию  
проекта

**Главный редактор**

Павел Правосудов pavel@fsmedia.ru

**Зам. главного редактора**

Анна Соснина a.sosnina@mtu-net.ru

**Выпускающий редактор**

Наталья Новикова natalia.novikova@fsmedia.ru

**Технический консультант**

Андрей Колпаков

**Дизайн и верстка**

Дмитрий Никаноров dmitry.nikanorov@fsmedia.ru

**Отдел рекламы**

Ольга Зайцева olga\_z@fsmedia.ru

**Отдел подписки**

podpiska@fsmedia.ru

**Москва**

115088, Москва,  
ул. Южнопортовая, д. 7, стр. Д, этаж 2  
Тел. / Факс: +7 (495) 414-2132

**Санкт-Петербург**

197101, Санкт-Петербург,  
Петроградская наб., 34, лит. Б  
Тел. +7 (812) 467-4585  
E-mail: compitech@fsmedia.ru  
www.power-e.ru

**Республика Беларусь**

«ПремьерЭлектрик»  
Минск, ул. Маяковского, 115, 7-й этаж  
Тел./факс: (10-37517) 297-3350, 297-3362

**Подписной индекс**

Агентство «Урал-Пресс» 88471  
«Почта России» П4213

Дата выхода в свет 07.02.24  
Тираж 4000 экз.  
Свободная цена

Управлением Федеральной службы по надзору  
в сфере связи, информационных технологий и  
массовых коммуникаций по Северо-Западному  
федеральному округу

Регистрационный номер и дата принятия решения  
о регистрации: серия ПИ № ТУ78-02250 от 28 апреля  
2022 г.

Учредитель: ООО «Медиа КиТ»

Адрес редакции:  
197046, Санкт-Петербург, Петроградская наб., д. 34,  
литер Б, помещение 1-Н, офис 321в  
Издатель: ООО «Медиа КиТ»  
197101, СПб, Петроградская наб., д. 34, лит. Б,  
помещение 1-Н офис 321в

Отпечатано в типографии «Хелен и Ко»  
107140, г. Москва, ул Русаковская, д. 13 стр. 5

Редакция не несет ответственности за информацию,  
приведенную в рекламных материалах.  
Полное или частичное воспроизведение  
материалов допускается с разрешения  
ООО «Медиа КиТ».

Журнал включен в Российский индекс научного  
цитирования (РИНЦ).  
На сайте Научной электронной библиотеки  
eLIBRARY.RU ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) доступны полные  
тексты статей. Статьи из номеров журнала  
текущего года предоставляются на платной основе.

# В номере:

## Силовая элементная база

**Д-р Бехташ Реза**

**Перевод: Иван Сергеев**

Оценка виртуальной температуры полупроводникового диода  
с использованием кривых динамического теплового импеданса ..... 4

**Евангелос Теодоссиу, Абель Текес**

**Перевод: Иван Сергеев**

Повышение надежности SiC-модулей ..... 7

**Андрей Колпаков**

Современная силовая электроника: разворот на Восток  
и «доступная функциональность». Часть 6. SilverMicro ..... 10

**Роберт Шульга**

Развитие технологий модулей IGBT. Часть 1.

Конструктивно-технологические особенности  
паяных модулей традиционной конструкции ..... 13

**Александро Позо**

**Перевод: Евгений Карташев**

Использование GaN FET с контроллерами и драйверами,  
разработанными для Si MOSFET ..... 20

**Прадип Кулкарни**

**Перевод: Иван Сергеев**

Интеллектуальные цифровые драйверы сокращают время  
проектирования и раскрывают потенциал карбида кремния ..... 23

**Олег Болотин, Николай Гребенщиков, Григорий Портной,**

**Константин Разумовский, Олег Яценко**

Новые серийные датчики тока и напряжения  
от российского производителя ..... 26

## Источники питания

**Норик Петросян, Карлен Бегоян, Мовсес Мовсисян**

Высокочастотная динамика преобразователей постоянного тока, работающих в режиме прерывистой проводимости ..... 29

Повышающий импульсный преобразователь напряжения с током нагрузки до 1 А. ..... 32

## Химические источники тока

**Франко Контадини, Алессандро Леонарди**  
**Перевод: Евгений Карташев**

Руководство по быстрой зарядке аккумуляторных батарей.  
Часть 1 ..... 34

**Денис Павлов, Алексей Осетров, Владимир Чащин**

Оценка качества свинцово-кислотного аккумулятора по изменению его внутреннего сопротивления ..... 38

## Транспорт

**Дмитрий Аверичев, Юлия Березина**

Электродвигатели в автомобилестроении ..... 43

## Энергетика

**Марсель Морисс, Майкл Боссхардт**  
**Перевод: Евгений Карташев**

Новые решения для ветроэнергетики ..... 50

## Рубрикатор

Перечень статей, опубликованный  
в журнале «Силовая электроника» в 2023 году ..... 54

# Оценка виртуальной температуры полупроводникового диода с использованием кривых динамического теплового импеданса

**В таких устройствах, как импульсные источники питания, полупроводниковые приборы работают в режиме коммутации в отличие от линейных регуляторов, где они действуют в режиме непрерывной проводимости. При этом силовые ключи могут и не достигать стабильной рабочей точки, что делает величину теплового сопротивления  $R_{th}$  непригодной для теплового моделирования. В статье представлен альтернативный подход, заключающийся в использовании кривых динамического теплового импеданса для моделирования поведения полупроводниковых приборов. Примером применения данного метода является моделирование практической схемы с помощью PSPICE.**

**Д-р Бехташ Реза  
(Behtash Reza)<sup>1</sup>**

**Перевод: Иван Сергеев**

## Динамический тепловой импеданс

Динамический тепловой импеданс ( $Z_{th}$ ) описывает времязависимый процесс теплопередачи, учитывающий влияние тепловых сопротивлений и емкостей в течение переходных процессов. Используя аналогичные электрические понятия, эти емкости должны «зарядиться» перед рассеиванием тепла, что проиллюстрировано в эквивалентной схеме на рис. 1а для диода в SMD-корпусе. Динамическое тепловое сопротивление служит мерой переходного теплового потока между двумя точками А и В, обусловленного разницей температур. Величина  $Z_{th}$  также зависит от длительности приложенного импульса мощности:

$$Z_{th(A-B)}(t_{pulse}) = \frac{dT}{dP} \Big|_t = t_{pulse}.$$

Значения  $Z_{th}$ , обычно отображаемые в виде кривых в спецификациях полупроводниковых приборов, позволяют рассчитать нагрев чипа диода в тепловой системе, работающей в импульсном режиме. При таких расчетах также следует учитывать длительность импульса мощности и параметры рабочего цикла.

## Модели Фостера и Кауэра

Динамическое тепловое поведение полупроводниковых приборов может быть проанализировано с помощью эквивалентных схем, содержащих последовательность RC-цепочек и известных как модели Фостера и Кауэра. Такие RC-модели, полученные на основе кривых изменения температуры, описывают динамический тепловой импеданс, например для диода Шоттки PMEG050T150EIPD (рис. 1б). Они

определяют тепловую реакцию прибора на воздействие импульсов мощности путем измерения потерь в течение различных промежутков времени.

Здесь уровень  $Z_{th}$  в установившемся состоянии соответствует  $R_{th}$ . Графики демонстрируют тепловую инерцию — изменение температуры происходит не сразу, что позволяет использовать короткие импульсы высокой мощности. На рис. 1б представлены кривые  $Z_{th}$  для повторяющихся импульсов с различным коэффициентом заполнения, указывающие на дополнительное повышение температуры из-за разброса среднеквадратичного значения мощности.

## Как рассчитать изменение температуры кристалла

При определении изменения температуры чипа в полупроводниковом приборе с одной активной областью (источник тепла кристалла) решающее значение имеет рассеиваемая мощность  $P_D$  и длительность импульса  $t_p$ . Для прямоугольных импульсов мощности динамический тепловой импеданс можно непосредственно считывать из графиков  $Z_{th}$ . Повышение температуры кристалла определяется как произведение этого значения на мощность. В качестве альтернативы в установившемся режиме достаточно знания установившегося теплового сопротивления  $R_{th}$ , при этом повышение температуры является произведением  $P_D$  и  $R_{th}$ .

В переходных режимах (синусоидальных или импульсных) расчет температуры кристаллов является достаточно сложной задачей. Математически точный метод предполагает использование интеграла свертки. При этом производится интегрирование функции импульса мощности и кривой  $Z_{th}$  по времени, что позволяет

<sup>1</sup>Nexperia, Германия

получить температурный профиль после воздействия импульса длительностью  $t$ :

$$\Delta T_j = \int_0^t P(t) \frac{dZ_{th}(t-t)}{dt} dt.$$

Однако данное решение не является тривиальным, поскольку оно не определено математически. Другой вариант — аппроксимация сигналов в виде серии прямоугольных импульсов путем их суперпозиции. У этого метода есть свои недостатки: сложные формы сигналов требуют наложения различных последовательностей для точного моделирования. В качестве альтернативы рассматривается эквивалентная тепловая схема с  $RC$ -цепями, позволяющая рассчитать температуру кристаллов с помощью симулятора PSPICE.

### Соответствие тепловых и электрических параметров

Таблица демонстрирует, что значения тепловых сопротивлений и емкостей полупроводникового прибора могут быть представлены в виде эквивалентных электрических сопротивлений и емкостей соответственно. Кроме того, отображение тока в виде мощности, а напряжения — в виде разности температур позволяет рассматривать любую тепловую схему как электрическую.

Модель Фостера разрабатывается эмпирически, путем подгонки кривой к характеристике  $Z_{th}$ , что дает одномерную  $RC$ -цепь. Тем не менее значения  $R$  и  $C$  не коррелируют с физической структурой прибора, что препятствует вычислениям на основе материальных констант. Недостатком  $RC$ -схемы Фостера является невозможность ее разделения или объединения с моделями других элементов, например радиаторов.

Модель Фостера упрощает отображение динамического теплового импеданса  $Z_{th}$ . Так, измеряя процесс нагрева (или охлаждения) прибора и генерируя профиль  $Z_{th}$ , можно использовать следующее уравнение для создания «подогнанной» кривой, такой как на рис. 2б:

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n R_i x \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right),$$

где  $\tau_i = R_i \times C_i$ .

Тепловые сопротивления ( $R_i$ ) и емкости ( $C_i$ ) составляют основу тепловой схемы. Оптимизируя параметры в аналитическом выражении, можно добиться того, что реакция переходной системы будет соответствовать временному отклику, для этого используется алгоритм наименьших квадратов для «подгонки» кривой. Модели Фостера не имеют особого практического значения, поскольку теплоемкости от узла к узлу схемы не являются реальными. Однако модель Фостера можно преобразовать в эквивалентную схему Кауэра посредством математического сдвига.

$N$ -ступенчатая модель Кауэра — это производная от  $n$ -ступенчатой модели Фостера для эквивалентного отображения тепловых

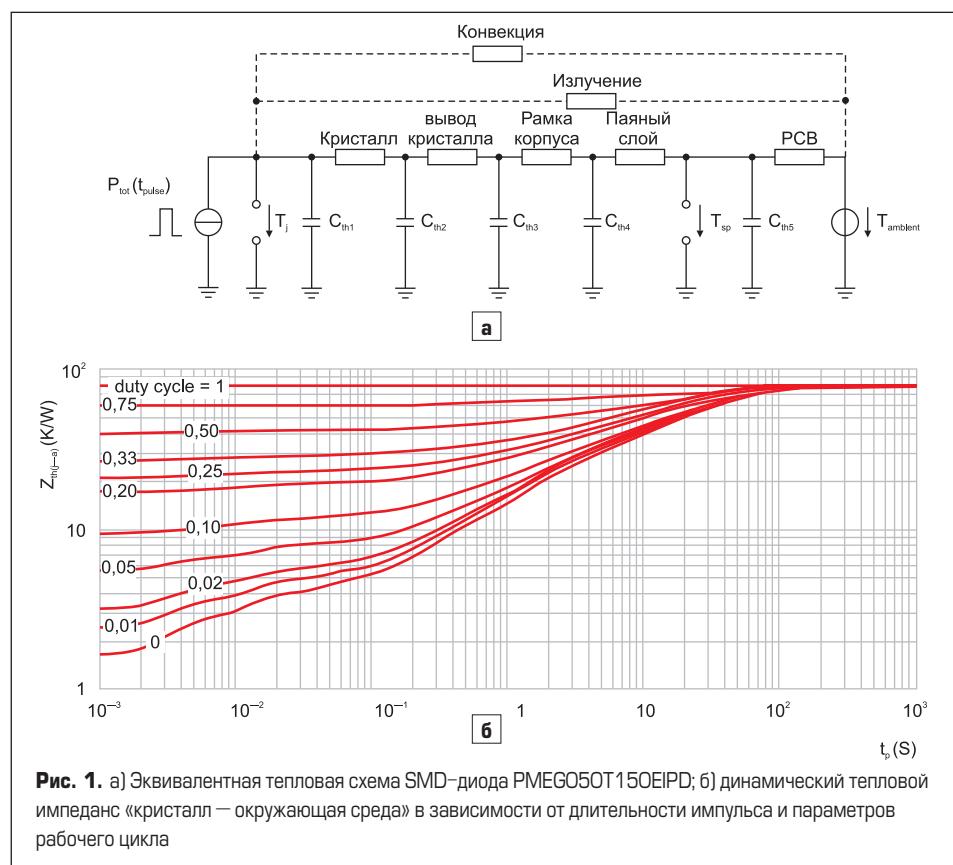


Рис. 1. а) Эквивалентная тепловая схема SMD-диода PMEGO50T150EIPD; б) динамический тепловой импеданс «кристалл — окружающая среда» в зависимости от длительности импульса и параметров рабочего цикла

Таблица. Электрические и тепловые аналоги параметров полупроводниковых приборов

Тип схемы	Сопротивление	Потенциал	Энергия	Емкость
Электрическая ( $R = V/I$ )	$R$ = омическое сопротивление, Ом	$V$ = электрический потенциал, В	$I$ = ток, А	$C$ = емкость, Ф
Тепловая ( $R_{th} = K/Bt$ )	$R_{th}$ = тепловое сопротивление, К/Вт	$K$ = градиент температуры, К	$W$ = рассеиваемая мощность, Вт	$C_{th}$ = теплоемкость, тепловая масса

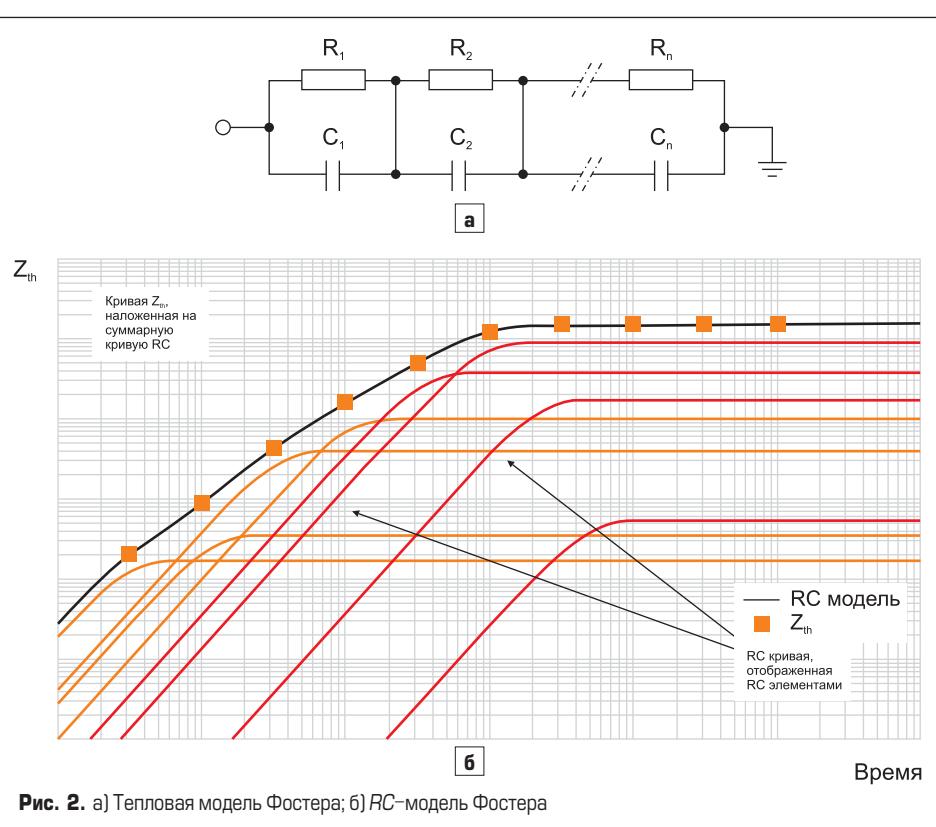
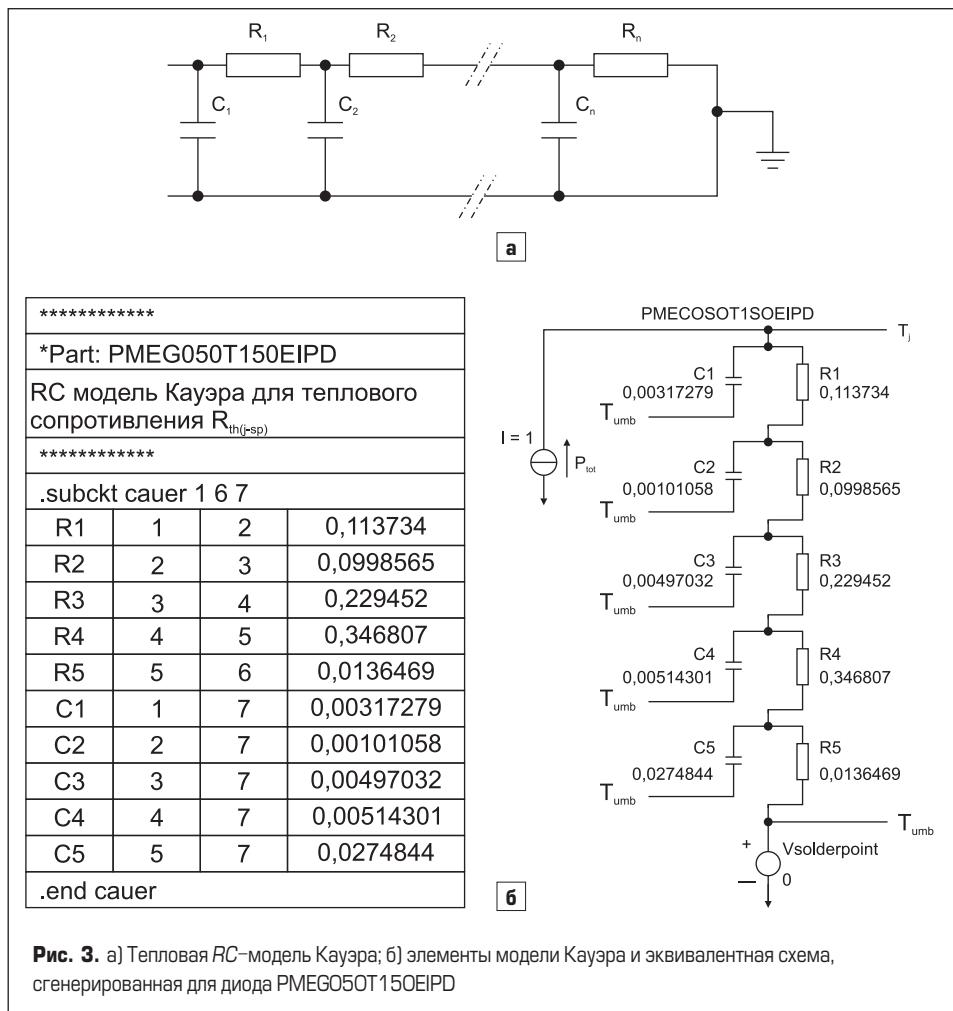


Рис. 2. а) Термовая модель Фостера; б)  $RC$ -модель Фостера



**Рис. 3.** а) Термовая  $RC$ -модель Кауэра; б) элементы модели Кауэра и эквивалентная схема, генерированная для диода PMEG050T150EIPD

характеристик. Схема Кауэра (рис. 3а) также состоит из  $RC$ -цепей, но все тепловые емкости в них связаны с «тепловым заземлением» (температурой окружающей среды). В отличие от Фостера, узлы в схеме Кауэра имеют физический смысл, что позволяет вычислять температуру внутренних полупроводниковых слоев.

Модели Фостера и Кауэра дают эквивалентное представление о тепловом поведении по-

лупроводникового прибора, причем схема Кауэра в большей степени отражает его физическую структуру, поэтому она рассматривается в следующих разделах. Такая модель может быть использована для создания схемы SPICE, как показано на рис. 3б.

Вывод 1 в показанной схеме представляет собой температуру чипа  $T_j$ , а точки 6 и 7 соответствуют температуре окружающей

среды  $T_{amb}$ . Только эти выводы (6 и 7) прибора подключены к источнику напряжения  $T_{amb}$  для формирования данной тепловой схемы. Дополнительным преимуществом модели Кауэра является то, что она позволяет подключить внешнюю тепловую схему, чтобы проанализировать, например, влияние нагрева печатных плат и радиаторов. Для этого вывод 7 соединяется с точкой  $T_a$  (окружающая среда), а вывод 6 — с первым выводом внешней модели Кауэра. Для получения корректных результатов выход внешней схемы Кауэра должен быть подключен к источнику  $T_a$ .

### Настройка параметров теплового моделирования SPICE

Для подготовки и моделирования тепловой схемы в среде SPICE были выполнены следующие действия:

1. Создание  $RC$  тепловой модели PMEG050T150EIPD в среде SPICE.
2. Задание параметра источника напряжения  $V_{solderpoint} = 0$ , что соответствует значению  $T_{sp}$ .
3. Задание параметра источника тока  $P_{tot} = 1$ .
4. Создание профиля моделирования, установка времени выполнения: 100 мс.
5. Запуск моделирования.
6. Вывод на экран графика напряжения в узле  $T_j$ . Кривая моделирования на рис. 4 показывает температуру кристалла (напряжение  $T_j$ ), она также представляет тепловой импеданс транзистора PMEG050T150EIPD.

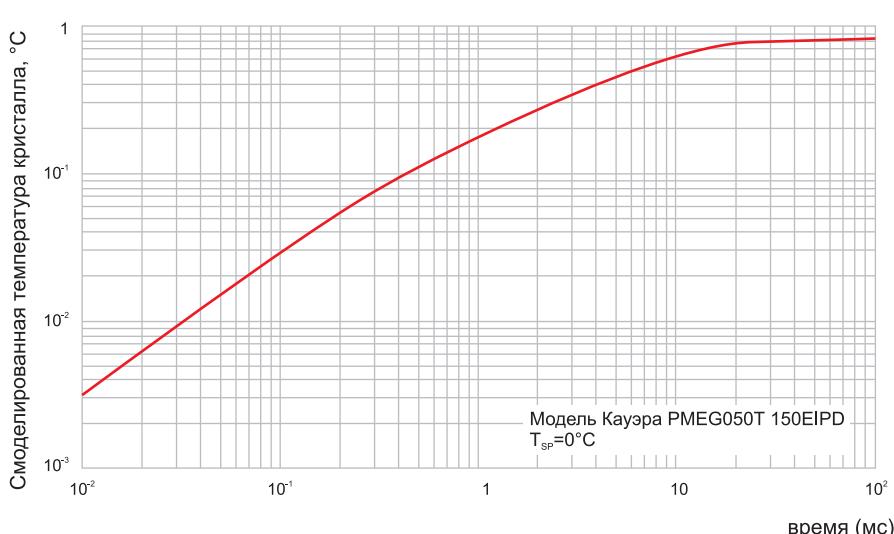
На экранном графике значения  $Z_{th}$  для разных длительностей импульса могут быть считаны с помощью курсора на рабочем дисплее SPICE. Параметр источника тока в этом примере установлен равным 1 А, что соответствует 1 Вт мощности, рассеиваемой диодом. Эти установки легко адаптировать для любого профиля нагрузки. Время моделирования может быть изменено для представления широкого диапазона импульсов мощности. Моделирование в среде SPICE также позволяет исследовать температуру кристаллов, входящих в состав прибора.

### Заключение

Динамический тепловой импеданс  $Z_{th}$  представляет собой интегральный показатель, описывающий временной процесс теплопередачи, включающий тепловые сопротивления и емкости, определяющие характеристики переходных тепловых процессов. Обычные стационарные модели не позволяют точно охарактеризовать тепловое поведение устройства в импульсных режимах.

Использование кривых  $Z_{th}$  дает гораздо более точное представление о динамических тепловых процессах. В статье раскрыты теоретические основы этого подхода и обоснована его эффективность на примере моделирования теплового поведения диода. Таким образом, графики  $Z_{th}$  являются ключевым инструментом, позволяющим понимать и прогнозировать режимы работы электронных устройств.

По материалам сайта [www.nexpria.com](http://www.nexpria.com)



**Рис. 4.** Смоделированная кривая зависимости температуры кристалла PMEG050T150EIPD от времени при мощности рассеяния 1 Вт. Температура паяного слоя установлена равной 0:  $V_{solderpoint} = 0$

# Повышение надежности SiC-модулей

**Использование уникальных свойств широкозонных приборов, таких как карбид кремния (SiC), в коммерческих приложениях требует решения проблем надежности, связанных с механическими свойствами этого материала. Компании Vincotech удалось заметно улучшить характеристики силовых SiC-приборов благодаря своей передовой технологии монтажа чипов.**

**Евангелос Теодоссиу  
(Evangelos Theodossiu)<sup>1</sup>**

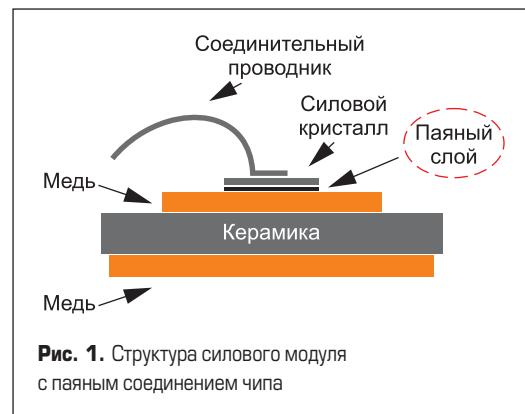
**Абел Текес  
(Ábel Tókés)<sup>1</sup>**

**Перевод: Иван Сергеев**

**K**арбидокремниевые модули, впервые представленные на рынке более десяти лет назад, преображают рынок силовой электроники. Замена кремния (Si), исторически используемого в стандартных полупроводниковых модулях, на широкозонный материал SiC имеет огромный потенциал по расширению сфер применения силовых модулей с точки зрения повышения мощности и расширения температурного диапазона.

Для того чтобы SiC-ключи оправдали свои высокие ожидания и заняли 25% рынка силовых модулей к 2026 году, разработчикам придется преодолеть ряд проблем — прежде всего оптимизировать конструкцию модулей, чтобы полностью раскрыть потенциал карбида кремния, обеспечивая при этом надежность, необходимую для длительной безотказной работы в реальных условиях.

Карбид кремния обладает значительными преимуществами перед кремнием — у него в 10 раз выше блокирующая способность и в 19 раз меньше ток утечки, однако SiC-структуры испытывают более высокий уровень термомеханического стресса в паяном соединении «chip-подложка» (рис. 1). В приложениях с большими циклическими нагрузками это приводит к постепенному разрушению паяных слоев и сокращает срок службы карбидокремниевых приборов примерно на 70% по сравнению с кремниевыми.



В статье представлен новый подход к проектированию, используемый специалистами Vincotech. Он позволяет улучшить стойкость SiC-приборов к термоциклированию, а также, хотя и в меньшей степени, повысить надежность оксидного слоя затвора, устойчивость к короткому замыканию и замедлить деградацию тельных диодов. Повышение показателей надежности делает силовые модули SiC жизнеспособной и высоко-производительной альтернативой кремнию для широкого спектра применений. В статье сравниваются характеристики усовершенствованных SiC-приборов со стандартными силовыми ключами и оцениваются перспективы их применения в зарядных станциях электромобилей.

## Выявление узких мест

Ожидается, что SiC-ключи сыграют важную роль в повышении общей эффективности систем питания электромобилей (EVSE) с 95 до 98%, при одновременном увеличении плотности мощности и сокращении времени зарядки. Однако для этого необходимо достичь надежность SiC-структур в плане стойкости к термоциклированию до уровня, обеспечиваемого традиционными решениями на основе Si.

В то время как по электрическим характеристикам SiC-структуры превосходят кремниевые, механические свойства карбида кремния отрицательно влияют на его стойкость к термоциклированию. В частности, «модуль Юнга» у SiC в три раза выше, чем у Si, что приводит к образованию и росту трещин в паяном соединении.

Более того, сложные условия эксплуатации с длительными периодами максимальной мощности (например — зарядные станции EV) и повышенные рабочие температуры, создаваемые большими токами, протекающими через чипы меньшего размера, — все это становится дополнительным стрессом для паяных слоев. Приведенные факторы указывают на необходимость повышения надежности интерфейсного слоя чипов и обеспечения достаточной стойкости SiC-приборов к воздействию циклических нагрузок.

## Тестирование нового материала припоя для SiC-модулей

Научно-исследовательский отдел Vincotech внедряет новый припойный сплав, повышающий надежность силовых SiC-модулей и делающий эту технологию пригодной для применения в сложных условиях нагрузки. Были выполнены испытания стойкости карбидокремниевых приборов к термоциклированию для разных технологий, используемых для монтажа SiC-чипов на изолирующую подложку. Тестирование проводилось на трехфазном модуле VIN flowPACK E1 SiC (рис. 2), а также на аналогичном приборе, выпускаемом другим производителем.

Для имитации процесса деградации припоя, являющегося критическим механизмом отказа, используются ускоренные испытания на термоциклирование. При этом чипы разогреваются до максимальной температуры  $T_{jmax} = +150$  и  $+175^\circ\text{C}$  с градиентом  $dT = 100\text{ K}$  за время  $t_{on} = 1\text{ s}$ . Это позволяет смоделировать типовые условия эксплуатации современного транспортного привода ( $T_{jmax} = +150^\circ\text{C}$ ), а также режимы, в которых будут работать высокопроизводительные решения следующего поколения ( $T_{jmax} = +175^\circ\text{C}$ ). В обоих случаях критерием отказа является увеличение теплового сопротивления  $R_{th(j-c)}$  «кристалл-корпус» на 20%, указывающее на появление и рост трещин в соединительном слое «чип-подложка».

На рис. 3 слева представлены кривые изменения теплового сопротивления соедини-

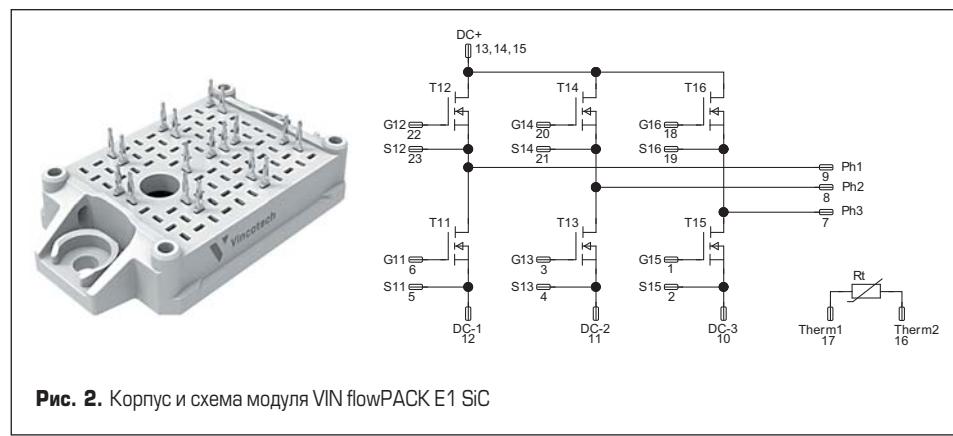


Рис. 2. Корпус и схема модуля VIN flowPACK E1 SiC

тельного слоя «кристалл-подложка» каждого тестируемого чипа. Количество циклов до отказа определяется пересечением графиков и горизонтальной линии, соответствующей критерию выхода из строя. Анализ статистики отказов, выполненный с помощью распределения Вейбулла (рис. 3, справа), выявил среднее количество циклов, необходимое для повреждения  $\sim 63\%$  всех протестированных образцов, что рассматривается как характеристический срок службы компонента.

## Оценка ожидаемого срока службы модуля

На следующем этапе проводится сравнение стойкости к термоциклированию силовых SiC-модулей со стандартными приборами Si

(рис. 4, слева), для чего используются модули Vincotech и конкурирующие приборы со стандартной технологией пайки. Испытания, проведенные при максимальной температуре чипов  $T_{jmax} = +150$  и  $+175^\circ\text{C}$ , подтверждают, что больший термомеханический стресс паянных соединений в SiC-ключах снижает стойкость к активному термоциклированию в семь раз по сравнению с кремниевыми приборами, независимо от производителя. Как и ожидалось, повышение температуры и термомеханического стресса, испытываемого модулем при  $T_{jmax} = +175^\circ\text{C}$ , значительно снижает надежность компонента при воздействии больших циклических нагрузок.

Полученные результаты позволяют использовать ресурсную модель для прогнозирования ожидаемого срока службы силовых ключей в ста-

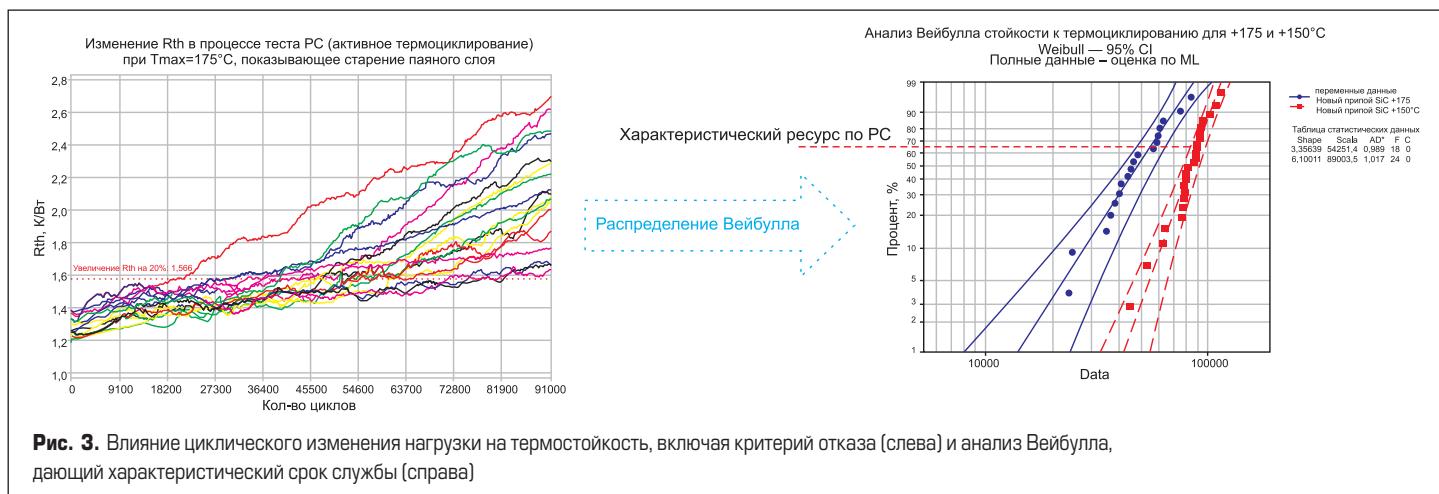


Рис. 3. Влияние циклического изменения нагрузки на термостойкость, включая критерий отказа (слева) и анализ Вейбулла, дающий характеристический срок службы (справа)

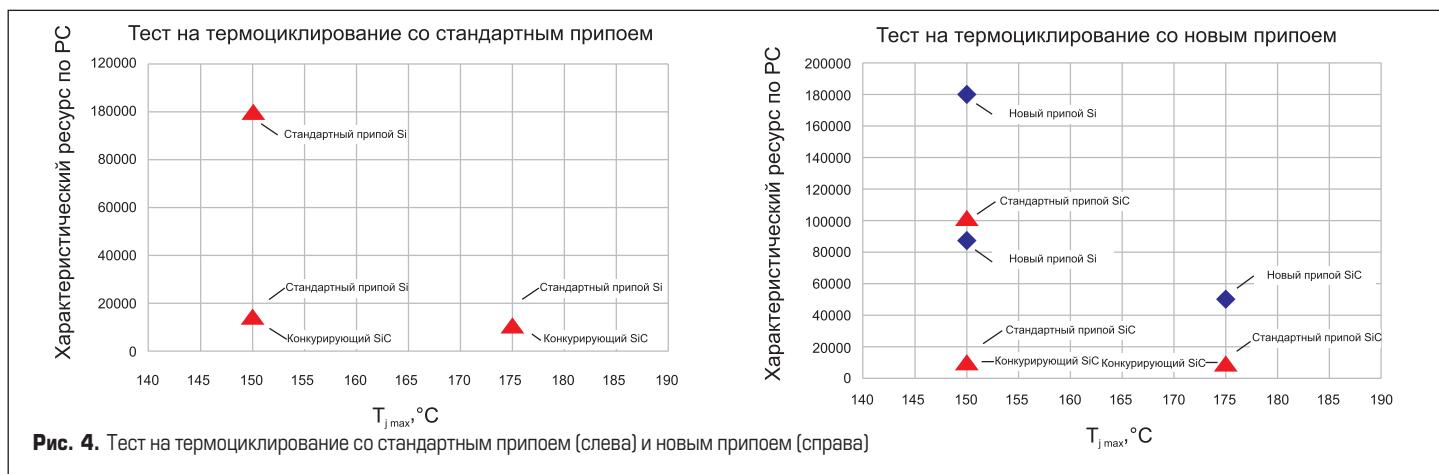


Рис. 4. Тест на термоциклирование со стандартным припоеем (слева) и новым припоеем (справа)

ционарных зарядных устройствах EV. При условии, что прибор испытывает 24 цикла в день при постоянной максимальной температуре  $T_{jmax} = +125^{\circ}\text{C}$  и градиенте 100 К, ожидаемый срок службы SiC-модулей составит всего 2,2 года по сравнению с 16 годами, ожидаемыми для кремниевых аналогов. Аналогичное сравнение, проведенное для нового материала припоя, внедренного Vincotech (рис. 4, справа), показывает увеличение стойкости к термоциклированию почти до уровня, соответствующего кремниевым приборам со стандартной технологией пайки.

Характеристики термоциклирования заметно улучшаются и при более высокой температуре чипов  $T_{jmax} = +175^{\circ}\text{C}$  за счет применения нового припоя, значительно повышающего надежность SiC-модулей. В условиях описанного выше профиля нагрузки зарядного устройства усовершенствованная технология пайки чипов увеличивает ресурс SiC-приборов примерно до 15 лет, что близко к сроку службы кремниевых силовых ключей и превышает пороговое значение, определяемое рыночными требованиями.

### Применение SiC в зарядных устройствах электромобилей

Передовая технология соединения чипов Vincotech является эффективным и экономичным решением для повышения надежности SiC-приборов в условиях циклического изменения нагрузки. До недавнего времени карбидокремниевые структуры многократно уступали по этому показателю их кремниевым аналогам. Исследовательские центры Vincotech продолжают изучение новых материалов припоеv, позволяющих в полной мере использовать потенциал данного способа соединения кристаллов. Одновременно анализируются новые технологии, такие как спекание, которые могли бы еще больше повысить стойкость к термоциклированию. Однако при этом необходимо повысить надежность сварных соединений проводниковых выводов чипов — еще одного слабого звена современных силовых ключей.

### Литература

- Yole report «Status of the power electronics industry: Market and Technology Report 2021».
- Материалы сайта [www.vincotech.com](http://www.vincotech.com)

**ЛИГРА**  
литые  
ольчатые  
диаторы

Производство



198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Швецова, д.23,  
Тел./Факс: (812) 600-18-55  
[www.ligra.ru](http://www.ligra.ru) E-mail: [ligra-spb@mail.ru](mailto:ligra-spb@mail.ru)

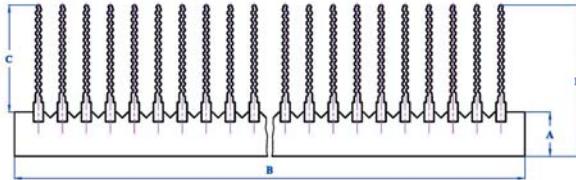
### Новинка — сварные радиаторы

**Любой профиль** из каталога **ЛИГРА** может быть сварен в конструкцию **нужной ширины и длины**



### Новинка — охладители О57

по вашим размерам



Акционерное общество  
«Завод «Комета»

173003, Россия, г. Великий Новгород, ул. Великая, 20  
+7 (8162) 335 390, 225 482, 334 938  
[market@komet53.ru](mailto:market@komet53.ru)  
[www.komet53.ru](http://www.komet53.ru)

#### СТАНОК НАМОТОЧНЫЙ СНПУ-2-01МТ

для открытой намотки электрических катушек  
проводом диаметром от 0,02 до 2,5 мм.  
Может комплектоваться устройством многоместной намотки



#### ТРАНСФОРМАТОРЫ ПИТАНИЯ НА ВИТЫХ РАЗРЕЗНЫХ МАГНИТОПРОВОДАХ

однофазные и трехфазные, мощностью от 25 Вт до 10 кВт  
на рабочие частоты 50 Гц, 400 Гц, 1000 Гц



#### ДРОССЕЛИ СЕТЕВЫЕ И МОТОРНЫЕ

трехфазные на токи до 640 А и напряжение до 500 В



#### МАГНИТОПРОВОДЫ

СТАНДАРТНЫЕ серии ШЛМ, ШЛ, ПЛ, ПЛР, ПЛМ, ОЛ по ГОСТ 22050-76  
на рабочую частоту 50–60 Гц, 400 Гц  
НЕСТАНДАРТНЫЕ на рабочую частоту 50–60 Гц



# Современная силовая электроника: разворот на Восток и «доступная функциональность». Часть 6. SilverMicro

**Мы продолжаем рассказывать о наиболее интересных производителях компонентов силовой электроники из Китая. Предыдущие статьи, посвященные компаниям Xiner, Novosense, Firstack, AnXon, Zenli, опубликованы в журнале «Силовая электроника» №1–5, 2023 [1].**

**Вполне возможно, что большинство читателей, увидев эту статью, скажет: «Еще один китаец, что здесь может быть нового?». Однако не торопитесь: в море производителей силовых модулей из Поднебесной не так много компаний, имеющих не только мощную производственную и испытательную базу, но и собственную технологию чипов и возможность их массового изготовления. Одним из таких игроков на рынке китайской силовой электроники является фирма Nanjing SilverMicro Electronics (далее — SilverMicro), специализирующаяся на выпуске электронных компонентов для промышленного применения.**

**Андрей Колпаков**

akolpakov@unirec.ru

Этот вопрос коснулся практически всех, кто занимается разработкой и изготовлением преобразовательных устройств и вынужден искать замену силовым модулям европейского и японского производства среди их китайских аналогов. На первый взгляд это несложная задача — на рынке доступно огромное количество компонентов от различных компаний, можно найти практически любой корпус, класс тока и напряжения.

Однако более детальный анализ (которым автор этих строк занимается уже почти два года) показывает, что в силовых ключах с абсолютно одинаковым названием могут стоять чипы разных производителей, с разными характеристиками. Более того, может отличаться и топология DBC-подложки, что неизбежно влияет на тепловое сопротивление кристалл-корпус  $R_{th(j-c)}$ , хотя в технической спецификации (datasheet) это никогда не отражается. Самым не приятным сюрпризом, с которым мы столкнулись при испытаниях мощного инвертора, содержащего несколько параллельных IGBT в фазе, был огромный небаланс токов (до 20%) у модулей с одинаковым кодом.

По поводу происхождения кристаллов IGBT и FWD в лучшем случае производитель сообщает вам, что они импортные (как правило, японские) или «локальные» (то есть китайские). Что отвечают

## Главная интрига: что внутри у китайских IGBT?

на такой вопрос многочисленные «официальные представители» (которые, как известно, ни за что не отвечают) — об этом и говорить не хочется. Один из наших азиатских партнеров (у которого как раз все прозрачно в отношении чипов) объяснил, что подобная «мутная концепция», к сожалению, характеристика для китайских компаний.

Как правило, силовые ключи с японскими чипами заметно превосходят по техническим характеристикам модули с кристаллами «местного» производства. Хорошая новость состоит в том, что собственные технологии развиваются в Китае очень быстро и последние версии чипов, в частности IGBT Trench 4, ведущих производителей уже почти не уступают мировым стандартам. Одним из таких производителей является Nanjing SilverMicro Electronics.

## Знакомьтесь: SilverMicro

Компания SilverMicro была основана в 2007 году всемирно признанным экспертом на рынке силовой электроники — доктором Майклом Чжуангом (Dr. Michael Zhuang) и его командой. Доктор Чжуанг имеет более чем двадцатилетний опыт проектирования силовых приборов и преобразовательных систем на их основе, он также является ведущим специалистом в области технологий силовой электроники. Фирма находится в промышленном парке SilverMicro площадью более 80 000 м<sup>2</sup> — в зоне экономического развития Лишуй, Нанкин (Lishui, Nanjing).

Производственные и офисные здания, а также научно-исследовательские корпуса занимают более 20 000 м<sup>2</sup>, включая чистые помещения площадью 2100 м<sup>2</sup>. В 2022 г. фирмой было изготовлено более 2,5 млн IGBT-модулей.

SilverMicro внедряет передовые технологии производства силовых ключей и использует самое современное оборудование для тестирования характеристик IGBT с рабочим напряжением до 3,3 кВ. С 2009 года вся продукция компании соответствует требованиям стандартов ISO 9001 и ISO14001, большинство компонентов имеет сертификат UL. В 2016 году получен сертификат TS16949, соответствующий международному автомобильному стандарту IATF 16949. Теперь SilverMicro имеет возможность на своем оборудовании проводить квалификационные испытания надежности силовых модулей в условиях жестких воздействий окружающей среды.

### SilverMicro: номенклатура

Командой SilverMicro, следующей девизу «Инновации и совершенствование», сегодня разработано более десяти конструктивных платформ и получено свыше 20 патентов. Продукция компании находит применение в промышленных инверторах, сварочных аппаратах, мощных источниках питания и ИБП, а также в новых энергетических системах (рис. 1, 2). Разработка специализированных решений по требованиям заказчиков также является сильной стороной SilverMicro, специалисты которой создали серию нестандартных силовых модулей, предназначенных для особо сложных применений.

Кроме широкой гаммы стандартных силовых ключей в промышленных корпусах (основные параметры приведены в таблице 1), SilverMicro выпускает модули для электротранспорта в конструкции B8 (аналог Hybrid Pack, рис. 1). SME B8 — это специализированный силовой ключ семейства Hybrid, предназначенный для применения в тяговых приводах гибридного и электрического транспорта мощностью до 180 кВт. Модуль выполнен в конфигурации Six-Pack (трехфазный инвертор) на основе технологии Infineon Trench FS IGBT 1200 B/600 A, обеспечивающей оптимальное сочетание потерь проводимости и переключения. При разработке конструктива SME B8 использованы новейшие материалы и технологии корпусирования. Модуль имеет базовую плату pin-fin, предназначенную для прямого жидкостного охлаждения, что значительно улучшает стойкость компонента к воздействию термоциклов, обеспечивает высокую плотность мощности и расширенный ресурс.

Использование высокоэффективной керамической DBC-подложки и усовершенствованной технологии сварки проводниковых соединений чипов способствует улучшению характеристик пассивного и активного термоциклирования, что считается необходимым требованием для тяговых приводов. Расположение сигнальных выводов позволяет установить драйвер в верхней части модуля, все силовые терминалы имеют винтовое соединение.

**Таблица 1.** Модули IGBT SilverMicro и их основные характеристики

Конфигурация	V <sub>CE</sub> , В	I <sub>C</sub> , А	Корпус
PI-CIB (выпрямитель/инвертор/чоппер)	600, 650, 1200	10–100	B2, B3, B9, C6, C7, T5, T6
FF (трехфазный инвертор)	650, 1200	10–400	A1, A6, A8, B3, B9, C6, C7, T5, T6
FB (трехфазный инвертор/чоппер)	600, 1200	10–75	A1, B3, C7
HH (H-мост)	650, 1200	35–200	A1, A7, B3, C7, T5, T6
HF (полумост)	650, 1200, 1700	40–1000	A4, A5, B1, P3, P4, T1, T2, T8, T9
SD (одиночный ключ)	650, 1200, 1700	50–3600	A2, B5, T2, T3, T4
CU, CL, DF, FD (чопперы, группы из трех чопперов)	650, 1200, 1700	50–600	A5, B5, T1, T2, T9
TL, TAR, TT, MAR, MCR (трехуровневые модули в разных конфигурациях)	650, 1200	50–600	A8, B2, B3, B9, T2, T7
IPM (интеллектуальные модули IGBT)	600, 1200	5–50	A7

Компоненты семейства SME B8 проходят полный цикл квалификационных испытаний в соответствии с современными требованиями автомобильной промышленности.

### SilverMicro: попробуем сравнить

Как уже было сказано, в отличие от многих производителей из Поднебесной, SilverMicro

не скрывает происхождения чипов. До тех пор пока уровень китайских IGBT-технологий отстает от мировых лидеров, SilverMicro использует кристаллы последних поколений MTM и Renesas, и это четко отражается в названии компонентов. Вместе с ними изготавливаются и силовые ключи с чипами, производимыми партнером SilverMicro — компанией Huahong (Group) Co., Ltd.

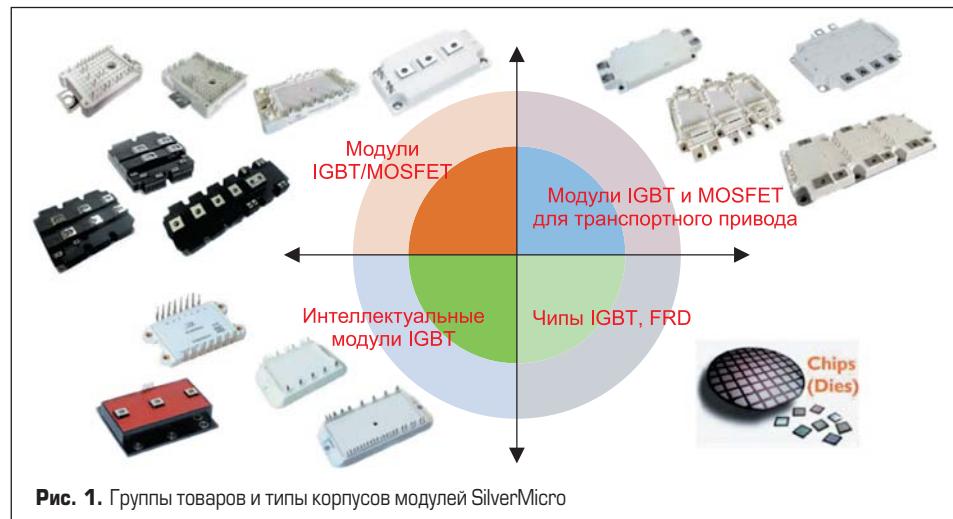


Рис. 1. Группы товаров и типы корпусов модулей SilverMicro



Рис. 2. Основные рынки SilverMicro: промышленные приводы, электромобили, источники питания и ИБП, сварочное оборудование и индукционный нагрев

**Таблица 2.** Сравнительные характеристики модулей IGBT Trench 4 (1200 В/450 А), корпус Econo-Dual

Тип модуля	$I_{CRM}$ , А $T_j = 175^\circ\text{C}$	$V_{CE(sat)}$ , В $T_j = 25/150^\circ\text{C}$	$E_{on}/E_{off}$ , мДж $T_j = +150^\circ\text{C}$	$V_F$ , В $T_j = +150^\circ\text{C}$	$Q_G$ , мкКл $V_{GE} = \pm 15$ В
EU Trench 4	1450 (3× $I_{Cnom}$ )	1,8/2,19	25/57	1,65	3,3
GT450HF120T9H	900 (2× $I_{Cnom}$ )	1,75/2,3	47/60	1,95	4,3
GT450HF120T9H-M	900 (2× $I_{Cnom}$ )	1,7/2,0	26/62	1,5	2,3

Huahong Group — это государственная китайская промышленная группа по выпуску 8- и 12-дюймовых пластин с применением собственных передовых технологий. Основное производство распределено по четырем площадкам, где действует три линии изготовления 8-дюймовых пластин и три 12-дюймовые линии. В настоящее время в Huahong Group занято более 10 000 сотрудников, сформировавших профессиональную команду международного уровня. Об этом говорит тот факт, что за время работы сотрудниками группы подано 17 000 патентных заявок.

В первой статье цикла, посвященной продукции Xiner [1], мы упомянули, что сравнение характеристик модулей, выпускаемых различными фирмами (особенно европейскими и азиатскими), — неблагодарное дело. Опытные специалисты знают, что, например, такой важный параметр, как тепловое сопротивление  $R_{th}$ , у разных производителей нормируется по-разному, что создает почву для махинаций и злоупотреблений со стороны недобросовестных продавцов. Однако для грамотных инженеров, знающих, как «читать datasheet между строк» [3], это не является проблемой.

Следуя правилам сравнения, изложенным в статье про Xiner, сопоставим основные характеристики двух вариантов наиболее востребованного на рынке мощных приводов полумостового IGBT-модуля EconoDual 1200 В/450 А компании SilverMicro (с собственным и японским чипами IGBT) с одним из лучших европейских аналогов. Опытный специалист сразу поймет, о чем идет речь, результаты представлены в таблице 2.

Мы сознательно (чтобы не отдавать никому предпочтения) включили в таблицу

пиковый ток перегрузки  $I_{CRM}$ , равный тройному номинальному току у европейского модуля и только двойному значениюю  $I_{Cnom}$  у IGBT SilverMicro. Напомним, что точно так же ( $2 \times I_{Cnom}$ ) величина  $I_{CRM}$  определялась для предыдущего, третьего поколения европейских IGBT. Скорее всего, причиной этого являются устаревшие условия нормирования. Тем более что опытные специалисты прекрасно понимают: сам по себе параметр  $I_{CRM}$  не имеет большого практического значения, так же, как и  $I_{Cnom}$ .

Напомним, что согласно договоренности ведущих производителей IGBT, величина  $I_{Cnom}$ , также указываемая в названии модуля, определяется производителем чипа на основании технологических коэффициентов. То есть если в модуле установлено три параллельных кристалла с «номинальным» током 150 А, то в спецификации будет указано  $I_{Cnom} = 450$  А. Реальный ток силового ключа в конкретных условиях применения выявляется только путем теплового расчета для определенных режимов работы и охлаждения. На наш взгляд, лучшим инструментом для такого расчета является SEMISEL [4], тем более что локальные версии программы, начиная с версии 3.1, позволяют создавать тепловые модели на основе технических спецификаций (опция User Defined Model).

Как видно из таблицы 2, статические и динамические потери силового ключа SilverMicro с собственным кристаллом несколько выше, чем у европейского «эталона». Однако у модуля с японским чипом (GT450HF120T9H-M) напряжение насыщения  $V_{CE(sat)}$  и прямое напряжение диода  $V_F$  уже заметно меньше, что дает ему ощутимые преимущества в приводных применениях. При этом по уровню динамических потерь ( $E_{on} + E_{off}$ ) он находится

на уровне европейского аналога. Также у GT450HF120T9H-M заметно ниже суммарный заряд затвора  $Q_G$  — это уменьшает мощность, рассеиваемую драйвером, что особенно важно при параллельном соединении IGBT.

### SilverMicro: новые технологии

Для соответствия растущим требованиям современного рынка силовой электроники компания SilverMicro уделяет большое внимание внедрению новых технологий и улучшению показателей надежности.

- Соединение медных проводников с медными шинами существенно улучшает токовые характеристики силовых модулей.
- Технология спекания нанопорошка Ag для установки чипов заметно снижает тепловое сопротивление и повышает стойкость к термоциклированию.

На рис. 3 показаны особенности новейших процессов ультразвуковой сварки проводников чипов и технологии спекания Ag для их монтажа на DBC-подложку, позволяющие существенно улучшить тепловые характеристики силовых ключей и повысить их надежность. Оба технологических процесса планируются использовать при производстве перспективных транспортных модулей.

Еще одно важное отличие SilverMicro от многих азиатских производителей — тщательный контроль технологических процессов, что приближает эту компанию к мировым лидерам. В частности, выполняется тотальный рентгеновский контроль качества паяного слоя кристаллов, а также 100%-ный контроль статических параметров и границ области безопасной работы (RBSOA).

Как и другие ведущие производители силовой электроники, SilverMicro проводит испытания, подтверждающие показатели надежности выпускаемой продукции в соответствии со стандартом AEC-Q101, в частности:

- статический тест при обратном смещении коллектора и повышенной температуре (HTRB, 1000 ч);
- статический тест при обратном смещении затвора и повышенной температуре (HTGB, 1000 ч);
- статический тест при обратном смещении коллектора при повышенной температуре и влажности (H3TRB, +85°C/85%);
- тест на воздействие пассивных и активных термоциклов.

*Продолжение следует*

### Литература

1. Колпаков А., Новоторженцев Д. Современная силовая электроника: разворот на Восток и доступная функциональность // Силовая электроника. 2023. № 1–5.
2. Материалы сайта [www.njsme.com](http://www.njsme.com)
3. Колпаков А. Контрольная точка, или Как читать datasheet между строк. Часть 1 и 2 // Электронные компоненты. 2006. № 6, 9.
4. Колпаков А. SEMISEL 3.1 — новые возможности // Силовая электроника. 2008. № 3.

# Развитие технологий модулей IGBT

## Часть 1. Конструктивно-технологические особенности паяных модулей традиционной конструкции

**В статье выполнен анализ конструктивно-технологических особенностей паяных IGBT-модулей традиционной конструкции. Рассмотрены основные типы модулей, анализируются способы увеличения циклостойкости и термодинамической стойкости, влияние внешней среды. Оцениваются способы эффективного прижима основания модуля к охладителю, минимизация внутренней индуктивности разводки и теплового сопротивления «переход-корпус». Минимум теплового сопротивления достигается повышением качества паяных соединений, выбором подходящего материала и толщины керамики и основания, а также соотношением площади чипов и основания.**

Роберт Шульга, к. т. н.<sup>1</sup>

Конструкции и технологии IGBT-модулей прошли длительный путь развития и в настоящее время определяют уровень техники в области энергетики, транспорта, промышленности, быта и спецтехники. В силу ряда обстоятельств отечественные производители выпускают второе поколение модулей, в то время как ведущие зарубежные производители освоили поколение 7+ и в значительной мере переходят с кремния на карбид кремния и нитрид галлия. Целью статьи является систематизация сведений по модулям и анализ их конструктивно-технологических особенностей. Литература [1–6] приводит данные по областям применения разного типа модулей, в [7–10] представлены сведения по основным зарубежным производителям. Библиография [11–15] рассматривает способы минимизации теплового сопротивления и индуктивности разводки, способы повышения циклостойкости, в то время как [16–21] анализируют модификации модулей разных типов.

### Типы и виды модулей IGBT

Номенклатура и виды модулей IGBT (далее — модули) весьма многочисленны из-за разнообразных фирменных названий и могут как совпадать по конструкции и параметрам, так и различаться по основным конструктивно-технологическим решениям. Всю номенклатуру модулей целесообразно разделить на две большие группы:

- малогабаритные модули на токи до 150 А;
- средние и сильнотоковые с токами более 150 А.

Для малогабаритных модулей характерны следующие тенденции:

- напряжение: не выше 1700 В;
- высокая степень интеграции с большим количеством ключей;
- тенденция к интеграции с драйверами, наличие внутренних датчиков температуры, тока (интеллектуальные модули).

Характерные конструктивно-технологические особенности:

- технология «кристалл-на-рамке», либо традиционная сборка и разводка кристаллов и многоштыревой системой верхних внешних выводов;
- монтаж кристаллов и изолирующей керамики с использованием пайки, реже с прижимом подложки к охладителю (Semikron);
- пластмассовый корпус.

Для средних и сильнотоковых модулей характерны следующие тенденции:

- напряжение: выше 6500 В;
- малое и среднее число ключей в модуле: обычно 1–6;
- тенденция к увеличению надежности, срока службы, термоциклостойкости, безопасности при аварии;
- тенденция к интеллектуализации выражена слабее, чем для малогабаритных модулей.

Средние и сильнотоковые модули удобно разделить на две группы:

- модули традиционной конструкции;
- модули с повышенной надежностью и циклостойкостью.

<sup>1</sup>ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»

Модули традиционной конструкции имеют значительное количество вариантов, но базовая концепция конструкции обычно единая: на массивное и механически прочное основание напаиваются (либо соединяются диффузионной сваркой) керамические платы с металлизированной разводкой, на которую, в свою очередь, напаяны полупроводниковые кристаллы. Разводка с верхних контактных площадок кристаллов к контактным площадкам платы осуществляется разваркой алюминиевой проволокой, внешние контакты паяются или привариваются. Защита кристаллов от влияния внешней среды осуществляется заливкой компаундом, внешний пластмассовый корпус механически прочен, но не герметичен.

В номенклатуре модулей традиционной конструкции можно выделить несколько унифицированных конструктивных рядов, имеющих идентичные или близкие массогабаритные и присоединительные размеры. Например, модули «34 мм», «62 мм» (в терминологии Infineon) или SEMITRANS (Semikron), ряд модулей типа Econo, EconoPak (Infineon) или SEMiX (Semikron), ряд высоковольтных стандартных модулей напряжением 3300, 4500, 6500 В.

Наряду с унифицированными рядами существует значительная «неунифицированная» номенклатура модулей традиционной конструкции некоторых фирм. Например, такие устройства выпускаются в виде интеллектуальных модулей IPM фирмой Mitsubishi Electric или фирмами Hitachi и Infineon.

Конструктивно-технологическими особенностями таких модулей являются монтаж кристаллов и керамических плат — пайка, разварка кристаллов алюминиевой проволокой, корпус пластмассовый, негерметичный.

**Таблица.** Модули с повышенной надежностью и циклостойкостью

Метод изготовления	Паяльные модули в «почти герметичных» пластмассовых корпусах (IR, Semelab)	Паяльные модули в герметичных металлокерамических и металлокерамических корпусах (IR, Semelab)	SkiM (Semikron), LoPak (ABB)	SkiiP (Semikron)	StakPak (ABB)	Press-Pack (Westcode, Toshiba)
Монтаж кристалла						
Монтаж кристалла	Пайка	Пайка	Пайка	Пайка	Прижимной	Прижимной
Монтаж изолирующей керамической подложки	Пайка на основание	Специальное изолирующее основание с внутренней (многоуровневой) разводкой металлизации	Прижимной монтаж непосредственно на охладитель	Прижимной монтаж непосредственно на охладитель	—	—
Разводка кристалла сверху	Разварка проволокой	Разварка проволокой	Разварка проволокой	Разварка проволокой	Прижимной контакт	Прижимной контакт
Возможность реализации многоуровневых схемотехнических решений		Высокая	Средняя	Средняя	Один ключ	Один ключ
Интеллектуализация	—	IPM	Интеграция с драйвером	Интеграция с драйвером	—	—
Корпус	Специальная пластмасса, «почти герметичный»	Металлокерамический, герметичный	Пластмасса, негерметичный	Пластмасса, негерметичный	Пластмасса, негерметичный	Металлокерамический, герметичный
Защита от воздействия среды	Хорошая	Хорошая	Средняя	Средняя	Средняя	Хорошая
Циклостойкость	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая	Очень высокая	Очень высокая
Термодинамическая стойкость корпуса	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая	Очень высокая
Применение	Авиация, космос, военная техника		Промышленность, транспорт, альтернативная энергетика		Энергетика	Энергетика, транспорт, военная техника

Модули повышенной надежности и циклостойкости можно разделить на следующие группы:

- модули, близкие по конструктивным решениям к традиционным, однако имеющие почти герметичный корпус из специальной пластмассы или композита, обеспечивающие защиту от внешней среды на уровне, близком к герметичным металлокерамическим и металлокерамическим корпусам. Например, такие модули выпускают фирмы IR, Semelab;
- модули в металлокерамических и металлокерамических корпусах с изолированным основанием (например, фирмы Semelab, Omnidrel (в составе IR) и др.);
- модули с прижимным креплением изолирующих керамических плат с напаянными кристаллами непосредственно к охладителю (фирмы Semikron, ABB);
- модули с полностью прижимным креплением кристаллов в негерметичном пластмассовом корпусе (StatPak, ABB);
- модули с полностью прижимным креплением кристаллов в герметичном металлокерамическом таблеточном корпусе (Westcode, Toshiba).

Основные конструктивные типы модулей с повышенной надежностью и циклостойкостью приведены в таблице. Ниже рассмотрены конструктивные особенности различных типов модулей паяной конструкции.

### Модули паяной традиционной конструкции

Модули паяной конструкции охватывают диапазон напряжений 55–6500 В и выше и токи 1–3600 А и выше. Имеются все известные

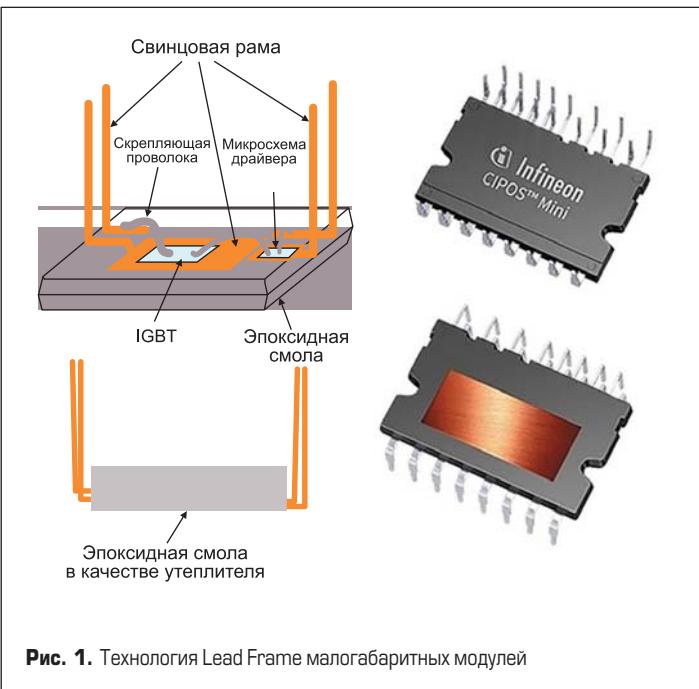
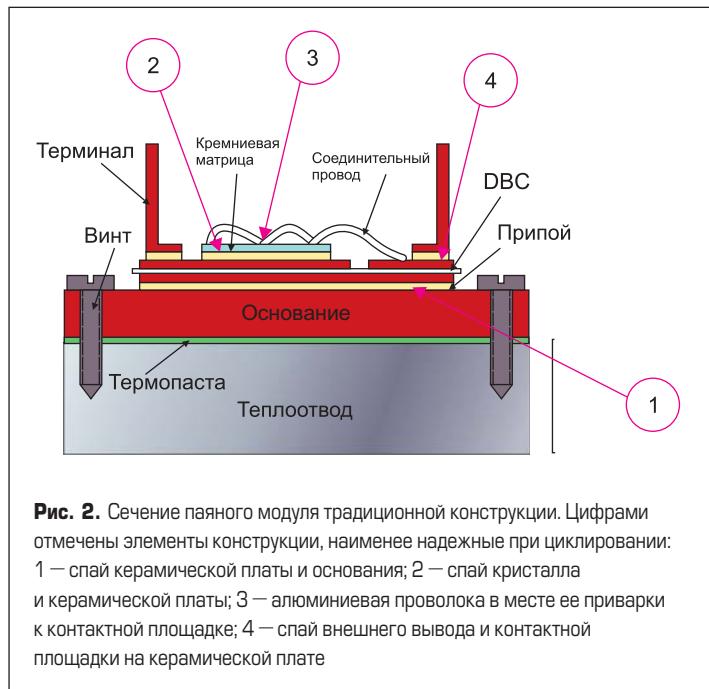


Рис. 1. Технология Lead Frame малогабаритных модулей



**Рис. 2.** Сечение паяного модуля традиционной конструкции. Цифрами отмечены элементы конструкции, наименее надежные при циклизации: 1 — спай керамической платы и основания; 2 — спай кристалла и керамической платы; 3 — алюминиевая проволока в месте ее приварки к контактной площадке; 4 — спай внешнего вывода и контактной площадки на керамической плате

топологии: полумосты, трехфазные инверторные модули (Sixpack), СИВ-модули (Converter — Inverter — Brake), в которых интегрированы функции выпрямителя, инвертора и тормозного чоппера в одном корпусе. Существенную долю занимают интеллектуальные модули со встроенным драйвером и датчиками температуры, тока. Такое большое разнообразие схем и мощностей приводит к разнообразию технологий их построения.

Среди малогабаритных конструкций следует выделить модули, построенные по технологии «кристалл-на-рамке» (Leadframe), которая приведена на рис. 1 и широко применяется при производстве дискретных приборов в пластмассовых корпусах. Носителем кристаллов IGBT и микросхемы драйвера является штампованный медная полоса, из которой также делаются выводы. Корпус модуля формируется заполнением эпоксидной смолой, она также служит защитой от окружающей среды. Для обеспечения электрически изолированного теплоотвода рамка монтируется на изолированном алюминиевом или медном носителе, подобном основанию, и только потом заливается. Типичные напряжения таких модулей 600–1200 В, токи 1–30 А.

Более сильнотоковые малогабаритные модули собираются в конструктивном исполнении типа EASY-Eco-Pack-SEMITOP и др. Эти конструкции близки к традиционной сборке с разводкой кристаллов и многоштырьковой системой верхних внешних выводов. Система внешних выводов облегчает интеграцию модуля с платой управления и позволяет осуществить разнообразные схемы полупроводниковых элементов внутри модуля. С помощью такой технологии можно реализовать полный силовой агрегат в следующем составе: выпрямительный диодный мост + IGBT-инвертор + «тормозной» чоппер с системой датчиков тока и температуры, а также встроенным драйвером (IPM).

Конструктивно-технологические особенности средне- и сильнотоковых модулей традиционной конструкции предусматривают монтаж кристаллов и керамических плат с помощью пайки, серии стандартных модулей, но в их дизайн вносят некоторые изменения, необходимые для использования при разварке кристаллов, — алюминиевая проволока, корпус пластмассовый, негерметичный. Модули 34 мм<sup>2</sup>, 62 мм<sup>2</sup>, а также стандартные модули с несложной схемной конфигурацией интегрируются в единую конструкцию с модулями блоков драйверов. Серия высоковольтных модулей повторяет серию стандартных модулей, но в их дизайн вносят необходимые изменения, необходимые с учетом высоковольтности («ребра» на поверхности корпуса, разделяющие разнополярные электроды, более толстые изолирующие керамические платы).

Серия модулей типов Econo-Econo-Pack помогает реализовать более сложные схемные конфигурации (вплоть до 12-ключевой), кроме того, система «несиловых» (управление, сервис, сигналы

с датчиков) электродов для этого типа конструкции более развита и позволяет осуществить плотную интеграцию модуля с платой управления. Остальные неунифицированные серии модулей паяной конструкции близки по своему типу к унифицированным типам модулей.

Базовая конструктивно-технологическая концепция всех разновидностей паяных модулей одинакова. На массивное и механически прочное теплопроводящее основание (обычно из меди или композитов) напаивают керамические теплопроводящие платы с металлизированной разводкой, так называемой DBC, на которые напаяны полупроводниковые кристаллы. Разводка с верхних контактных площадок кристаллов к контактным площадкам платы осуществляется разваркой алюминиевой проволокой, внешние контакты паяются или привариваются. Защита кристаллов от влияния внешних условий производится заливкой компаундом, внешний пластмассовый корпус механически прочен, но не герметичен. Сечение паяного модуля традиционной конструкции до заливки компаундом и монтажа пластмассового корпуса показано на рис. 2.

Внешний вид и конструктивное исполнение модулей традиционной конструкции приведены на рис. 3.

Типичная последовательность операций при сборке модуля традиционной паяной конструкции следующая:

- изготовление металлизированной (медь соединение с керамикой) керамической платы со сплошной металлизацией на нижней поверхности и разводкой контактных площадок на верхней поверхности;
- пайка кристаллов на керамику;
- навесная разводка кристаллов алюминиевой проволокой с контактных площадок на планарной стороне кристаллов на контактные площадки керамической платы;
- пайка плат с кристаллами на основание;
- пайка или разварка внешних выводов (пайка внешних выводов обычно совмещается с предыдущей операцией);
- заливка гелем, монтаж пластмассовых деталей корпуса в зависимости от конструкции модуля.

### Основные проблемы традиционной конструкции

Основные проблемы традиционной конструкции обусловлены следующим:

- проблемы с циклостойкостью из-за большой разности линейных температурных коэффициентов расширения (ТКР) пар «основание-керамика», «керамика-кристалл», «керамика-внешний вывод», а также недостаточной стойкости алюминиевой проволоки в местах контактной сварки;



**Рис. 3.** Внешний вид и конструктивное исполнение модулей традиционной конструкции: а) производства ABB на ток 1200 А, напряжение 3300 В; б) производства Infineon на ток 1500 А, напряжение 3300 В; в) конструктивное исполнение модуля на рис. а

- проблемы с воздействием среды, особенно при долговременной эксплуатации, так как защиту кристаллов осуществляет только гель (компаунд);
- недостаточная термодинамическая стойкость и пожаробезопасность в связи с тем, что при КЗ кристалла или группы кристаллов возникает электрическая дуга при перегорании алюминиевой проволоки, причем выгорание компаунда приводит к газодинамическому удару и разрушению пластмассовой крышки корпуса и возможному возгоранию устройства;
- проблемы с эффективным прижимом основания к охладителю (для сильнотоковых модулей с основанием большой площади);
- проблема минимизации внутренней индуктивности разводки в модуле;
- оптимизация теплового сопротивления переход-корпус.

#### Повышение циклостойкости

Повышение циклостойкости достигается ликвидацией недостатков элементов конструкции на рис. 2 в порядке их приоритета.

Наиболее острая проблема циклостойкости спая «основание-керамика» решается применением композитных материалов основания, которые заменяют медь, имеют более высокую теплопроводность и более близкий к керамике ТКР. Наибольшее распространение получил композит алюминия и карбида кремния (AlSiC), а также медно-молибденовые композиты (CuMo) либо более дешевые композиты на основе графита.

Оригинальное решение фирмы Mitsubishi Electric позволяет использовать в качестве материала для основания алюминий. При этом применяют технологию непосредственного сращивания алюминиевого основания с не металлизированной снизу керамической платой. Верхняя металлизация на керамике также выполнена из алюминия, на который при помощи специальной пайки посажены кристаллы. Такое решение позволяет втрое повысить стойкость модуля к термоциклам, а замена меди алюминием на треть снижает вес модуля.

Наиболее радикальным способом решения проблемы является отказ от основания вообще и обеспечение прижимного контакта керамической платы непосредственно к охладителю, но такая методика предполагает изменение базовой концепции.

Для повышения циклостойкости спая «кристалл-керамика» принимают следующие меры:

- замена алюмооксидной ( $Al_2O_3$ ) керамики на более согласованную с кремнием по ТКР, например алюмонитридную (AlN) керамику;
- оптимизация свойств припоя, применение более жестких и высоко-температурных припоеv;
- оптимизация толщины слоя припоя, гарантированная посадка без «клина»;
- замена операции пайки на низкотемпературную диффузионную сварку (сварка под давлением).

После выполнения указанных выше оптимизирующих процедур, по публикациям ведущих фирм (Infineon, Mitsubishi Electric, Semikron), недостаточная циклостойкость разваренных алюминиевых проводов в модуле ограничивает энергоциклическость всего модуля.

Несмотря на незначительную площадь сварного контакта, он находится под весьма жестким циклирующим воздействием. При этом суммируется относительно длительный цикл нагрева всего модуля и значительно более короткие, но повторяющиеся с тактовой частотой работы преобразователя, циклы изменения температуры структуры. Такие изменения температуры в кремнии имеют небольшой температурный размах, который в области сварного контакта существенно возрастает за счет локального протекания тока большой плотности. Наряду с ростом плотности тока происходит перемещение атомов алюминия под воздействием потока электронов и электрического поля с образованием каверн и микротрешин в зоне контакта.

Указанные воздействия могут приводить к дефектам двух типов:

- отслаивание проволоки от контактной поверхности, то есть разрушение непосредственно контакта;
- растрескивание и обламывание проволоки вблизи контакта, то есть разрушение проволоки.

По данным фирм Mitsubishi Electric, Semikron, первый вид дефекта проявляется через 20 000–30 000 термоциклов с температурным размахом +100 °C, второй дефект при устранении первого дефекта проявляется после 50 000–70 000 циклов.

Методы борьбы с указанными дефектами:

- минимизация перегрева кремниевой структуры за счет уменьшения переходного теплового сопротивления переход-корпус;
- оптимизация режима сварки алюминиевых проволочных выводов;
- разварка каждой проволоки с несколькими сварными контактами к контактной площадке;
- замена проволочных выводов на ленточные; при этом ширина ленты несколько миллиметров при толщине сотни микрон снижает плотность тока в выводе, эквивалентную десяткам локальных контактов проволок, что увеличивает суммарную площадь контакта.

Циклостойкости контакта внешнего вывода и контакта «кристалл-керамика» аналогичны и меры по их улучшению одинаковы. При этом возможно повышение качества этих соединений путем замены пайки на ультразвуковую сварку.

#### Влияние внешней среды

Влияние внешней среды для общепромышленных модулей обычно не исследуется из-за удовлетворительного соответствия общепромышленным стандартам и условиям приобретения. Дополнительная защита актуальна для продукции ответственного применения, например для ж/д транспорта, энергетики, авиации, космоса и военных применений.

#### Недостаточная термодинамическая стойкость модулей традиционной конструкции

Недостаточная термодинамическая стойкость модулей традиционной конструкции присуща базовой концепции и не может быть существенно улучшена. Решения в рамках базовой концепции находятся в виде разварки лентой, применения дополнительных экранов, дугогасящих



**Рис. 4.** Вид сверху и снизу на модуль MPD серии Mitsubishi Electric с секционированным основанием



**Рис. 5.** Модуль производства Semelab с прижимной поверхностью основания, изготовленный по технологии pin fin cooling

компаундов и являются паллиативными. Кардинальное решение обеспечения термодинамической стойкости возможно только при использовании других конструктивно-технологических концепций — например, для герметичных полностью прижимных модулей и т. д.

### Эффективный прижим основания модуля к охладителю

Эффективный прижим основания модуля к охладителю является наиболее актуальным для силноточных модулей с большой площадью основания. Для обеспечения минимального теплового сопротивления контакта «корпус-охладитель» основание необходимо прижать к охладителю с равномерно распределенным по площади усилием, используя при этом крепежные болты, размещенные по периметру основания.

Для обеспечения прижимного усилия в середине основания используют профилированные основания, которые в ненапряженном состоянии имеют некоторую выпуклость в середине.

Фирма Mitsubishi Electric для силноточных модулей MPD использует конструкцию с многосекционным основанием (рис. 4). Каждая секция, по сути, прижимается своими болтами (отверстия под крепеж видны на рисунке), что обеспечивает более равномерный прижим и снижение теплового сопротивления.

Оригинальное решение для гарантированно равномерного теплопотвода использует фирма Semelab (рис. 5). Основание модуля имеет профилированную прижимную поверхность в виде регулярной сетки из цилиндрических выступов (pin fin cooling technique).

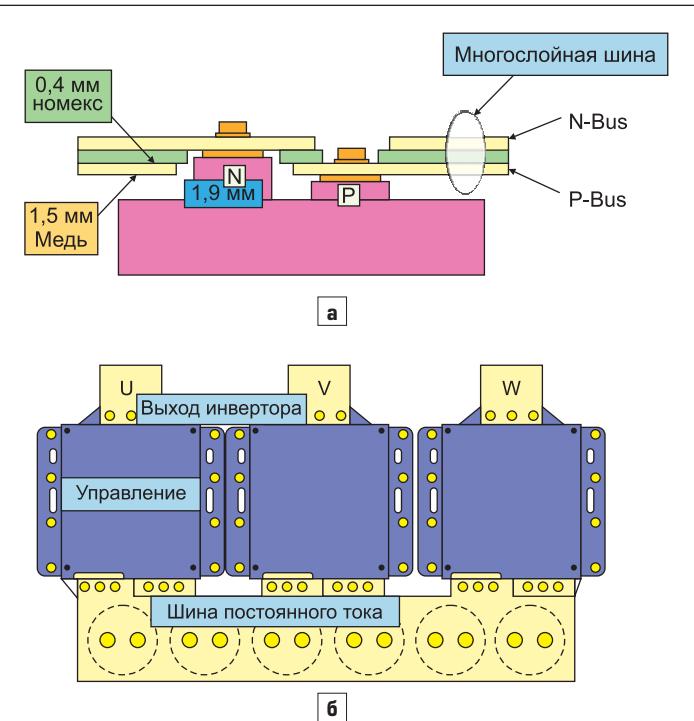
### Минимизация внутренней индуктивности разводки

Минимизация внутренней индуктивности разводки актуальна для силнотоковых модулей, так как внутренняя индуктивность во многом определяет область безопасной работы модуля, в котором уже невозможно включить дополнительные демпфирующие цепи.

Общий подход к минимизации внутренней индуктивности предусматривает следующие меры:

- минимизация длины шин внутренней разводки и площади паразитных контуров;
- увеличение ширины шин внутренней разводки;
- применение там, где возможно, парных шин в виде малоиндуктивной полосковой линии;
- симметризация пути токов внутри модуля так, чтобы паразитные контуры были направлены встречно по магнитному потоку.

Например, в модулях Mitsubishi Electric H-серии площадь паразитного контура вывода к внешним цепям по сравнению с предыдущей

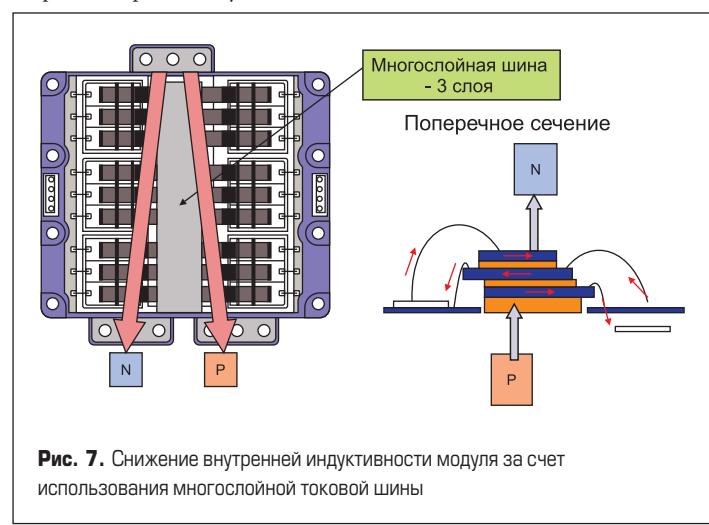


**Рис. 6.** Разновысокие внешние выводы для удобства подключения шины постоянного тока в исполнении полосковой линии: а) сечение; б) вид сверху на комплектный трехфазный мост

NF-серий существенно сокращена. Для силноточных модулей типа MPD разработан тип корпуса с разновысокими внешними выводами. В модуле, реализующем схему «стойки» моста, выводы для подключения шины постоянного тока имеют разную высоту. Это предоставляет возможность прямого подключения к ним двуслойной ламинированной шины постоянного тока (медь-изоляция-медь): 1,5–0,4–1,5 мм, без использования дополнительных средств сопряжения. Внешний вид модуля и типичное подключение многослойной шины постоянного тока к модулю MPD показаны на рис. 6.

Для снижения индуктивности внутренней разводки в модулях того же типа применена разводка силового тока с помощью многослойной низкоиндуктивной шины, приведенной на рис. 7. Применение такого технического решения позволило получить исключительно низкую внутреннюю индуктивность модулей серии MPD на уровне 16 нГн.

Большинство силнотоковых IGBT-модулей являются монокристаллическими, поэтому исключительно важна синхронная работа всех кристаллов ключа модуля в переходных режимах включения и выключения. Кристаллы даже одного ключа силнотокового модуля расположены на достаточно большой площади (например, на рис. 7 левая и правая стороны модуля являются единичными ключами). Во избежа-



**Рис. 7.** Снижение внутренней индуктивности модуля за счет использования многослойной токовой шины

ние ВЧ-осцилляций тока между кристаллами и секциями кристаллов одного ключа, возникающих в паразитных внутренних контурах, специалистами Mitsubishi Electric применена модифицированная система разварки кристаллов с помощью многочисленных проволок.

Одна из алюминиевых проволок в этой системе соединяет соседние кристаллы IGBT одного ключа, даже если они находятся в разных секциях. Такая «байпасная» гальваническая связь минует основной путь тока через силовую шину, выравнивает потенциалы кристаллов и предотвращает ВЧ-колебания.

### Минимизация теплового сопротивления «переход–корпус»

Минимизация теплового сопротивления «переход–корпус» определяется минимумом тепловых сопротивлений всех слоев в пакете от полупроводниковой структуры до основания (рис. 3), а также площадью кремниевых чипов в модуле и площадью его основания. Ранжировка вклада тепловых сопротивлений слоев примерно соответствует:

- качество паяных соединений «керамика–основание», «кристалл–керамика»;
- материал и толщина керамической платы;
- материал и толщина основания;
- соотношение площади чипов и основания.

### Качество паяных соединений

Качество паяных соединений становится одной из важнейших проблем, которые определяют качество и надежность модуля традиционной конструкции в целом. Необходимо обеспечить сплошное соединение без непропаянных пустот и пузырьков. Особенно актуально наличие в спае «кристалл–керамика» пустот с линейными размерами в доли миллиметра, которые могут привести к локальному перегреву полупроводниковой структуры и снизить надежность и стойкость к перегрузкам всего модуля. Детализация вопросов качества пайки требует отдельного рассмотрения в разделе оптимизации технологий изготовления модулей.

### Материал и толщина керамической платы

Материал и толщина керамической платы определяют изоляцию силового полупроводника от охладителя и реализуются с помощью керамической подложки DCB или AМВ. Наиболее распространена керамика  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , толщина которой в модулях напряжением до 1700 В ранее снижена с 0,63 до 0,38 мм, чтобы уменьшить тепловое сопротивление

переход–корпус. Это позволило частично компенсировать повышение теплового сопротивления за счет сокращения площадей следующего поколения чипов. На рис. 8 приведена корреляция теплового сопротивления, обусловленного потерями в переходе чипа ( $\text{kVt}$ ), в зависимости от площади чипа ( $\text{mm}^2$ ) и толщины керамики.

Значительный эффект дает замена материала керамики. Перспективно применение алюмомитридной керамики  $\text{AlN}$ , которая имеет близкий к кремнию ТКР и значительно превосходит  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по теплопроводности. Распространение этой керамики сдерживает высокая цена, но по мере расширения применения она снижается, а тепловое сопротивление модуля уменьшается вплоть до 30%.

Альтернативными материалами керамики для применения являются легированный кремнием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , которые при толщине 0,32 мм и толстых медных слоях до 0,6 мм позволяют получить лучшее, чем у  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -керамики, тепловое сопротивление и лучшее растекание тепла.

Для относительно низковольтных применений до 1200 В перспективны гибридные изолирующие платы, представляющие собой пластину молибдена или вольфрама с напыленным на них тонким слоем  $\text{AlN}$ -покрытия толщиной от единиц до нескольких десятков микрон.

Весьма перспективны изолирующие платы на основе поликристаллического алмаза, который имеет близкий к кремнию ТКР и теплопроводность в 1,5 раза выше меди. Применение такого материала позволяет увеличить толщину платы, которые за счет интенсивного бокового обдува способны снизить общее тепловое сопротивление модуля. При этом оправданно применение относительно дешевых чипов с относительно малыми размерами и с минимальными потерями, что становится возможным в ряде технических решений, связанных с разработкой кристаллов. В высоковольтных модулях применение алмазных подложек обеспечивает двойную выгоду, так как увеличение толщины платы оправдывает повышение класса изоляции. Пока сдерживающими факторами остаются высокая цена и трудность обработки поликристаллических алмазных подложек.

### Материал и толщина основания

Материал и толщина основания в виде меди толщиной около 3 мм вносит незначительный вклад в общее тепловое сопротивление, зато повышает теплоемкость и растекание тепла под чипом и несколько снижает переходное тепловое сопротивление в период времени 0,1–1 с. Альтернативные композитные материалы имеют вдвое меньшую

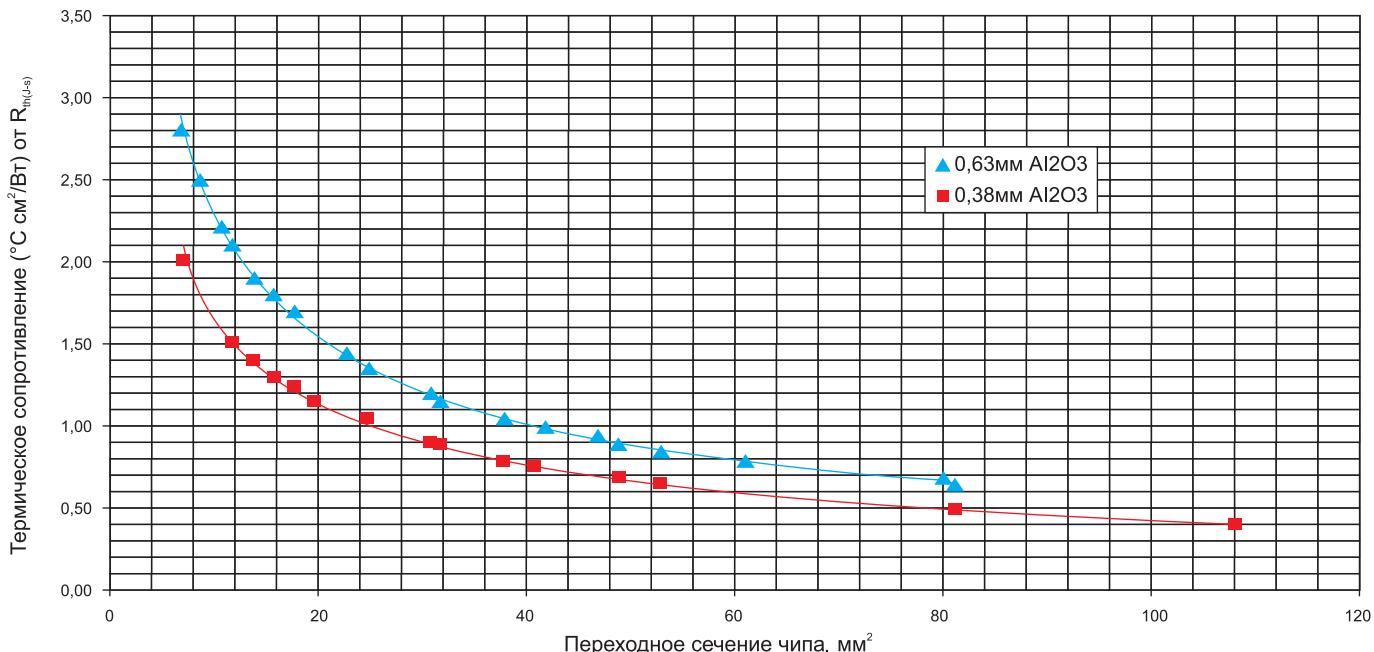


Рис. 8. Корреляция теплового сопротивления и площади чипа для разной толщины керамики

плопроводность, а также меньшую теплоемкость, поэтому вклад таких оснований в общее тепловое сопротивление становится заметным, особенно в переходных режимах.

#### **Соотношение площади чипов и основания**

Соотношение площади чипов и основания определяется традиционным противоречием в соотношении цены и качества. Уменьшение суммарной площади чипов за счет снижения их размера или количества удешевляет модуль, зато технические характеристики, включая тепловое сопротивление, обычно ухудшаются.

#### **Выводы**

Выполнен анализ конструктивно-технологических особенностей паянных IGBT-модулей традиционной конструкции. Рассмотрены основные типы модулей, анализируются способы увеличения циклостойкости, влияния внешней среды, методы повышения термодинамической стойкости. Оцениваются способы эффективного прижима основания модуля к охладителю, минимизация внутренней индуктивности разводки и теплового сопротивления «переход-корпус». Минимум теплового сопротивления достигается повышением качества паяных соединений, выбором подходящего материала и толщины керамики и основания, а также соотношением площади чипов и основания.

#### **Литература**

1. Шульга Р. Н. Преобразовательные подстанции на IGBT-транзисторах // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 12.
2. Шульга Р. Н. Приборы на основе карбida кремния — основа преобразователей для электроэнергетики // Силовая электроника. 2021. № 6.
3. Шульга Р. Н. Приборы на основе нитрида галлия — основа для преобразователей напряжения и частоты // Силовая электроника. 2021. № 6.
4. Шульга Р. Н. Преобразователи напряжения малой и большой мощности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 7.
5. Шульга Р. Н. Контроллеры DC/DC-конвертеров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 6.
6. Шульга Р. Н. Специальные вопросы электрооборудования. Часть 1. Контроллеры и преобразователи. М.: НТФ «Энергопресс», 2023.
7. [www.abb.com](http://www.abb.com)
8. [www.infineon.com](http://www.infineon.com)
9. [www.mitsubishi.com](http://www.mitsubishi.com)
10. [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
11. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
12. Lehmann J., Netzel M., Pawel S., Doll Th. Method for Electrical Detection of End-of-Life Failures in Power Semiconductors. Semikron Elektronik GmbH.
13. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules // PCIM Europe Journal. 2003.
14. Thermal Considerations in the Application of Silicon Rectifier. IR Designer's Manual. 1991.
15. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Shorttime or Intermittent Duty. IEC 60747-6 by SEMIKRON.
16. Силовые модули производства Infineon. Разъяснение информации, приводимой в технических условиях. [www.compel.ru/lib/95684](http://www.compel.ru/lib/95684).
17. Rimestad L. Test Strategies in Industrial Companies. 10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS). 2018.
18. Кемпиак К., Шиффмахер А., Чуприн А., Линдеманн А., Уайльд Ю., Рудзи Я., Остервальд Ф. Термоциклирование в условиях тепловой перегрузки: ускоренные испытания надежности соединения чипов // Силовая электроника. 2022. № 4.
19. Ботан В., Кичин С. Модули SiC LinPak второго поколения: улучшенные динамические характеристики и надежность // Силовая электроника. 2022. № 4.
20. Kicin S. et al. Ultra-Fast Switching 3,3 kV SiC High-Power Module. PCIM Europe digital days 2020. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Germany, 2020.
21. Нисияма Т., Миязаки Ю. Модули Mitsubishi Electric на базе 6-го поколения IGBT. [www.power-e.ru/2010\\_3\\_16php](http://www.power-e.ru/2010_3_16php)



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
ЭЛЕКОНД**

Россия, 427968, Удмуртская Республика,  
г. Сарапул, ул. Калинина, 3  
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77  
Факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53  
e-mail: [elecond-market@elcudm.ru](mailto:elecond-market@elcudm.ru)  
<http://www.elecond.ru>

**КОНДЕНСАТОРЫ**  
разработка и производство

**оксидно-электролитические алюминиевые**  
K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80,  
K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89,  
K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96,  
K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип),  
K50-102, K50-103, K50-104, K50-105, K50-106

**объемно-пористые tantalовые**  
K52-1, K52-1М, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11,  
K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24,  
K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

**оксидно-полупроводниковые tantalовые**  
K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип),  
K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип),  
K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

**суперконденсаторы (ионисторы)**  
K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

**накопители электрической энергии**  
на основе модульной сборки суперконденсаторов  
МИК, МИЧ, ИТИ, НЭЭ

# Использование GaN FET с контроллерами и драйверами, разработанными для Si MOSFET

**В статье рассматриваются ключевые различия между GaN FET и Si MOSFET, даются рекомендации по использованию универсальных драйверов затворов для управления транзисторами GaN, описываются основные модификации полумостовых драйверов и контроллеров.**

**Александро Позо  
(Alejandro Pozo)<sup>1</sup>**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

Силовые ключи на основе нитрида галлия (GaN) получают все более широкое распространение в индустрии силовой электроники благодаря малым размерам, большой скорости переключения, высокой эффективности и меньшей стоимости по сравнению с традиционными кремниевыми MOSFET. Однако быстрое развитие технологии нитрида галлия опережает разработку специализированных драйверов и контроллеров, ориентированных на работу с ключами GaN. Во многих случаях для этой цели используются универсальные устройства управления, созданные для Si MOSFET, что требует тщательного учета различных факторов для оптимизации их характеристик.

## Основные отличия структур GaN и Si MOSFET

Характеристики GaN FET- и Si MOSFET-приборов заметно различаются, что предусматривает специальные требования к традиционным устройствам управления затворами. Ниже перечислены основные особенности GaN-структур:

- Меньшие уровни напряжения на затворе:** для включения eGaN FET от EPC требуется +5 В (максимальное значение 6 В), для выключения — 0 В. Это предъявляет соответствующие требования к источнику питания драйвера. Уровень защиты от падения напряжения UVLO также должен быть выбран с учетом сигнала управления 5 В.
- Более высокая скорость коммутации:** Si MOSFET имеют в 3 раза более высокое характеристическое соотношение  $R_{DS(on)} \times Q_G$  по сравнению с GaN и до 10 раз большее соотношение  $R_{DS(on)} \times Q_{GD}$  [1]. В результате этого в узле коммутации может присутствовать фронт напряжения  $dv/dt$  до 75 В/нс или даже выше, поэтому драйверы затворов должны иметь иммунитет к таким скоростям коммутации. С ростом скорости переключения увеличивается негативный эффект, создаваемый паразитными индуктивностями, что требует особого внимания к минимизации распределенных параметров при проектировании силовых цепей.
- Более высокий перепад обратного напряжения:** в отличие от Si MOSFET, GaN-структуры не имеют только диода, но они проводят ток в обратном направ-

лении с большим перепадом напряжения (~2,5 В [1] по сравнению с ~1 В для MOSFET). Это означает, что на драйвер будет воздействовать более высокий отрицательный сигнал со стороны узла коммутации в течение «мертвого времени». Следовательно, устройство управления затвором должно допускать работу в бутстрепном режиме при отрицательном переходном напряжении вплоть до -5 В.

**d. Физическая структура:** транзисторы eGaN FET имеют латеральную структуру [1], в то время как Si MOSFET с напряжением > 20 В обычно являются вертикальными приборами. Поэтому у них отличается расположение выводов, что создает проблемы с трассировкой платы при использовании стандартных драйверов затворов. Данный факт учитывается при разработке специализированных устройств управления GaN. «Конфликты компоновки» при использовании драйвера Si MOSFET для работы с GaN-ключами требуют компромиссного подхода к проектированию.

## Проблемы совместимости драйверов затворов MOSFET

Использование стандартных драйверов MOSFET для управления GaN-приборами предполагает анализ следующих факторов.

- Совместимость с источником питания 5 В:** драйвер затвора должен быть совместим с питанием 5 В, формируемым внешним регулируемым источником или внутренним стабилизатором LDO.
- Совместимость уровней UVLO:** схема защиты от снижения напряжения (UVLO) должна быть совместимой с питанием драйвера 5 В. Типовой пороговый уровень UVLO для низковольтных каскадов драйвера находится в диапазоне 3,75–4 В и 3,25–3,75 В (драйвер верхнего уровня).
- Повышенный иммунитет к быстрым переходным процессам:** драйвер затвора должен обладать устойчивостью к скоростям изменения сигнала свыше 50 кВ/нс. Если это требование не выполняется, нужно снизить скорость переключения с соответствующим проигрышем в эффективности преобразования.
- Бутстрепный источник питания:** некоторые драйверы MOSFET используют бутстрепную схему для питания каскада управления ключом верхнего

<sup>1</sup>Efficient Power Conversion

уровня. Как показано далее, только такие устройства подходят для управления приборами GaN. Драйверы с LDO-стабилизатором после бутстрепного диода являются наилучшим решением.

**5. Формирование «мертвого времени» малой длительности:** отличные динамические характеристики GaN обеспечивают возможность работы в диапазоне МГц при сохранении высокой эффективности преобразования. Благодаря этому целесообразно снизить длительность «мертвого времени» до 10 нс. Некоторые контроллеры, разработанные для управления MOSFET, не способны формировать столь малое значение  $Tdt$ , что сводит на нет преимущества приборов на основе нитрида галлия. При выборе контроллера для использования в системах с GaN следует отдавать предпочтение тем устройствам, которые способны формировать  $Tdt$  в наносекундном диапазоне.

### Адаптация драйвера Si MOSFET для управления GaN FET

После выбора подходящего драйвера MOSFET необходимо выполнить следующие шаги для обеспечения максимальной совместимости с GaN-приборами. Подробные сведения с соответствующими пояснениями приведены на рис. 1. В дополнение к этому следует выполнять общие рекомендации по применению GaN FET [1].

**1. Бутстрепный диод.** В качестве бутстрепного диода используйте диод Шоттки с минимальными габаритами, емкостью и номинальным током, например BAT54KFiLM [2], последовательно с ним следует установить токоограничивающий резистор, как показано на рис. 1a. Диод Шоттки обеспечивает минимальные потери ( $V_{boot}-V_{sw}$ ), поддерживая питание драйвера вблизи 5 В. Небольшой последовательный резистор ограничивает ток диода при срабатывании любой из защитных цепей. Нужно учесть, что этот резистор влияет на минимальную длительность импульса, необходимую для подзарядки бутстрепного конденсатора.

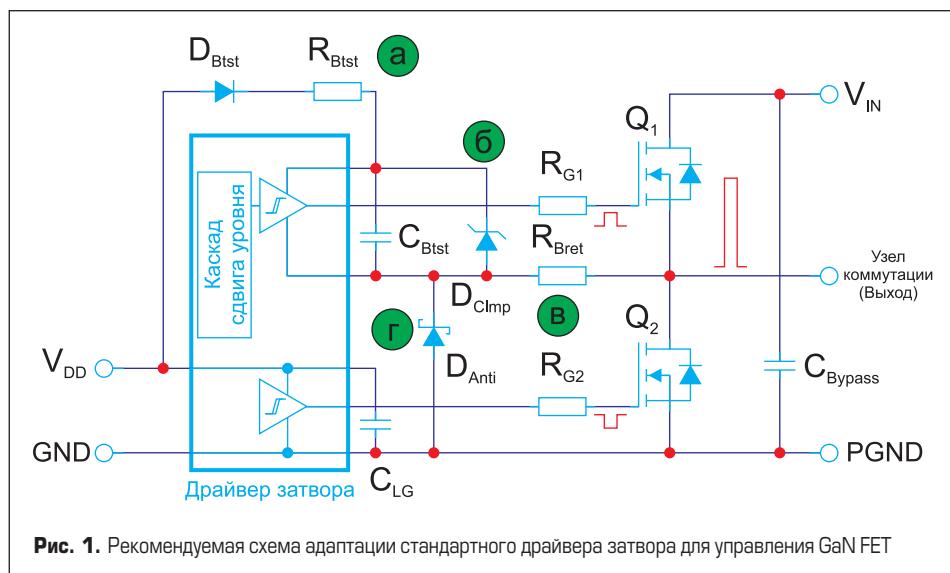


Рис. 1. Рекомендуемая схема адаптации стандартного драйвера затвора для управления GaN FET

Драйверам со встроенным 5-В LDO-стабилизатором последовательный резистор не требуется, так же как и дополнительные цепи защиты, соответственно, данные рекомендации становятся необязательными.

**2. Бутстрепный ограничитель напряжения.** Стабилитрон, параллельный бутстрепному конденсатору, используется для ограничения напряжения на уровне 6 В, чтобы предотвратить перенапряжение в течение «мертвого времени», когда ключ нижнего уровня находится в состоянии обратной проводимости. Хороший пример — стабилитрон MM5Z5V6ST1G [3] с напряжением 5,6 В (рис. 1б). Бутстрепный конденсатор и стабилитрон должны располагаться как можно ближе друг к другу и драйверу затвора.

**3. Резистор затвора.** Дополнительный «обратный» резистор затвора  $R_{Bret}$  (рис. 1в) в верхнем плече защищает IC от всплеска отрицательного переходного напряжения, генерируемого во время обратной проводимости GaN FET нижнего плеча, как показано на рис. 2. Величина сопротивления зависит от времени выключения и временных режимов работы схемы управления затвором транзистора верхнего плеча. Использование этого резистора

требует эквивалентного уменьшения номинала сопротивления  $R_{G,out}$ .

**4. Ограничение напряжения в режиме обратной проводимости.** Антипараллельный диод Шоттки в нижнем плече полумоста (рис. 1г) ограничивает амплитуду отрицательного переходного напряжения, воздействующего на драйвер. Некоторые устройства управления затворами могут даже выйти из строя, когда сигнал в узле коммутации опускается ниже определенного значения [4]. Номинальное напряжение диода должно соответствовать характеристикам GaN FET нижнего плеча. Номинальный ток может быть значительно ниже, чем у транзистора, поскольку диод находится в состоянии проводимости только в «мертвое время», а значит, его следует выбирать по импульльному току.

### Использование IC-контроллеров с встроенным драйвером затвора

Большинство специализированных IC-контроллеров объединяет множество функциональных блоков, включая драйвер затвора [5–7]. Однако не все они имеют подходящую компоновку для подключения

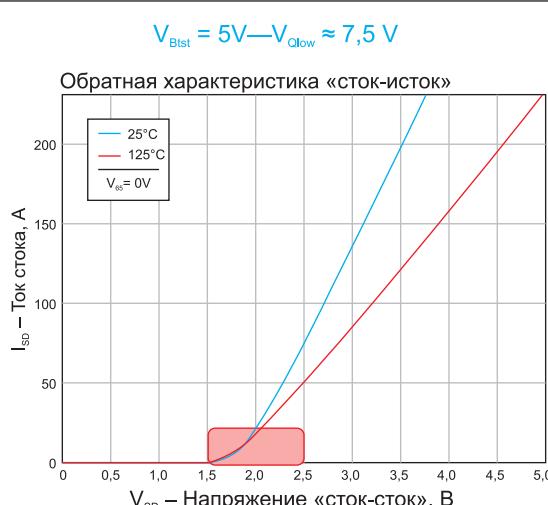
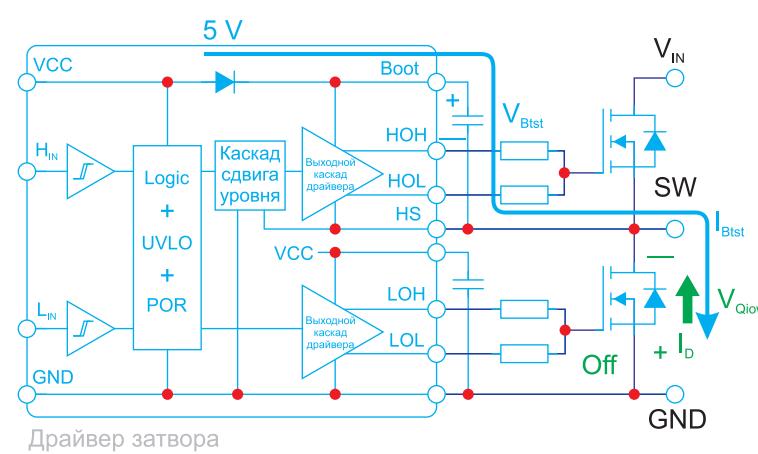
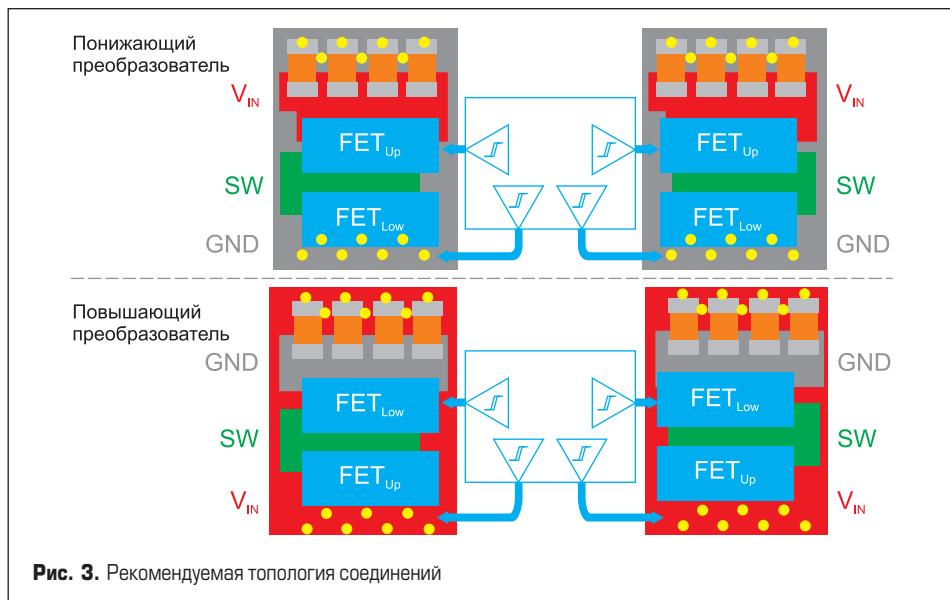


Рис. 2. Цепь бутстрепной зарядки в течение «мертвого времени»





к GaN-приборам, поэтому необходим поиск конструктивных компромиссов, обеспечивающих наилучшую производительность.

При проектировании силового каскада с использованием GaN FET важно следовать общим рекомендациям по проектированию, приведенным в [8]. В первую очередь нужно проанализировать индуктивность общего истока (CSI), за которой следует силовой контур, а затем индуктивность цепи затвора [9]. Для этого силовой каскад представляется в виде отдельных блоков, к которым подключены сигналы управления затворами, формируемые контроллером, как показано на рис. 3. Варианты рекомендуемой компоновки силового каскада приведены в [10], это упрощает оптимизацию системы с учетом применяемого IC-контроллера.

При использовании двухфазных контроллеров нужно сделать выбор между двумя альтернативными топологиями. Приоритетной задачей является управление силовым FET-транзистором, обычно работающим в режиме жесткой коммутации, далее рассматривается синхронный выпрямитель. Например, топология понижающего преобразователя оптимизируется для минимизации паразитной индуктивности в контуре затвора FET верхнего плеча. То же самое справедливо для ключа

нижнего плеча в повышающем конвертере, как показано на рис. 3.

### Заключение

В статье представлен метод адаптации стандартных драйверов затворов Si MOSFET для управления транзисторами GaN FET. Для использования всего потенциала технологии нитрида галлия необходимо обеспечить совместимость этих приборов с помощью приведенных выше указаний и оптимизировать топологию соединений. Тщательное соблюдение предложенных рекомендаций позволяет применять стандартные драйверы и контроллеры для массового производства силовых преобразователей на базе GaN.

### Литература

1. Lidow A., De Rooij M., Strydom J., Reusch D., Glaser J., GaN Transistors for Efficient Power Conversion, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2019.
2. ST. BAT54 datasheet. Small signal Schottky diodes. June 2016. [www.st.com/en/diodes-and-rectifiers/bat54.html](http://www.st.com/en/diodes-and-rectifiers/bat54.html)
3. ON Semiconductor. MM5ZxxST1G Series, SZMM5ZxxST1G Series datasheet. Zener

Voltage Regulators. Aug 2020. [www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/mm5z2v4st1-d.pdf](http://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/mm5z2v4st1-d.pdf)

4. Texas Instruments. UCC2721A-Q1 datasheet. UCC2721A-Q1 Automotive 120-V Boot, 4-A Peak, High-Frequency High-Side and Low-Side Driver. July 2017. [www.ti.com/product/UCC2721A-Q1?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=app-null-null-44700045336317395\\_prodfolderdynamic-cpc-pf-google-wwe\\_int&utm\\_content=prodfolddynamic&ds\\_k=DYNAMIC+SEARCH+ADS&DCM=yes&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiA7t6sBhAiEiwAsaieYjQwUuBBdK-i5YWaqftAoyOXeZnm597NikmN9irUEd1Dz5i3EH9NPr0Cp\\_IQAVd\\_BwE&gclsrc=aw.ds](http://www.ti.com/product/UCC2721A-Q1?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=app-null-null-44700045336317395_prodfolderdynamic-cpc-pf-google-wwe_int&utm_content=prodfolddynamic&ds_k=DYNAMIC+SEARCH+ADS&DCM=yes&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA7t6sBhAiEiwAsaieYjQwUuBBdK-i5YWaqftAoyOXeZnm597NikmN9irUEd1Dz5i3EH9NPr0Cp_IQAVd_BwE&gclsrc=aw.ds)

5. Renesas. ISL81806 datasheet. 80V Dual Synchronous Buck Controller Optimized to Drive E-mode GaN FET. Jan 2022. [www.renesas.com/us/en/products/power-power-management/dc-dc-converters/step-down-buck/buck-controllers-external-fets/isl81806-80v-dual-synchronous-buck-controller-optimized-drive-e-mode-gan-fet](http://www.renesas.com/us/en/products/power-power-management/dc-dc-converters/step-down-buck/buck-controllers-external-fets/isl81806-80v-dual-synchronous-buck-controller-optimized-drive-e-mode-gan-fet)

6. Analog Devices. LTC7891 datasheet. 100 V, Low IQ, Synchronous Step-Down Controller for GaN FETs. May 2022. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7891.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7891.pdf)

7. Analog Devices. LTC7890 datasheet. Low IQ, Dual, 2-Phase Synchronous Step-Down Controller for GaN FETs. April 2023. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7890.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7890.pdf)

8. Efficient Power Conversion. How2AppNote 007. How to Design an eGaN FET-Based Power Stage with an Optimal Layout datasheet. 2021. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7890.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7890.pdf)

9. Reusch D., Strydom J. Understanding the effect of PCB layout on circuit performance in a high frequency gallium nitride based point of load converter. Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, 16–21 March 2013.

10. Glaser J. S., Helou A. PCB Layout for Chip-Scale Package GaN FETs Optimizes Both Electrical and Thermal Performance. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 20–24 March 2022.

## IGBT-модуль 1200 В 450 А от AMG Power

Номенклатура IGBT-модулей компании AMG Power пополнилась устройством AMG450G1200MED, рассчитанным на 1200 В 450 А и выполненным в корпусе типа Econodual.

Параметры и преимущества модуля IGBT AMG450G1200MED:

- напряжение  $U_{CE}$ : 1200 В;
- ток  $I_C$ : 450 А;
- конфигурация: полумост;
- корпус: Econodual;
- низкое напряжение насыщения коллектор-эмиттер  $U_{CE(sat)}$  = 1,5 В (при +25 °C);
- затвор IGBT-чипа по технологии МРТ (micro-pattern trench);
- низкие потери при переключении;
- надежность RBSOA;
- низкие потери при обратном восстановлении;
- низкое значение индуктивности  $L_{SC}$  = 20 нГн.

Применение AMG450G1200MED:

- управление приводами;
- инверторы солнечных панелей;
- преобразователи высокой мощности;
- ИБП.



<https://macrogroup.ru>

# Интеллектуальные цифровые драйверы

сокращают время проектирования  
и раскрывают потенциал карбида кремния

**Карбидокремниевые (SiC) силовые ключи все шире используются в высоковольтных мощных системах, таких как тяговые приводы, распределенные энергетические системы (DER), бортовые зарядные устройства (OBC), медицинские приборы и многое другое. SiC-приборы превосходят своих кремниевых предшественников по ключевым характеристикам, начиная от более высоких рабочих температур, блокирующего напряжения и скорости переключения и заканчивая низким сопротивлением канала  $R_{DS(on)}$ , улучшенными тепловыми характеристиками и надежностью.**

**Прадип Кулкарни  
(Pradeep Kulkarni)<sup>1</sup>**

**Перевод: Иван Сергеев**

**В** сравнении с кремниевыми (Si) приборами устройства на основе SiC имеют значительные преимущества и потому играют первостепенную роль в таких направлениях, как электрификация транспорта, расширение инфраструктуры зарядных станций электромобилей и модернизация электросетей.

Технология карбида кремния уже широко применяется в низко- (LV) и средневольтовых (MV) системах в электромобилях, промышленности, возобновляемых источниках энергии и других приложениях. Чтобы в полной мере реализовать ее преимущества, инженерам приходится бороться с нежелательными побочными эффектами, связанными с более высокой скоростью переключения. Традиционные драйверы затворов неспособны решить все проблемы, связанные с SiC, поскольку они создавались для работы с гораздо менее быстрыми IGBT-ключами.

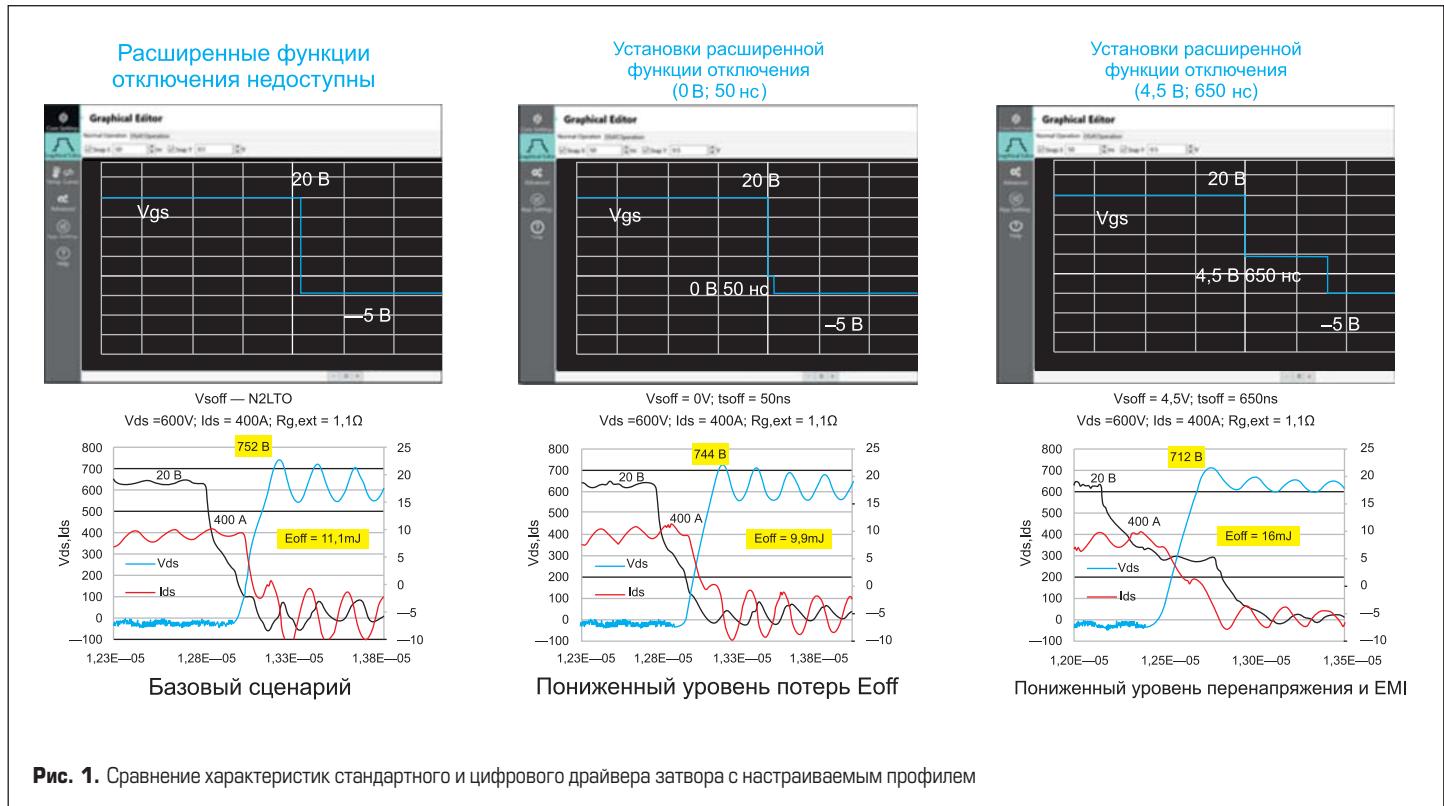
Разработчики преобразователей на базе SiC, стремящиеся сократить сроки проектирования, повысить гибкость и улучшить конструктивные показатели систем, обращаются к интеллектуальным настраиваемым цифровым драйверам затворов, которые позволяют оптимизировать динамические характеристики за счет отладки алгоритмов управления вместо подбора элементов на адаптерных платах.

## Устранение вторичных эффектов SiC

Использование технологии карбида кремния соотвествует решению новых проблем в области эффективного и безопасного управления силовыми ключами. Поскольку SiC-приборы переключаются намного быстрее, чем Si, резкое увеличение крутизны фронтов напряжения и тока создает вторичные эффекты, выражющиеся в повышении уровня шумов и электромагнитных помех (EMI), появлении звона на фронтах, увеличении пиковых перенапряжений и дополнительного перегрева чипов. Если на этапе проектирования не будут приняты специальные меры для решения этих проблем, то они могут привести к снижению производительности или даже отказу системы.

Разработчикам систем на основе Si IGBT, как правило, не приходилось тратить много времени на устранение подобных вторичных эффектов — большинство задач решалось с помощью традиционных драйверов затворов. Однако их использование для управления SiC-приборами оказывается неэффективным, поскольку они не обеспечивают достаточно быстрого отклика при отказах. Кроме того, стандартные устройства управления затворами довольно сложно модифицировать таким образом, чтобы они обеспечивали адекватный контроль карбидокремниевых приборов.

<sup>1</sup>Microchip Technology.



Решить описанные задачи способны цифровые драйверы, также обеспечивающие надежную защиту от короткого замыкания. Ключевая особенность этих устройств — возможность программной настройки, учитывающей характеристики конкретного прибора. Такой подход позволяет в цифровом виде оптимизировать характеристики переключения силовых модулей, обеспечивающие максимальную эффективность в зависимости от режимов работы, в том числе мощность, частоту коммутации и профиль нагрузки.

### Технология расширенной настройки коммутации

Основное преимущество современных цифровых драйверов — возможность программной настройки режимов включения и выключения. Это позволяет снизить уровень динамических потерь на 50% и пик перенапряжения  $V_{DS}$  на 80%.

Технология расширенной настройки коммутации (Augmented Switching technology) для контроля SiC-приборов позволяет создать профиль управления, охватывающий несколько временных этапов в процессе переключения затвора. Пользователь может легко и быстро модифицировать этот профиль для конкретных режимов работы с помощью программного обеспечения, не меняя аппаратную часть. Данная технология обеспечивает независимую реакцию на режим КЗ, а также надежный мониторинг/детектирование аварийных режимов.

На рис. 1 показано, как работает драйвер затвора с возможностью настраиваемого отключения. Вверху каждой части рисунка представ-

лен графический редактор интеллектуальной настройки ICT (Intelligent Configurable Tool), внизу — результирующие сигналы отключения. Слева показан обычный режим коммутации с отключенной опцией расширенной настройки. В средней части рисунка использован первый вариант настройки расширенного отключения, а справа — второй вариант. Режимы измерения во всех случаях одинаковые:  $V_{DS} = 600$  В,  $I_{DS} = 400$  А,  $R_G = 1,1$  Ом.

В правой части рис. 1 видно, что пик перенапряжения снизился до 712 В (752 В при базовом сценарии), уменьшился и звон на эпюрах напряжения и тока. Это достигнуто за счет ступенчатого профиля управления: при начальном напряжении 20 В производится переход к настраиваемому промежуточному уровню 4,5 В, который удерживается в течение 650 нс, затем идет понижение до -5 В. Соответствующее увеличение энергии отключения (до 16 мДж) компенсируется уменьшением коммутационного всплеска Vovershoot и звона (EMI).

В дополнение к настройке профиля управления современные драйверы осуществляют более широкий мониторинг неисправностей и быстрое реагирование на состояние КЗ. В результате пользователи получают дополнительные уровни контроля и защиты для обеспечения безопасной и безотказной работы изделия.

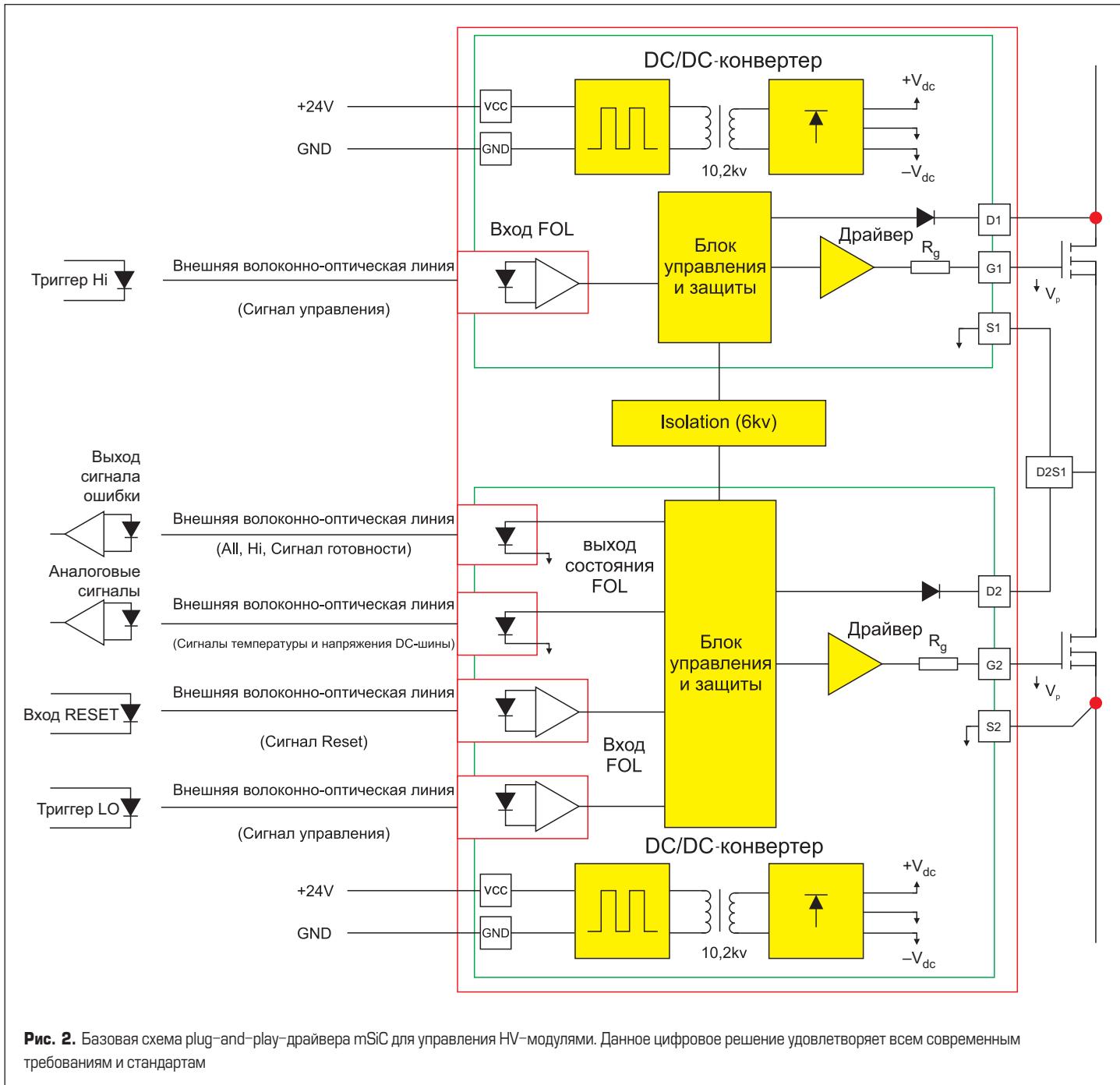
Специалистам, проектирующим преобразователи на основе SiC MOSFET и рассматривающим возможности интеллектуальных цифровых драйверов, приходится делать выбор: создавать устройство управления самостоятельно или использовать готовые решения plug-and-play. В этой части существует множество вариантов для рассмотрения.

### Конструктивные соображения при выборе драйвера: собственное решение или plug-and-play

Ряд пользователей предпочитает создавать собственные устройства управления затворами SiC MOSFET с программно настраиваемым напряжением на затворе ( $\pm V_{GS}$ ). Для этого используются цифровые «ядра», подключаемые к силовым модулям с помощью адаптерных плат. Кроме того, доступны функционально законченные наборы для разработки подобных систем.

Однако не все разработчики обладают навыками проектирования, необходимыми для создания собственных драйверов, тогда как для быстрого вывода на рынок предпочтительнее использовать готовые проверенные решения. В этих случаях оптимальна концепция plug-and-play, примером которой является плата управления mSiC от Microchip, доступная с предварительно настроенными параметрами. Это решение поддерживается оценочными наборами и ПО ICT, которые позволяют оптимизировать режимы управления в соответствии с конкретными приложениями, будь то большегрузные автомобили, силовые приводы, зарядные устройства, системы хранения энергии и инверторы для индукционного нагрева.

Например, стандартный конструктив LinPak используется большим количеством производителей силовых модулей. Он применяется для производства низковольтных (LV) модулей Linpack и новейшей высоковольтной (HV) версии изолированных SiC MOSFET. Успех варианта LV обусловлен малой паразитной индуктивностью, высокой пригодностью для параллельного сое-



**Рис. 2.** Базовая схема plug-and-play-драйвера mSiC для управления HV-модулями. Данное цифровое решение удовлетворяет всем современным требованиям и стандартам

динения и большой плотностью мощности. Одно из преимуществ полумостового HV-модуля — расположение силовых терминалов по сторонам корпуса, что позволяет разместить плату управления в середине корпуса и минимизировать коммутационную индуктивность DC-шины.

Для управления LV- и HV-ключами устройства plug-and-play сконфигурированы с учетом особенностей таких систем, как ж/д тяговые приводы, зарядные станции, интеллектуальные сети, ИБП, а также промышленные электроприводы и приводы большегрузного транспорта. Примером служат цифровые драйверы с настраиваемым профилем коммутации, оптимизированные для контроля аварийных режимов и управления SiC MOSFET HV LinPak модулями с напряжением 3,3 кВ. Они имеют напряжение изоляции 10,2 кВ, настраиваемый профиль

включения/выключения, обеспечивают изолированный мониторинг температуры и напряжения DC-шины.

На рис. 2 показана схема интеллектуального драйвера, соответствующего основным ж/д стандартам, включая EN50155 (надежность в жестких условиях эксплуатации), EN50121-3-2 и EN61000-6-4 (EMC), EN 61373 (ударо-прочность и виброустойчивость), а также EN 45545-2 (пожарная безопасность, уровень 2).

### От электрификации к модернизации электросетей

Широкозонная SiC-технология играет все более важную роль в силовой электронике и вскоре она будет решать и такие важные задачи, как повышение эффективности работы электросетей путем обеспечения «уни-направленного» потока энергии для упроще-

ния ее распределения от источника до обработки и использования.

Решение современных проблем силовой электроники упрощается при использовании концепции программно-настраиваемых устройств управления затворами. Такой подход снижает потери при переключении и уровень EMI, одновременно повышая плотность мощности. Он позволяет выйти за рамки возможностей стандартных аналоговых драйверов изолированных затворов и смягчить побочные эффекты SiC-технологии. Разработчикам сейчас доступно множество вариантов таких решений — от цифровых «ядер» с платами адаптеров, до устройств plug-and-play, предварительно сконфигурированных для наиболее распространенных силовых ключей.

По материалам сайта [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

# Новые серийные датчики тока и напряжения

## от российского производителя

**Публикация предназначена как для специалистов, уже давно применяющих датчики измерения тока и напряжения российского производства, так и для потребителей, впервые использующих датчики производства НПО «Горизонт Плюс». В статье описан внешний вид и приведены особенности новых, впервые разработанных датчиков. С широкой номенклатурой других датчиков, выпускаемых НПО «Горизонт Плюс», можно ознакомиться по ссылкам, указанным в статье.**

**Олег Болотин**

**Николай Гребенщиков**

**Григорий Портной, к. т. н.**

**Константин Разумовский**

**Олег Яценко**

sensor@gorizont-plus.ru

**В** работах [1, 2] подробно описаны конструкция и принцип действия бесконтактных преобразователей (датчиков) измерения тока и выполненных на их основе датчиков напряжения и активной мощности. Все указанные приборы уже много лет разрабатывает и производит фирма НПО «Горизонт Плюс» в городе Истра Московской области. Созданные датчики стали достойной альтернативой для замены токовых шунтов, трансформаторов тока и т. д. Относительно малые габариты, способность бесконтактно, без разрыва токовой цепи, измерять любой вид тока, наличие гальванической развязки и хорошее соотношение цены и качества обеспечили этим приборам широкий рынок сбыта. Важным фактором также является высокая надежность датчиков, подтвержденная многолетней эксплуатацией их на различных предприятиях и в разных условиях работы. Многолетним потребителем датчиков из Истры является также фирма WONTECH Co LTD из Южной

Кореи, которая использует их в своей медицинской аппаратуре. Датчики НПО «Горизонт Плюс» внесены в Госреестр СИ РФ и соответствующие Реестры республик Казахстан и Беларусь.

Ниже представлена краткая информация и описаны новые приборы из серии преобразователей измерительных силы тока и напряжения, которые недавно появились в линейке датчиков и сегодня представлены на производство.

### Преобразователь для измерения малых токов

Под малыми токами здесь понимается диапазон токов от нуля и до 150–300 А. В линейке датчиков тока НПО «Горизонт Плюс» уже имеются приборы, измеряющие такие токи, например ПИТ-150-УА-П10 или ПИТ-300-УА-Б14 [1]. Первый из них предназначен для монтажа на печатную пла-

**Таблица.** Основные технические характеристики новых преобразователей НПО «Горизонт Плюс»

№	Наименование прибора	Диапазон измеряемых токов, А (напряжений, В)	Приведенная погрешность, %	Выходной сигнал, мА	Максимальное сопротивление нагрузки, Ом	Величина тока по цепи питания, мА	Размер отверстий под токовую шину, мм	Частота преобразуемой силы тока, кГц	Напряжение питания, В	Электрическая прочность, кВ	Сопротивление изоляции в рабочих условиях, МОм	Габаритные размеры, мм
1	ПИТ-***-УА-Б20	400	1	10	600	25	20	100	14,25–15,75	6	5	44×44×34
2	ПИТ-***-УА-Б60	4000	0,7	$I_{\text{ном}}/5000$		40	60	50	18–24,5			144×170×65
3	ПИТ-***-УА-Б42x162	5 000	1,3	10В	10	10	162×42	50	14,25–15,75	15	5	250×169×49
4	ПИН-***-УА-Б1-М	(3000)	0,5	50	Величина сопротивления нагрузки токова, чтобы падение напряжения на ней было не более $6 V_{\text{эфф}}$ .	70	—	60	14,25–25,2	9	20	166×79×63
5	ПИН-***-УА-Б1-Р-М	(3000)	0,5	50		70	—	60	14,25–25,2	9	20	166×79×40
6	ПИН-***-УА-Б-М	(6000)	0,5	50		70	—	60	14,25–25,2	13	20	208×107×95
7	ПИН-***-УА-Б-Р-М	(6000)	0,5	50		70	—	60	14,25–25,2	13	20	208×107×64

ту, и поскольку измеряемые токи невелики, диаметр отверстия под токовый проводник составляет 10 мм. В конструкции второго этого диаметр увеличен до 14 мм, а сам прибор можно монтировать в блок с помощью DIN-рейки. Но в любом случае монтаж этих датчиков осуществляется путем крепления корпуса прибора к какой-либо поверхности.

Новый датчик, ПИТ-\*\*\*-УА-Б20, разработанный специалистами НПО «Горизонт Плюс», расширяет функциональные возможности этого класса приборов. При относительно малых размерах 44×44×34 мм диапазон измеряемых токов у него расширен до 400 А, увеличен также до 20 мм диаметр окна под токовую шину. Последнее дает возможность использовать токовый провод с наконечником. Другая особенность этого типа датчика — его конструкция (рис. 1), позволяющая крепить датчик непосредственно на токовуюшине, что зачастую очень удобно при плотном монтаже в шкафу или в переносном блоке. Основные технические характеристики прибора приведены в таблице.



**Рис. 1.** Внешний вид преобразователя ПИТ-\*\*\*-УА-Б20, который можно монтировать непосредственно на токовую шину

### Преобразователи для больших токов

Другой преобразователь, ПИТ-\*\*\*-УА-Б60 (рис. 2), дополнил линейку ранее разработанных датчиков тока, у которых диаметр отверстия под токовую шину составлял 30 и 40 мм. В новом приборе этот размер достигает уже 60 мм, а диапазон измеряемых токов увеличен до 4000 А. По требованию заказчиков количество витков компенсационной обмотки (коэффициент преобразования) может меняться и составлять 3000, 4000 или 5000 витков, что напрямую влияет на выходной сигнал прибора. Также для надежности и удобства потребителей в преобразователе заменены пластмассовые разъемы выводов на резьбовые шпильки. Последнее позволяет использовать датчик в транспортных и других подвижных системах, которые характеризуются повышенным уровнем вибрации, ударов и других механиче-

ских воздействий. Существенным также является повышение требований по электрической прочности до 6 кВ и снижение величины приведенной погрешности до 0,7% (табл.).



**Рис. 2.** Преобразователь ПИТ-\*\*\*-УА-Б60 с диаметром отверстия под токовую шину 60 мм и диапазоном измеряемых токов до 4000 А

Часто пользователям таких больших датчиков для измерения тока приходится иметь дело не с кабелем, а с плоской токовой шиной или даже пакетом медных шин. Для таких случаев разработана конструкция нового преобразователя ПИТ-\*\*\*-УН-Б42x162 (рис. 3). В этом датчике увеличены габаритные размеры, а круглое отверстие под кабель заменено прямоугольным окном с размерами под шину 42×162 мм. В качестве выводных клемм используются резьбовые шпильки, выведенные на внешнюю панель прибора.



**Рис. 3.** Внешний вид прибора ПИТ-\*\*\*-УН-Б42x162 для измерения больших, до 5000 А, токов и возможностью использования больших пакетов шин

Из таблицы видно, насколько у такого датчика увеличились габаритные размеры и масса, но все это компенсируется возможностью измерения таким прибором больших токов. У датчика несколько диапазонов измерений: на 3000, 4000, 5000 А, при этом обеспечена гальваническая развязка цепей входа и выхо-

да. Дополнительным преимуществом является малая, не более 10 мА, величина тока по цепи питания и увеличенное до 15 кВ значение электрической прочности изоляции прибора.

### Современные преобразователи напряжения измерительные

В работе [2] показано, что преобразователи напряжения наследуют все преимущества датчиков измерения тока: они служат для измерения напряжения постоянного и переменного тока, в датчиках сохраняется гальваническая развязка цепей входа и выхода, высокое значение пробивного напряжения при относительно малых габаритных размерах, простота использования и высокая надежность работы.

Далее в качестве примера представлены внешний вид и основные технические характеристики новых приборов, которые, тем не менее, являются типичными представителями ранее разработанной серии датчиков напряжения ПИН.

Типовой преобразователь ПИН-\*\*\*-УА преобразует мгновенные значения измеряемого напряжения постоянного и переменного тока в пропорциональные значения силы постоянного и переменного тока. А ПИН-\*\*\*-У-4/20 преобразует среднеквадратичное значение напряжения в пропорциональное значение силы постоянного тока, соответствующее требованиям к стандартному интерфейсу «токовая петля 4–20 мА», где \*\*\* — указывается номинальное значение напряжения преобразователя в вольтах.

На рис. 4 представлен внешний вид такого преобразователя ПИН в случае, когда нагрузочный резистор находится снаружи прибора (а) или внутри него (б). Хорошо видно, что в последнем случае конструкция прибора до-



**Рис. 4.** Общий вид преобразователя ПИН-\*\*\*-УА-Б1-Р-М с внешним резистором (а) и ПИН-\*\*\*-УА-Б1-М с резистором внутри прибора (б)

полнена специальным радиатором, позволяющим отводить излишнее тепло и поддерживать рабочий тепловой режим. По условиям эксплуатации преобразователь ПИН-3000-УА-Б1-Р-М (Б1-М) соответствует требованиям к группе 3 по ГОСТ 22261-94 с расширенным температурным диапазоном  $-40\dots+70^{\circ}\text{C}$  и влажностью до 90% при  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Питание датчика производится от внешних источников напряжением, указанным в таблице, с пульсациями не более 10 мВ. По согласованию с разработчиком допускается питание от однополярного источника. Погрешность прибора в указанных условиях эксплуатации не превышает 1,5%.

Все сказанное относится и к преобразователю ПИН-6000-УА-Б-Р-М (Б-М) (рис. 5). Необходимо только дополнительно подчеркнуть, что этот прибор имеет пять диапазонов и способен измерять напряжение до 6000 В включительно. Также значительным преимуществом прибора является величина



**Рис. 5.** Преобразователь напряжений до 6000 В, обеспечивающий электрическую прочность 13 кВ

электрической прочности изоляции, которая составляет не менее 13 кВ. Эти достоинства позволили использовать преобразователи напряжения в частотных преобразователях

электроприводов, в том числе для тяговых двигателей электропоездов и другой аналогичной техники.

Сегодня специалисты НПО «Горизонт Плюс» разрабатывают новые модели преобразователей измерения тока, напряжения и датчиков активной мощности, совершенствуют технологию изготовления этих приборов и дорабатывают модели датчиков в соответствии с требованиями заказчиков для замены зарубежных аналогов.

## Литература

- Болотин О., Портной Г. и др. Применение датчиков измерения тока и напряжения для решения инженерных задач // Компоненты и технологии. 2016. № 1.
- Болотин О., Гребенников Н., Портной Г. и др. Российские преобразователи напряжения ПИН в Госреестре СИ РФ // Силовая электроника. 2023. № 2.

## Серия DC/DC-преобразователей мощностью 15 и 20 Вт со сверхшироким входным диапазоном 12:1 от Traco Power

Компания Traco Power выпустила серию высокопроизводительных преобразователей постоянного тока мощностью 15 и 20 Вт со сверхшироким 12:1 входным диапазоном 9–75 В и 14–160 В постоянного напряжения — THN 15UIR и THN 20UIR.

Обе серии изготавливаются в компактном, полностью герметичном корпусе размером 1x1" для обеспечения высочайшей надежности. Имеют несколько вариантов выходного напряжения: 5, 12, 15, 24,  $\pm 12$ ,  $\pm 15$  В. Серии THN 15UIR и THN 20UIR имеют возможность подключения конденсатора задержки, что позволяет избавиться от необходимости использовать массивные конденсаторы на входе.

Сертифицированы по стандарту EN 50155 для железнодорожного применения. Дополнительные

сертификаты EN 61373 для защиты от механических ударов и вибрации, EN 45545-2 для пожароопасности и IEC/EN/UL 62368-1 для информационных систем и промышленного применения. Основные параметры DC/DC-преобразователей серий THN 15UIR и THN 20UIR:

- компактный полностью герметичный корпус размером 1x1";
- сверхширокий диапазон входного напряжения 12:1: 9–75, 14–160 В постоянного тока;
- рабочая температура:  $-40\dots+70^{\circ}\text{C}$ ;
- сертифицированы по стандартам: EN 50155, EN 45545-2 и EN 61373;
- изоляция: 3000 В переменного тока между входом и выходом;
- функция дистанционного включения;



- защита от короткого замыкания (SCP), перенапряжения (OVP) и перегрева (OTP);
- гарантия: 3 года.

<https://macrogroup.ru/>

## Микроконтроллеры Arm Cortex-M0+ для электропривода от Geehy

Компания Geehy объявила о выпуске серии микроконтроллеров, ориентированных на применение в устройствах электропривода, — APM32F035.

Построенные на ядре Arm Cortex-M0+, 32-разрядные APM32F035 действуют на частоте 72 МГц и имеют интегрированный векторный вычислитель, который позволяет эффективно обрабатывать алгоритмы управления электроприводом. Также наряду с 12-разрядным АЦП, коммуникационными протоколами SPI, UART, I<sup>2</sup>C и CAN в данных устройствах предусмотрены два программируемых аналоговых компаратора (COMP), четыре операционных усилителя общего назначения (OP-Amp) и один температурный датчик. Микроконтроллеры доступны в корпусах LQFP48 и LQFP32.

APM32F035 рассчитаны на работу в температурном диапазоне  $-40\dots+105^{\circ}\text{C}$  и при напряжениях 2–3,6 В, поддерживают режимы перезагрузки при поданном и отключенном питании, спящий режим, режим ожидания и аварийного отключения, что позволяет обеспечить гибкое и сбалансированное энергопотребление. Данные контроллеры имеют функцию приема инфракрасного сигнала для осуществления удаленного управления, оснащены часами реального времени, 16-разрядным таймером с расширенными возможностями, двумя 16-разрядными базовыми таймерами, 32-разрядным таймером общего назначения, двумя сторожевыми таймерами и 24-разрядным SysTick.

В качестве отладочных средств компания предлагает тестовые платы в двух исполнениях — для низкого и высокого напряжения.

Тестовая плата для Motor-Dedicated APM32F035 (низкое напряжение):

- напряжение по постоянному току на входе: 12–27 В;
- максимальное энергопотребление: 100 Вт;
- поддерживаемые приводы: BLDC, PMSM;
- поддерживаемые датчики: Холла, фотоэлектрический, магнитного поля;
- интерфейсы: SCI, SPI, I<sup>2</sup>C, CAN;
- возможность использования одиночных/сдвоенных измерительных резисторов;
- измерение трехфазной обратной ЭДС.

Тестовая плата для Motor-Dedicated APM32F035 (высокое напряжение):

- напряжение по переменному току на входе: 85–265 В;
- максимальное энергопотребление: 300 Вт;
- поддерживаемые приводы: BLDC, PMSM;
- поддерживаемые датчики: Холла, фотоэлектрический, магнитного поля;
- интерфейсы: Isolated USB, UART;
- возможность использования одиночных/сдвоенных измерительных резисторов;
- измерение трехфазной обратной ЭДС.

<https://macrogroup.ru/>

# Высокочастотная динамика преобразователей постоянного тока, работающих в режиме прерывистой проводимости

**В статье на примере повышающе-понижающего преобразователя (конвертера), работающего в режиме прерывистого тока по переменному малосигнальному анализу, построена усредненная модель преобразователя, позволяющая предсказать высокочастотную динамику, вызванную индуктором, и оценить частоту высокочастотного полюса в режиме прерывистого тока.**

**Норик Петросян,**  
д. т. н., профессор

v-khotanan@yandex.ru

**Карлен Бегоян,**  
к. т. н., доцент

**Мовсес Мовсисян,**  
к. т. н., доцент

movmowsisyan57@gmail.com

Как обсуждалось в работе [1], передаточные функции преобразователей, работающих в режиме прерывистой проводимости, имеют преобладающий низкочастотный полюс.

Но при подключении дросселя выходного фильтра полюс, а возможно, и ноль передаточной функции системы перемещаются в область высоких частот. Поэтому, чтобы правильно моделировать высокочастотную динамику преобразователей, действующих в режиме прерывистой проводимости (DCM-режим, DCM — Discontinuous conduction mode — прерывистый режим проводимости), необходимо учитывать тот факт, что переменное напряжение на катушке индуктивности в этом режиме не равно нулю [2, 3] (имеется в виду, что длительности рабочих циклов  $d_1 \neq d_2$  не равны, а амплитуды усредненных напряжений выровнены — это погрешность моделирования). Уравнения, которые используются в работе [1] для коммутационной сети (для повышающе-понижающего преобразователя) в прерывистом режиме проводимости, значительно усреднены и упрощены. Несмотря на то, что эта модель дает хорошие результаты на низких частотах, она не может точно предсказать высокочастотную динамику, вызванную индуктором, поскольку подразумевает

что напряжение по переменному току на катушке индуктивности равно нулю [3]. Более точный анализ преобразователей, работающих в DCM-режиме, приведен ниже на примере схемы рис. 1 и с использованием графиков, которые также представлены в работе [1].

Длина временного подынтервала  $d_2$  находится путем усреднения кривой тока индуктора  $i_L(t)$ . На рис. 2 показаны временные диаграммы и длины рабочих циклов  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$  соответственно.

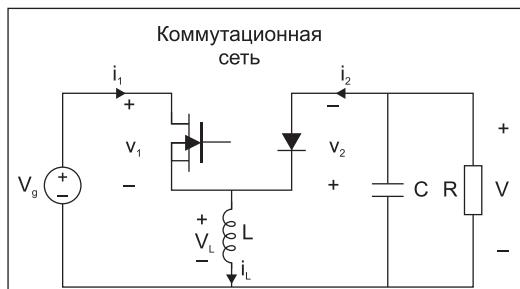
$$\langle i_L(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{2} i_{pk} (d(t) + d_2(t)) = \frac{d(t)(d(t) + d_2(t))T_s}{2L} \langle v_g(t) \rangle_{T_s} \quad (1)$$

Решая относительно  $d_2(t)$ , получим:

$$d_2(t) = \frac{2L \langle i_L(t) \rangle_{T_s}}{d(t) \langle v_g(t) \rangle_{T_s}} - d(t) = \left( \frac{R_e(d) \langle i_L(t) \rangle_{T_s}}{\langle v_g(t) \rangle_{T_s}} - 1 \right) d(t), \quad (2)$$

где  $R_e$  как и в работе [1], определяется:  $R_e = 2L/T_s d^2$ .

Уравнение (2) вместе с уравнением (3), (4), (7) и (10) из работы [1] представляет собой усредненную модель большого сигнала в DCM-режиме, который можно использовать для исследования стационарного поведения, а также для низкочастотной и высокочастотной динамики [3, 4]. Надо отметить, что уравнения моделирования более сложные, чем соотношения (1), (2), и не позволяют описать все напряжения и токи преобразователя в терминах средних сигналов на входе и выходе коммутационной сети (рис. 1).



**Рис. 1.** Пример схемы повышающе-понижающего преобразователя

**Воспользуемся усредненной моделью, чтобы прогнозировать частоту высокочастотного полюса, вызванного динамикой индуктора преобразователя в режиме DCM**

Допустим, схема повышающе-понижающего преобразователя имеет вид, показанный на рис. 1. На рис. 2 изображены временные диаграммы, поясняющие принцип работы в прерывистом режиме.

Среднее значение напряжения на транзисторе  $\langle v_1(t) \rangle_{T_s}$  и среднее значение тока через диод  $\langle i_2(t) \rangle_{T_s}$  выбраны как зависимые переменные в коммутационной цепи. Используя уравнение (3), приведенное в работе [1], а также уравнение (2), получим:

$$\langle v_1(t) \rangle_{T_s} = (1-d(t))\langle v_g(t) \rangle_{T_s} + d(t)\langle v(t) \rangle_{T_s} - \frac{R_e(d)}{\langle v_g(t) \rangle_{T_s}} d(t). \quad (3)$$

Среднее значение напряжения на транзисторе  $\langle v_1(t) \rangle_{T_s}$  в уравнении (3) является нелинейной функцией. Причем это напряжение нелинейно зависит и от среднего тока индуктора и от средних значений входного и выходного напряжения:

$$\langle v_1(t) \rangle_{T_s} = \gamma_1 \left( \langle v_g(t) \rangle_{T_s}, \langle v(t) \rangle_{T_s}, \langle i_L(t) \rangle_{T_s}, d(t) \right). \quad (4)$$

Малосигнальную модель по переменному току можно получить путем разложения уравнения (4) в ряд Тейлора. Малосигнальная переменная составляющая среднего напряжения на ключе  $\hat{v}_1(t)$  может быть найдена как [3]:

$$\hat{v}_1(t) = \hat{v}_g(t)k_g + \hat{v}(t)k_v + \hat{i}_L(t)r_i + \hat{d}(t)f_i, \quad (5)$$

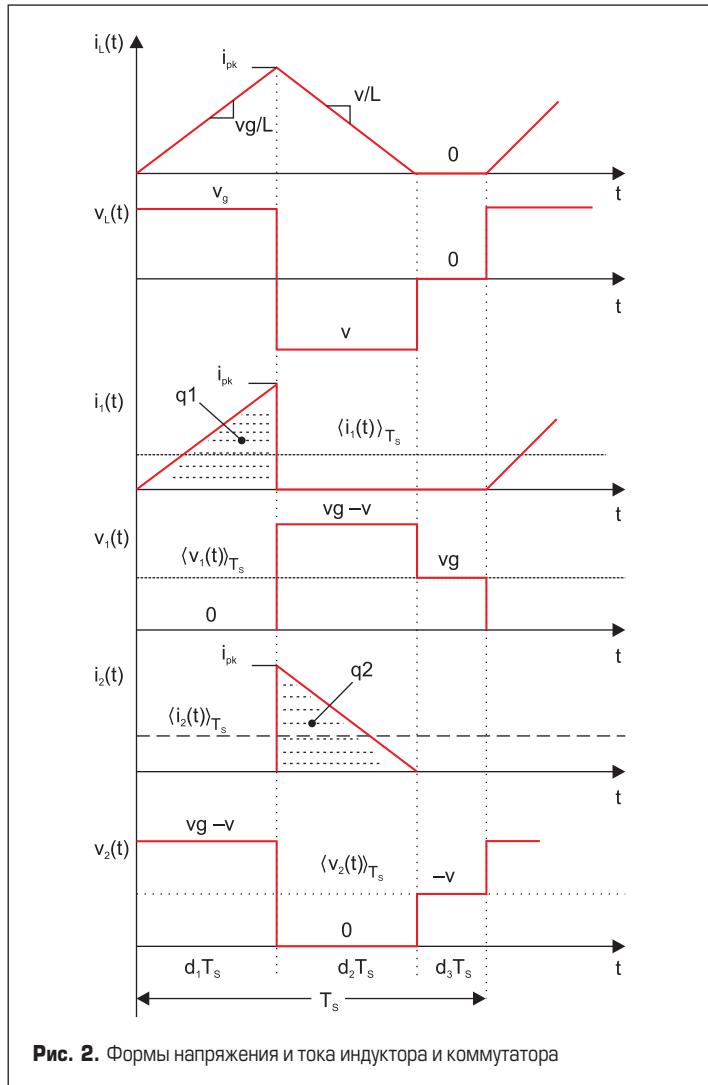


Рис. 2. Формы напряжения и тока индуктора и коммутатора

где параметры модели слабого сигнала  $k_g$ ,  $k_v$ ,  $r_i$  и  $f_i$  вычисляются как частные производные от  $\gamma_1$ , оцененные в рабочей точке покоя.

В частности,

$$r_i = \left. \frac{\partial \gamma_1(V_g, V, i_L, D)}{\partial i_L} \right|_{i_L=i_L} = \frac{-V}{V_g} R_e D. \quad (6)$$

В работе [1] для тока  $\langle i_2(t) \rangle_{T_s}$  получено следующее выражение:

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{2L} d_1(t) d_2(t) T_s \langle v_g(t) \rangle_{T_s}. \quad (7)$$

Заменяя  $d_2(t)$  согласно выражению (2), получим:

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = \langle i_L(t) \rangle_{T_s} - \frac{\langle v_g(t) \rangle_{T_s}}{R_e} = \gamma_2 \left( \langle v_g(t) \rangle_{T_s}, \langle i_L(t) \rangle_{T_s}, d(t) \right). \quad (8)$$

Малосигнальная переменная составляющая среднего тока диода  $\hat{i}_2(t)$  может быть найдена как:

$$\hat{i}_2(t) = v_g(t)g_g + i_L h_2 + d(t)j_2, \quad (9)$$

где малосигнальные параметры  $g_g$ ,  $h_2$  и  $j_2$  определяются как частные производные от  $g_2$ , оцененные в стационарной рабочей точке аналогично выражению (6) [4].

Рабочий цикл  $d(t)$  стремится к стационарному значению  $D$ ,  $f$  добавленная переменная малосигнальная составляющая  $\hat{d}(t)$ ,  $d(t) = D + \hat{d}(t)$ .

На рис. 3 показана малосигнальная модель по переменному току повышающе-понижающего преобразователя, в которой транзистор и диодный ключ заменены источниками, указанными в уравнениях (5) и (9) соответственно.

Для того чтобы найти передаточную функцию управление-выход, необходимо установить  $\hat{v}_g = 0$ . На высоких частотах слабая переменная составляющая напряжения конденсатора очень мала:  $\hat{v} = 0$ . Поэтому вкладом зависимого источника  $k_v \hat{v}$  на высоких частотах можно пренебречь, тогда из модели эквивалентной схемы, приведенной на рис. 3, получим:

$$s L \hat{i}_L + r_i \hat{i}_L + f_i \hat{d} = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) может быть решено для получения коэффициента изменения тока индуктора в отношении величины  $\hat{d}$ :

$$\hat{d} = \frac{-f_i}{r_i} \frac{1}{\left( 1 + \frac{s}{\omega_2} \right)}, \quad (11)$$

где полюсная частота  $f_2$  определяется выражением:

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{r_i}{2\pi L}. \quad (12)$$

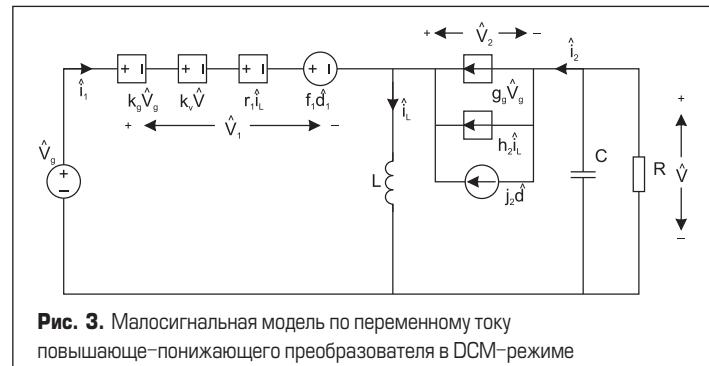
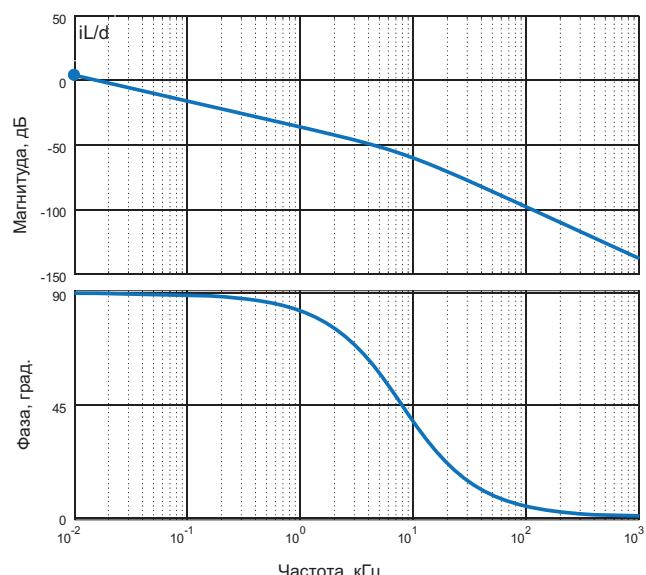


Рис. 3. Малосигнальная модель по переменному току повышающе-понижающего преобразователя в DCM-режиме



Диаграммы Боде согласно (11) при фиксированных значениях параметров  $f_s$  и  $r_1$  приведены на рис. 4.

Для упрощения (12) можно использовать стационарное соотношение, которое получено в работе [1]:

$$\frac{-V}{V_g} = \frac{D}{D_2}. \quad (13)$$

С учетом, что эквивалентное сопротивление в установившемся режиме  $R_e(D)$  определяется как [1]:

$$R_e = \frac{2Lf_s}{D^2}. \quad (14)$$

(где  $f_s$  — частота переключения), и подставив уравнения (6), (13) и (14) в уравнение (12), получим:

$$f = \frac{f_s}{\pi D_2}. \quad (15)$$

Последнее выражение для частоты  $f_2$  — это частота высокочастотного полюса, вызванного динамикой катушки индуктивности повышающе-понижающего преобразователя в режиме DCM. Можно сказать, что уравнение (15) является обобщенным результатом для высокочастотного полюса, справедливым для всех основных преобразователей, работающих в режиме DCM. Если  $0 < D_2 < 1$ , уравнение (15) подразумевает, что частота, соответствующая высокочастотному полюсу, всегда больше примерно 1/3 частоты коммутации.

**Таблица.** Высокочастотный полюс и ноль передаточной функции  $G_{vo}(s)$  в правой полуплоскости преобразователей в режиме прерывистого тока

Тип преобразователя	Высокочастотный полюс $\omega_2$	RHP нуль $\omega_z$
Понижающий (Buck)	$\frac{2Mf_s}{D(1-M)}$	—
Повышающий (Boost)	$\frac{2(M-1)f_s}{D}$	$2f_s/D$
Buck-Boost	$\frac{2 M f_s}{D}$	$2f_s/D$

В таблице приведены обобщенные выражения для высокочастотного полюса  $\omega_2$  и нуля  $\omega_z$  RHP (RHP — right half-plane, правая полуплоскость), вызванного динамикой катушки индуктивности [3, 5, 6].

Высокочастотный полюс и ноль правой полуплоскости возникают на частотах, близких или превышающих частоту коммутации  $f_s$ . Поэтому на практике высокочастотной динамикой, вызванной индуктором, обычно можно пренебречь.

## Выводы

- Высокочастотная динамика, вызванная индуктором преобразователя в режиме DCM, происходит на частоте выше или чуть ниже частоты переключения. Следовательно, в большинстве случаев высокочастотную динамику индуктора можно игнорировать. В модели переменного тока со слабым сигналом индуктивность  $L$  приравнивается к нулю, а оставшаяся упрощенная модель относительно легко решается для динамики низкочастотного преобразователя.
- Понижающие, повышающие, повышающе-понижающие преобразователи в DCM-режиме имеют передаточные функции, содержащие, по существу, один низкочастотный полюс.
- Для получения более точной модели динамики индуктора в DCM-режиме необходимо записать уравнения усредненных форм сигналов индуктора таким образом, чтобы среднее напряжение индуктора не было равно нулю.

## Литература

- Петросян Н. Н., Бегоян К. В. Моделирование эквивалентных схем преобразователей постоянного тока в режиме прерывистой проводимости // Силовая электроника. 2023. № 2.
- Vorperian V. Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch: Part I and II // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1990. Vol. 26. No. 3.
- Ericson R. W., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. Springer Science & Business Media, 2007.
- Петросян Н. Н., Бегоян К. В., Каюян Г. С. Анализ повышающих-понижающих конвертеров с помощью эквивалентной трансформаторной схемы малого сигнала // Силовая электроника. 2019. № 2.
- Maksimovic D., Cuk A. Unified Analysis of PWM Converters in Discontinuous Models // IEEE Transaction on Power Electronics. 1991. Vol. 6. No. 3.
- Sun J., Mitchell D. M., Greuel M. F., Krein P. T., Bass R. M. Averaged Modeling of PWM Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, NO. 4, July 2001.

Москва, 105275  
ул. Уткина Дом 40

ООО ТЕХНО

Тел.: (495) 735-4429  
<http://www.techno.ru>  
e-mail: [ywg@techno.ru](mailto:ywg@techno.ru)



## Электромагнитная совместимость

### Материалы и компоненты

- Прокладки ЭМС
- Токопроводящие силиконы
- Токопроводящие ленты
- Токопроводящая ткань
- Сотовый вентиляционные решетки
- Защитные экраны ЭМС
- Материалы для безэховых камер

ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ  
опытное и серийное производство,  
проектирование, монтаж

КОНТРАКТНАЯ РАЗРАБОТКА  
И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ

Логотип: Вектор Технологии

ООО «Вектор Технологии»  
194044, Санкт-Петербург  
Чугунная ул., д. 20  
[www.vectechspb.ru](http://www.vectechspb.ru)  
E-mail: [\(812\) 329-38-01](mailto:vectechspb@yandex.ru)

реклама



# Повышающий импульсный преобразователь напряжения с током нагрузки до 1 А

## Функциональный аналог LT1308B компании Linear Technology

ОАО «Интеграл» представляет микросхему IZ1308B — повышающий импульсный преобразователь напряжения с током нагрузки до 1 А. Микросхема IZ1308B предназначена для применения в источниках питания аппаратуры.

Поставка микросхем производится в пластинах (неразделенные) и в виде отдельных кристаллов.

Основные характеристики:

- диапазон входного напряжения: 1–10 В;
- выходное напряжение, регулируемое: 1,22–34 В;
- фиксированная рабочая частота: 600 кГц;
- максимальный ток в выключенном состоянии, не более: 1 мА;
- детектор низкого заряда батареи: 200 мВ ±2%;
- ток нагрузки: до 1 А (зависит от соотношения между входным и выходным напряжениями);
- диапазон рабочих температур: −40...+85 °C;
- допустимое значение потенциала статического электричества: 2000 В.

## Описание работы микросхемы

Микросхема содержит следующие основные блоки:

- источник опорного напряжения 1,22 В;
- генератор пилообразного напряжения и генератор прямоугольных импульсов с частотой 600 кГц;
- усилитель сигнала ошибки;
- ШИМ-компаратор;
- RS-триггер;
- блок включения/выключения;
- блок защиты от превышения выходного тока;

**Таблица 1.** Назначение выводов и контактных площадок

Номер контактной площадки кристалла	Обозначение	Назначение
01–06	GND	Общий вывод
07–12	SW	Выход
13, 14	VIN	Вход
20	LBI	Вход детектора низкого заряда батареи
21	LBO	Выход детектора низкого заряда батареи
30	VC	Вывод компенсации
31	FB	Вывод обратной связи
32	SHDN	Вывод включения/выключения

Примечание. Контактные площадки 15–19, 22–29, 33–37 не развариваются (тестовые площадки).

**Таблица 2.** Предельные электрические режимы

Обозначение параметра	Наименование параметра	Норма		Единица измерения
		не менее	не более	
$U_{\text{вх}}$	Входное напряжение	0	10	В
$U_{\text{вкл/выкл}}$	Напряжение на выводе включения/выключения SHDN	0	10	В
$U_{\text{LBO}}$	Напряжение на выходе LBO	0	10	В
$U_{\text{вых1}}$	Напряжение на выходе SW	−0,4	36	В
$U_{\text{ос1}}$	Напряжение на выводе обратной связи FB	—	$U_{\text{вх}} + 1$	В
$U_{\text{K1}}$	Напряжение на выводе компенсации VC	—	2	В
$U_{\text{LBI1}}$	Напряжение на входе LBI	−0,1	1	В
$P_{\text{рас}}$	Рассеиваемая мощность <sup>1)</sup>	—	1,8	Вт

Примечание. Одновременное воздействие нескольких предельных режимов не допускается.

<sup>1)</sup> При температуре среды  $T_{\text{OKP}} = +25^{\circ}\text{C}$ . Мощность, рассеиваемую микросхемой в условном корпусе  $P_{\text{рас}}$ , Вт, при температуре среды  $T_{\text{OKP}} + 25\dots+85^{\circ}\text{C}$  определяют по формуле:  $P_{\text{рас}} = (125 - T_{\text{OKP}}) / R_{T_{\text{КР-OKP}}} (1)$ , где 125 — температура кристалла, °C;  $T_{\text{OKP}}$  — температура среды, °C;  $R_{T_{\text{КР-OKP}}}$  — тепловое сопротивление кристалл-среда, °C/Вт

**Таблица 3.** Предельно допустимые режимы эксплуатации

Обозначение параметра	Наименование параметра	Норма		Единица измерения
		не менее	не более	
$U_{\text{вх}}$	Входное напряжение	1	10	В
$U_{\text{вкл/выкл}}$	Напряжение на выводе включения/выключения SHDN	0	10	В
$U_{\text{LBO}}$	Напряжение на выходе LBO	0	10	В
$U_{\text{LBI1}}$	Напряжение на входе LBI	−0,1	1	В
$P_{\text{рас}}$	Рассеиваемая мощность <sup>1)</sup>	—	1,5	Вт

<sup>1)</sup> При температуре среды  $T_{\text{OKP}} = +25^{\circ}\text{C}$ . Мощность, рассеиваемую микросхемой в условном корпусе  $P_{\text{рас}}$ , Вт, при температуре среды  $T_{\text{OKP}} + 25\dots+85^{\circ}\text{C}$  определяют по формуле (1).

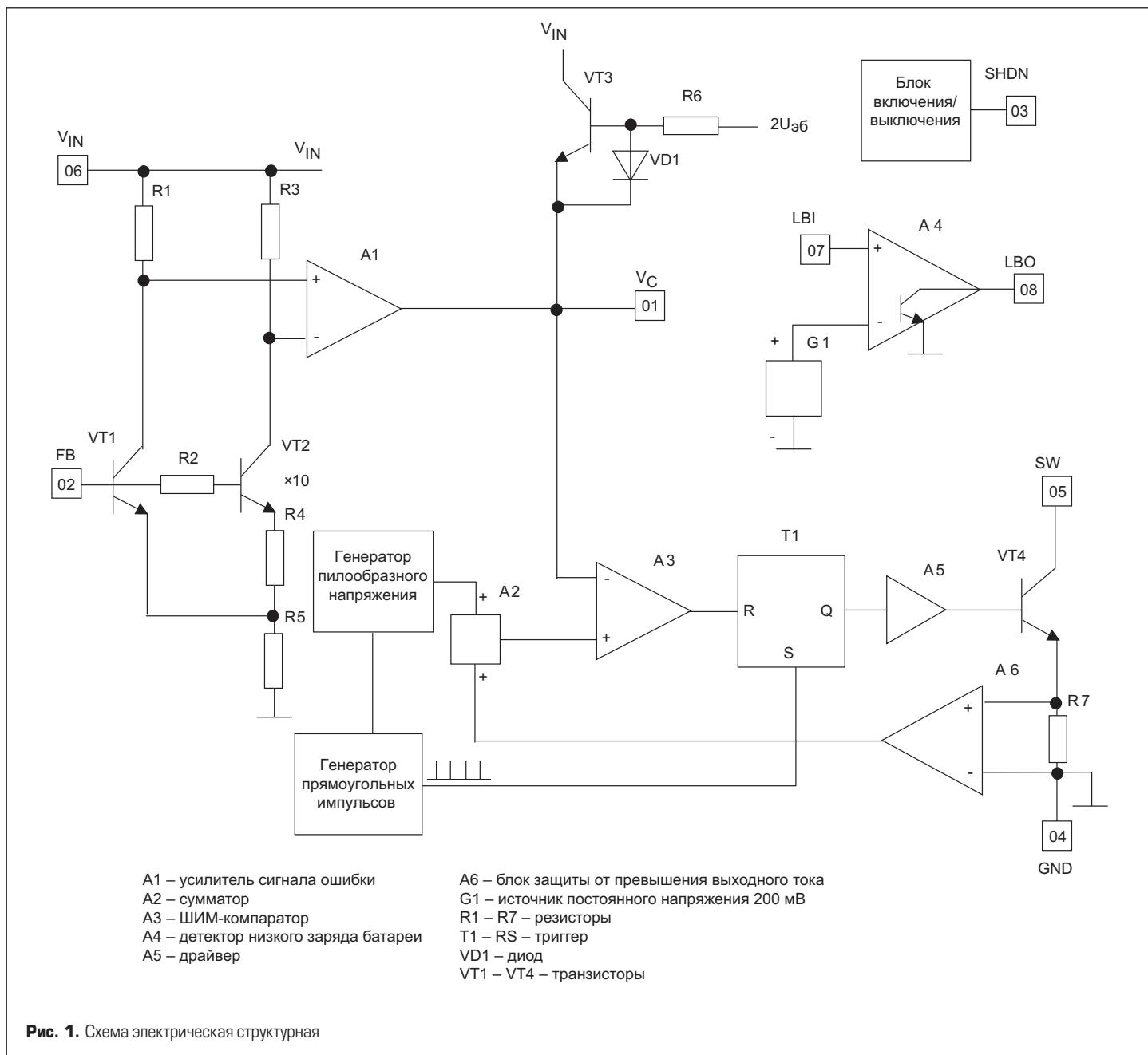


Рис. 1. Схема электрическая структурная

- выходной транзистор, обеспечивающий ток нагрузки не менее 1 А;
- детектор низкого заряда батареи.

При расчете необходимо учитывать, что входное напряжение должно быть всегда меньше выходного напряжения.

Невозможно обеспечить ток 1 А при любых сочетаниях входного и выходного напряжения.

Для расчета преобразователя напряжения необходимы следующие исходные данные:

- номинальное выходное напряжение:  $U_{\text{вых}}$ ;
- если есть, справочные зависимости КПД преобразователя ( $\eta$ ) на основе микросхемы от тока нагрузки (если нет конкретной зависимости, используем для расчета  $\eta = 80\%$ ).

## Обновленный SiC MOSFET 1700 В поколения Gen2 от AMG Power

Компания AMG Power выпустила обновленную версию SiC MOSFET поколения Gen2 1700 В 25 мОм 100 А в корпусе TO-247-4 с управляющим напряжением  $-5/+18$  В — A2G100N1700MT4.

В связи со спросом на рынке на транзисторы SiC MOSFET со значением  $VGS = -5/+18$  В AMG Power приняла решение о перевыпуске транзистора A2G100N1700MT4 в обновленной версии.

Основные параметры A2G100N1700MT4:

- напряжение сток-исток: 1700 В;
- ток (при  $+25^{\circ}\text{C}$ ): 100 А;
- $R_{ds(\text{On})}$ : 25 мОм;
- управляющее напряжение затвор-исток:  $-5/+18$  В;
- тип корпуса: TO-247-4;
- суммарный заряд затвора: 168 нКл;
- максимальная температура перехода:  $+175^{\circ}\text{C}$ ;
- выходная емкость: 198 пФ;
- рассеиваемая мощность: 484 Вт.

Применение A2G100N1700MT4:

- тяговые преобразователи электромобилей;
- высоковольтные DC/DC-преобразователи;
- импульсные источники питания;
- инверторы солнечных батарей;
- зарядные устройства электромобилей.

Преимущества транзистора A2G100N1700MT4:

- повышает эффективность системы с меньшими потерями на переключение и проводимость;
- позволяет работать на высокой частоте переключения;
- улучшает плотность мощности на уровне системы;
- уменьшает размер системы, вес и упрощает охлаждение;
- простота параллельного соединения и управления.

<https://macrogroup.ru/>

# Руководство по быстрой зарядке аккумуляторных батарей

Часть 1

**В то время как повышение емкости аккумулятора увеличивает длительность функционирования устройства, сокращение времени заряда создает дополнительные проблемы для разработчиков. Быстрая зарядка требуется широкому спектру бытовых, медицинских и промышленных систем. В данной статье, состоящей из двух частей, представлен обзор проблем, связанных с реализацией устройств быстрой зарядки. В первой части обсуждается позиционирование зарядного устройства и датчика заряда между хост-системой и аккумуляторной батареей для повышения гибкости системы, минимизации рассеиваемой мощности и улучшения общего удобства пользования. Также рассматриваются функции мониторинга, обеспечивающие безопасные процессы заряда и разряда. Во второй части речь пойдет о реализации системы быстрой зарядки с параллельными батареями.**

**Франко Контадини  
(Franco Contadini)<sup>1</sup>**

**Аlessandro Леонарди  
(Alessandro Leonardi)<sup>1</sup>**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

## Введение

В эпоху мобильных устройств время автономной работы становится одним из основных факторов, определяющих удобство пользования. Внедрение технологий энергосбережения является важным фактором, но это лишь часть решения. Учитывая растущие возможности автономных систем и весьма

высокие требования к питанию, производители оригинального оборудования (OEM) увеличивают срок службы батареи за счет повышения ее емкости.

Например, все более популярными становятся архитектуры типа 1S2P (одна ячейка последовательно с двумя параллельными ячейками), где параллельные ячейки используются для увеличения общей емкости. Недостаток такого решения — увеличение времени

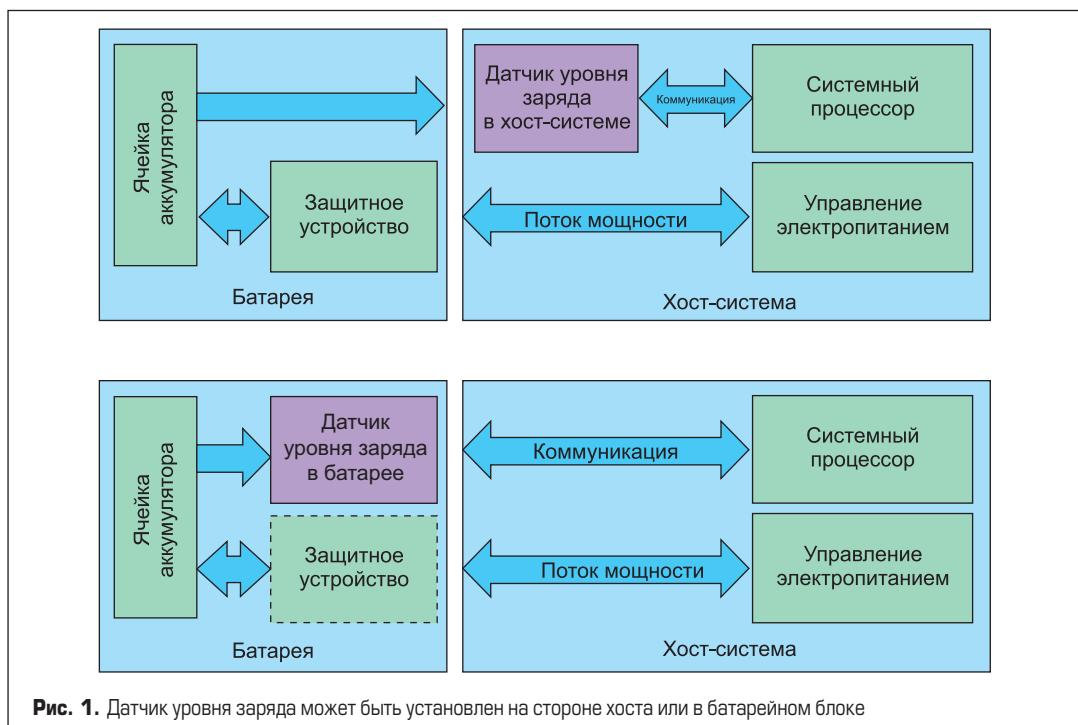


Рис. 1. Датчик уровня заряда может быть установлен на стороне хоста или в батарейном блоке

<sup>1</sup>Analog Devices

зарядки батареи. Чтобы свести его к минимуму, совершаются технологии аккумуляторных батарей, позволяющие увеличить зарядный ток с 2С до 3С или даже 6С (то есть в xС раз больше тока, соответствующего номинальному значению А·ч батареи за час). Например, элемент емкостью 2000 мА·ч может заряжаться током до 12 А без отрицательного влияния на надежность аккумулятора.

Повышение тока требует особых мер для обеспечения безопасности процессов зарядки и разрядки. При использовании параллельных ячеек, разработчикам также необходимо учитывать разброс их импедансов и начальной емкости. В первой части статьи представлен обзор проблем, связанных с реализацией быстрой зарядки аккумуляторов для широкого спектра приложений.

### Основы построения зарядного устройства. Почему важно правильно позиционировать указатель уровня заряда

Ключевыми компонентами системы зарядки являются само зарядное устройство и датчик, измеряющий уровень заряда батареи (SOC), время до полного разряда и до полного заряда. Датчик может быть реализован в хост-системе или в батарейном отсеке (рис. 1).

Если датчик встроен в аккумуляторный блок, то для хранения информации ему требуется энергонезависимая память. Транзисторы MOSFET в цепи питания отслеживают токи заряда/разряда и защищают устройство от опасных режимов. Например, IC MAX17330 (Analog Devices) представляет собой датчик заряда батареи со встроенной схемой защиты и возможностями управления (рис. 2).

Управляющий MOSFET регулируется с высокой степенью разрешения для создания линейного зарядного устройства, которое можно использовать в автономном режиме, когда напряжение источника ограничено на уровне 5 В, а ток заряда находится в диапазоне 500 мА. Поскольку напряжение литиевой батареи превышает 3,6 В на 99% кривой заряда, рассеиваемая мощность ограничена.

Высокое напряжение и большой ток заряда могут быть реализованы с помощью понижающего преобразователя, расположенного перед зарядным устройством и регулирующего выходное напряжение (рис. 3). Данное решение также сводит к минимуму потери и, следовательно, снижает рассеиваемую мощность на регулирующем MOSFET-транзисторе (рис. 4).

Включение датчика заряда в аккумуляторную батарею позволяет сделать ее «интеллектуальной» и обеспечить расширенные сценарии и возможности процесса зарядки. Например, в своей энергонезависимой памяти датчик может сохранять профиль заряда, соответствующий особенностям аккумуляторных ячеек. Это дает дополнительное преимущество в виде уменьшения нагрузки на главный хост-контроллер (MCU). В таком случае MCU нужно только реагировать на команды ALRT, поступающие от аккумуляторной батареи, для

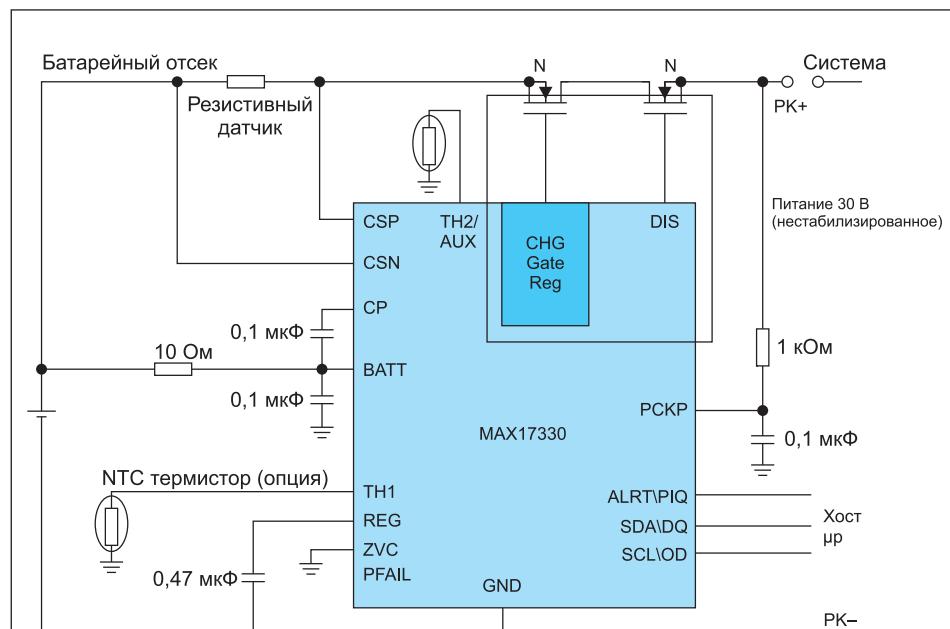


Рис. 2. Структурная схема, включающая датчик заряда и MOSFET-регулятор

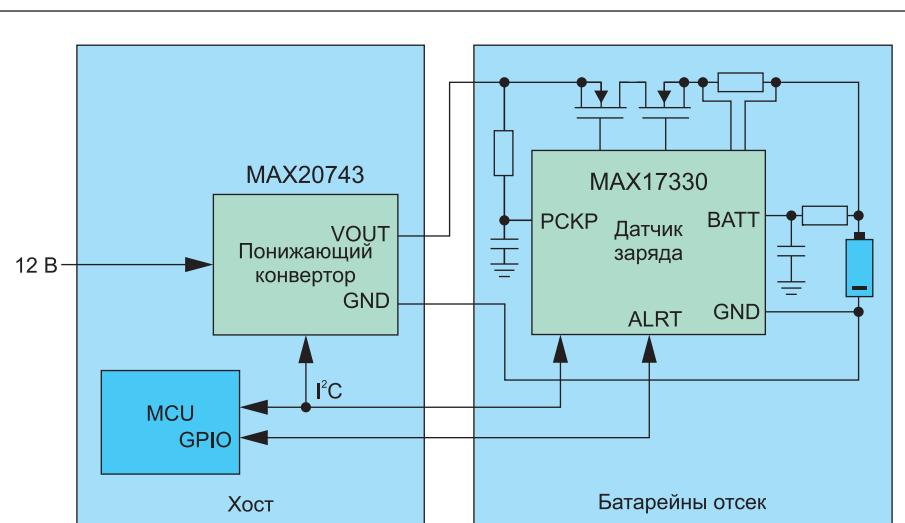


Рис. 3. Структурная схема высоковольтной/сильноточной системы быстрой зарядки

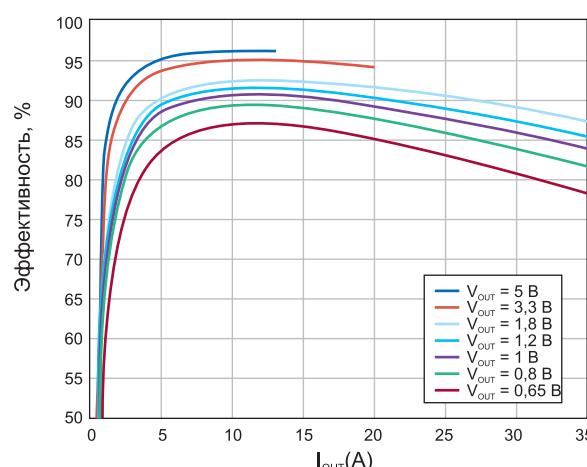


Рис. 4. Использование понижающего преобразователя для регулирования выходного напряжения и обеспечения зарядного тока 10 А с высокой эффективностью. Здесь показан понижающий конвертор MAX 20743 с V<sub>IN</sub> = 12 В

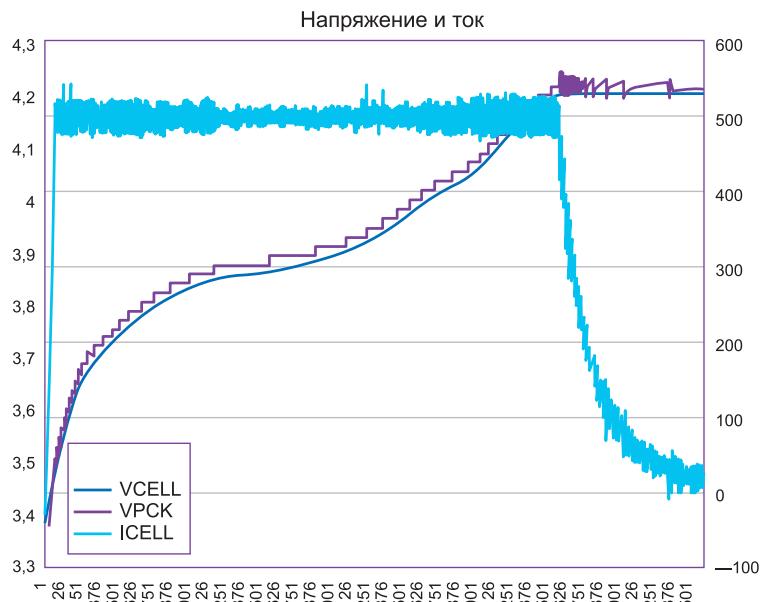


Рис. 5. Быстрая зарядка одиночного элемента литиевой батареи напряжением 3,6 В

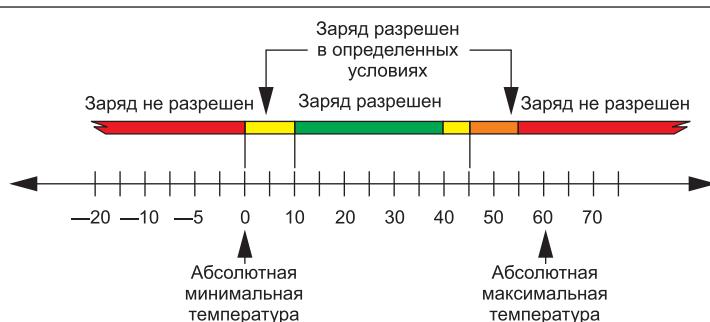


Рис. 6. Шестизонные температурные диапазоны JEITA

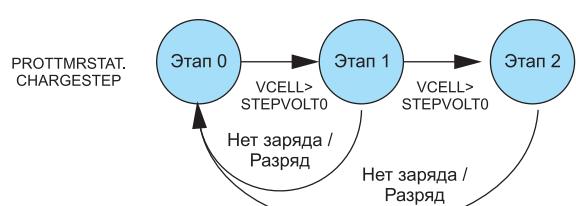
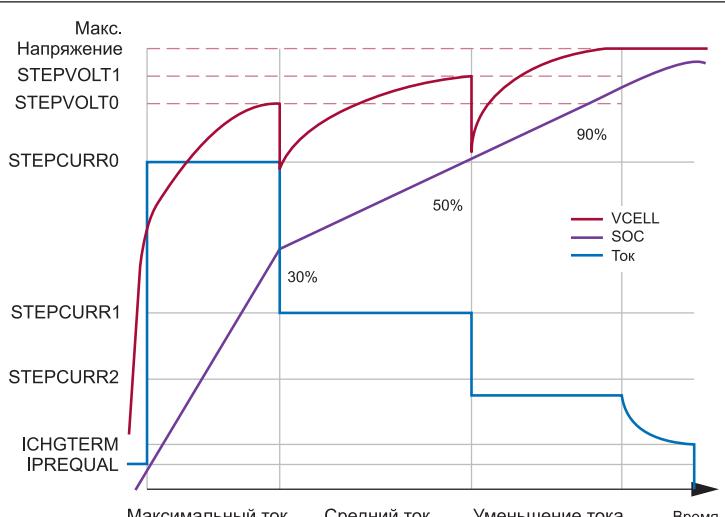


Рис. 7. Профиль поэтапного заряда с конечным автоматом для управления переходом между этапами

увеличения/уменьшения выходного напряжения понижающего конвертера в соответствии с полученными сигналами обратной связи:

- **CP:** ограничение температуры → снижение напряжения;
- **CT:** ограничение температуры MOSFET → снижение напряжения;
- **Dropout:** → увеличение напряжения.

Флаг CP устанавливается в том случае, когда ток, протекающий в защитных MOSFET, может привести к избыточному рассеиванию тепла, то есть при перегреве MOSFET-транзистора. Параметры ограничения предела температуры системы и MOSFET настраиваются с помощью набора регистров nChgCfg1.

Программируемый понижающий преобразователь MAX20743 использует шину PMBus для точной регулировки выходного тока. Встроенные в конвертер MOSFET-транзисторы поддерживают зарядные токи до 10 А. Кроме того, поскольку PMBus использует протокол I<sup>2</sup>C в качестве физического уровня, одна шина I<sup>2</sup>C может применяться как для управления преобразователем, так и для измерения уровня заряда.

В следующем примере описан способ зарядки литиевого элемента напряжением 3,6 В. На рис. 5 показана временная зависимость сигналов в зарядной системе, в частности представлены напряжение и ток батареи, а также выходное напряжение понижающего конвертера. Как видно на рисунке, выход преобразователя (VPCK) установлен на 50 мВ выше напряжения батареи. Выходной сигнал постоянно увеличивается, чтобы избежать недостаточного перепада напряжения, а также свести к минимуму общее рассеивание мощности.

### Управление безопасностью аккумуляторных батарей

Учитывая высокий уровень токов при быстрой зарядке, производители оборудования (OEM) должны гарантировать безопасные режимы работы электронных блоков. Поэтому интеллектуальное быстрое зарядное устройство обязано контролировать несколько важных параметров в рамках общего управления системой. Например, при мониторинге температуры батареи и окружающей среды (помещения) быстрое зарядное устройство определяет, когда следует уменьшить зарядный ток и/или снизить напряжение на выходе, чтобы обеспечить безопасный и длительный срок службы батареи в соответствии со спецификациями и рекомендациями производителя элемента питания.

Напряжение и ток можно регулировать в зависимости от температуры в соответствии с шестизонными установками температуры JEITA (рис. 6) и трехзонной ступенчатой зарядкой в зависимости от напряжения аккумулятора.

Срок службы батареи может быть дополнительно увеличен с помощью профиля ступенчатой зарядки, изменяющего ток заряда соответственно напряжению батареи. На рис. 7 показан такой профиль, использующий три напряжения и три соответствующих тока за-

ряда. Переходом между этапами можно управлять с помощью конечного автомата (рис. 7). Обратите внимание на то, что ток, напряжение и температура взаимосвязаны (табл. 1 и 2).

### Параллельная зарядка

Параллельный заряд нескольких элементов требует более сложных алгоритмов управления. Например, зарядное устройство должно предотвращать возникновение перекрестных токов, когда напряжение двух батарей отличается более чем на 400 мВ. Перекрестный заряд допускается в течение ограниченного времени только в том случае, если самый низкий уровень заряда ячейки слишком мал для поддержания нагрузки системы (табл. 3, рис. 8).

Во второй части статьи мы рассмотрим реализацию системы быстрой зарядки параллельных батарей с использованием оценочных комплектов и платы Raspberry Pi.

### Заключение

Перенос функций управления и контроля уровня заряда со стороны хост-системы на блок аккумуляторов позволяет независимо управлять каждой батареей в конфигурации 1S2P. Вместо того чтобы нагружать главный процессор всеми функциями управления, интеллектуальное зарядное устройство само может управлять процессом в соответствии с оптимальным профилем заряда. Поскольку возможности контроля на стороне хост-системы ограничены необходимостью реагирования на сигналы ALRT, генерируемые датчиком заряда, такие усовершенствованные

**Таблица 1.** Зарядный ток при ступенчатой зарядке и по сценарию JEITA

Температура	Ниже предела	Низкая	Комнатная	Повышенная	Высокая	Выше предела
	< 0°C	0...+10°C	+10...+40°C	+40...+45°C	45...+55°C	> +55°C
Шаг 2	Нет заряда	0,19°C	0,25°C	0,22°C	0,15°C	Нет заряда
Шаг 1	Нет заряда	0,38°C	0,5°C	0,44°C	0,31°C	Нет заряда
Шаг 0	Нет заряда	0,75°C	1°C	0,88°C	0,625°C	Нет заряда

**Таблица 2.** Зарядное напряжение при ступенчатой зарядке и по сценарию JEITA

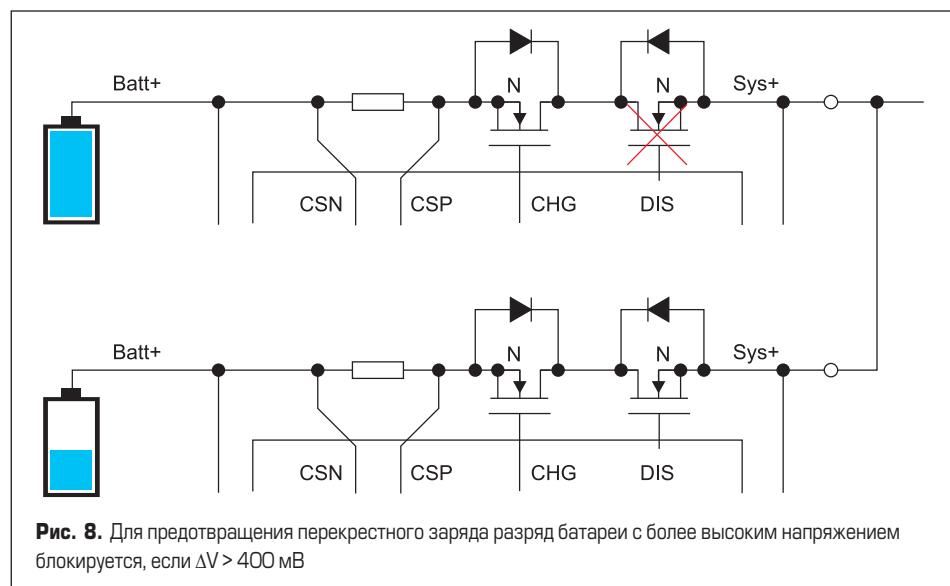
Температура	Ниже предела	Низкая	Комнатная	Повышенная	Высокая	Выше предела
	< 0°C	0...+10°C	+10...+40°C	+40...+45°C	+45...+55°C	> +55°C
Шаг 2	Нет заряда	4,14 В	4,2 В	4,18 В	4,16 В	Нет заряда
Шаг 1	Нет заряда	4,1 В	4,16 В	4,14 В	4,12 В	Нет заряда
Шаг 0	Нет заряда	4,06 В	4,12 В	4,1 В	4,08 В	Нет заряда

системы легко адаптируются к параметрам различных аккумуляторных блоков.

Интеллектуальное зарядное устройство также способно при необходимости блокировать процессы заряда и разряда, чтобы предотвратить возникновение перекрестных токов. Такой подход повышает гибкость системы быстрой зарядки и позволяет учсть разброс параметров батарей. В дополнение к упрощению

конструкции и процесса управления новое решение дает возможность свести к минимуму рассеиваемую мощность и гарантировать безопасный заряд и разряд в широком спектре применений, одновременно улучшая потребительские характеристики за счет ускорения процесса зарядки.

По материалам сайта [www.analog.com](http://www.analog.com)



**Таблица 3.** Логика управления FET

PAREN	BLOCKDIS	ALLOWCHGB	CHG FET	DIS FET
0	*	*	Норм.	Норм.
1	0	0	Норм.	Норм.
1	0	1 (ожидание)	Блок.	Норм.
1	1	0	Норм.	Блок.
1	1	1 (ожидание)	Блок.	Норм.

## Литиевая батарея CR123A для автономных пожарных извещателей от HCB battery

Компания HCB представила версию литиевой батареи с модифицированной структурой для блоков питания беспроводных датчиков пожарной сигнализации — модель CR123A.

В батарее HCB CR123A установлен литиевый анод с низким внутренним сопротивлением, который может обеспечить стабильное напряжение разряда даже при высоком его потреблении. Батарея HCB CR123A является лидером отрасли в сравнении с батареями конкурентов по значению напряжения после подачи сигнала тревоги, что гарантирует надежность сигнализации и работоспособность оборудования.

Ниже приведены данные измерения остаточного напряжения батареи HCB CR123A в режимах

разряда. В рабочем режиме извещателя «Безопасность» батарея была разряжена до 2,6 В, а затем тестировались различные режимы импульсного тока:

- при импульсном токе 70 мА, разрядка в течение 240 с, конечное напряжение 2,589 В;
  - при импульсном токе 100 мА, разрядка в течение 60 с, конечное напряжение 2,545 В;
  - при импульсном токе 200 мА, разрядка в течение 60 с, конечное напряжение 2,462 В;
  - при импульсном токе 400 мА, разрядка в течение 60 с, конечное напряжение 2,336 В.
- Технические параметры батареи HCB CR123A:
- номинальное напряжение: 3 В;
  - номинальная емкость: 1600 мА·ч;



- максимальный продолжительный ток: 1500 мА;
- максимальный импульсный ток: 3000 мА;
- рабочая температура: -40...+70 °C.

<https://macrogroup.ru/>

# Оценка качества свинцово-кислотного аккумулятора по изменению его внутреннего сопротивления

**В статье рассмотрен способ оценки качества свинцово-кислотного аккумулятора по величине изменения его внутреннего импеданса. Показано, что этот способ позволяет не только оценивать состояние аккумуляторной батареи (АКБ) в целом по ее измеренной емкости и импедансу, но и прогнозировать состояние АКБ на ближайшее время при регулярном измерении внутреннего импеданса аккумулятора и его емкости.**

**Денис Павлов<sup>1</sup>**

energidriver@mail.ru

**Алексей Осетров<sup>1</sup>**

alex99979@mail.ru

**Владимир Чащин<sup>1</sup>**

6123@mail.ru

Заряд аккумулятора сегодня — обыденный процесс, который может быть осуществлен как постоянным током, так и постоянным напряжением. Комбинация зарядно-разрядных токов при заданном напряжении помогает в процессе восстановления заряда батареи. Однако несоблюдение рекомендованных производителем режимов заряда АКБ приводит к значительному сокращению срока службы аккумулятора. Точное соблюдение рекомендаций и подстройку режима заряда могут обеспечить только автоматические интеллектуальные зарядные устройства. Для того чтобы увеличить срок службы АКБ, необходимо использовать интеллектуальное зарядное устройство — оно не только экономически эффективно, но и целесообразно с экологической точки зрения.

В свинцово-кислотной АКБ положительные пластины аккумулятора изготавливаются с применением диоксида свинца, а отрицательные — губчатого свинца. В качестве электролита обычно используется водный раствор серной кислоты. При разрядке в АКБ возникает электрохимический процесс, в котором образуется соль  $PbSO_4$  (сульфат свинца). Именно образование этих кристаллов определяет номинальную емкость. Определенный метод зарядки свинцово-кислотной АКБ оказывается на ее емкости [9].

## Типы и особенности свинцово-кислотных АКБ

Свинцово-кислотные аккумуляторы имеют самую низкую плотность энергии 30–50 Вт/кг по сравнению с другими типами аккумуляторов. Максимальный ток разряда может достигать  $I_{pas} = 5I_{20}$  (где  $I_{20}$  — ток 20-ч разряда). АКБ этого типа способны работать

при температуре окружающей среды  $-30\dots+60$  °C. Благодаря этим параметрам они также имеют относительно низкую скорость саморазряда, составляющую порядка 5% от номинальной емкости в месяц. Аккумуляторы этого типа оптимальны для энергоемких устройств, где их существенный вес и размер не имеют принципиального значения.

Сегодня выделяют три поколения активно используемых аккумуляторных батарей. Первое поколение — это АКБ с жидким электролитом открытого или закрытого типа с номинальной емкостью 35–5300 А·ч и временем жизни 10–20 лет [7]. Открытый тип — с поверхностными коробчатыми электродными пластинами, а закрытый тип — с пастрированными электродными пластинами [5]. Эти аккумуляторы требуют частой доливки дистиллированной воды и должны эксплуатироваться в хорошо вентилируемом помещении. Аккумуляторы закрытого типа имеют крышку и снабжены специальными пробками, обеспечивающими задержку аэрозоля серной кислоты. Через отверстия пробок производится заливка электролита и добавление воды. Благодаря конструкции пробок обеспечивается удержание паров воды в виде конденсата, такие аккумуляторы требуют редкого долива дистиллированной воды.

Второе поколение — это гелевые АКБ, которые содержат гелеобразный электролит в загущенном виде, полученный путем смешивания серной кислоты с загустителем. Гелевые аккумуляторы не требуют технического обслуживания в виде долива воды в течение всего срока эксплуатации. Однако они более требовательны к стабильности напряжения зарядного устройства. Нестабильность напряжения заряда не должна превышать 1% от напряжения заряда ( $U_{zap}$ ). Превышение максимально допустимого

напряжения заряда приводит к интенсивному газообразованию с формированием полостей **незаполненного** электролита на границе с электродом [10].

Третье поколение — это батареи, выполненные по технологии AGM (Absorbed in Glass Mat) изготовления АКБ, в которых электролит абсорбируется в сепараторах из стекловолокна, расположенных между электродами. Сепаратор представляет собой пористую систему. Количество электролита дозируют так, чтобы мелкие поры оставались свободными для циркуляции выделяющихся газов. Количество батарей данного типа на рынке меньше. Но они также требовательны к стабильности напряжения заряда (лучше, чем 1% от  $U_{\text{зар}}$ ).

По типу используемых положительных электродов различают следующие типы аккумуляторов:

- аккумуляторы с намазными положительными электродами (серия OGi);
- аккумуляторы с трубчатыми (панцирными) положительными электродами (серия OPzS);
- аккумуляторы с электродами большой поверхности (серия GrOE).

В зависимости от характера нагрузки используются разные типы аккумуляторов. Наиболее распространение получили аккумуляторы с намазной (OGi) или трубчатой (панцирной) пластиною (OPzS). В случае если требуется обеспечить большие толчковые токи нагрузки, как правило, используют аккумуляторы, изготовленные по технологии Планте (типа GroE), имеющие электрод ламельного типа с большой эффективной площадью поверхности электрода. Широкое распространение в энергетике получили аккумуляторы с плоской положительной пластиной стержневого типа Vb (VartaBloc), которые по своим характеристикам несколько уступают GroE. В одном корпусе они имеют напряжение 6 В.

На рис. 1 показаны различные типы свинцово-кислотных АКБ по конструктивному исполнению. На рис. 2 представлена конструкция панцирного электрода. На рис. 3 изображена поверхностная положительная пластина и ее разрез.

### Основные внутренние процессы, определяющие срок службы АКБ

Принцип действия свинцово-кислотных аккумуляторов основан на электрохимических реакциях свинца и диоксида свинца в водном растворе серной кислоты. Активными веществами в токообразующем процессе являются:

- на положительном электроде — двуокись свинца  $PbO_2$ ;
- на отрицательном электроде — губчатый металлический свинец  $Pb$ ;
- электролит — водный раствор серной кислоты  $H_2SO_4 + H_2O$ .

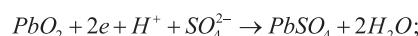
Химическая реакция происходит на границе электрод — электролит. Скорость ее протекания определяется скоростью разряда свинцово-кислотного аккумулятора. Реакции, протекающие при заряде и разряде свинцово-кислотного



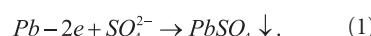
Рис. 1. Конструктивные исполнения свинцово-кислотных АКБ

аккумулятора, могут быть записаны в следующем общем виде [9]:

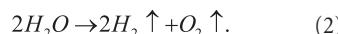
(+) электрод:



(-) электрод:



Направление электрохимической реакции слева направо соответствует реакции разряда, справа налево — реакции заряда. При протекании зарядного тока в свинцовом аккумуляторе открытого типа в процессе электролиза воды происходит выделение кислорода на положительном и водорода — на отрицательном электроде:



В результате заряда возникает потеря воды в АКБ, которую необходимо компенсировать регулярной доливкой. Но образование кислорода и водорода происходит не одновременно и при ускоренном и выравнивающем заряде из электролита могут выделяться газообразные водород и кислород.

С учетом особенностей устройства свинцово-кислотного аккумулятора и процессов, протекающих в нем, выделяются следующие основные факторы, определяющие его долговечность [1]:

- оползание активной массы положительных пластин;
- коррозия электродов;
- сульфатация пластин.

### Оползание активной массы положительных пластин

Оползание активной массы связано с ее разрыхлением, при котором меняется однородность и механическая прочность активной массы. Это необратимый процесс, который однозначно становится причиной старения аккумулятора и активизируется при больших токах заряда и разряда, при интенсивном газовыделении и повышенных температурах. В аккумуляторах новых конструкций с этим

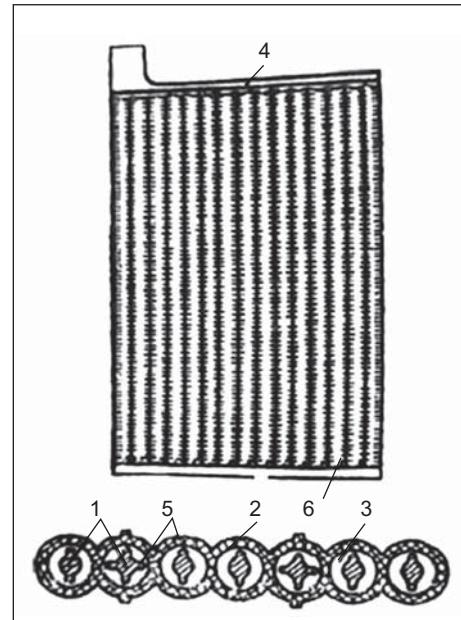


Рис. 2. Конструкция панцирного электрода свинцово-кислотных АКБ

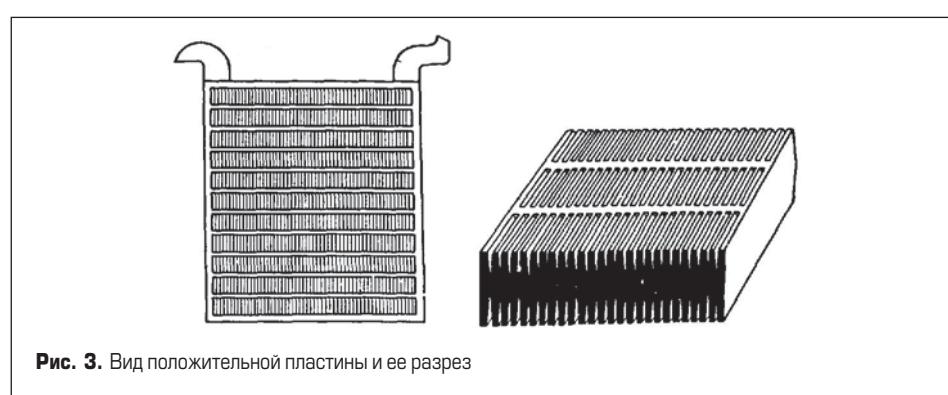
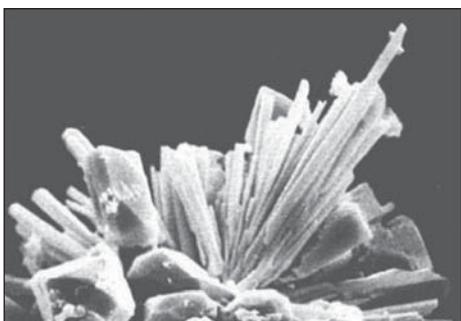


Рис. 3. Вид положительной пластины и ее разрез



**Рис. 4.** Образование кристаллов дендрита  $\text{PbSO}_4$

явлением успешно борются, однако полностью процесс оползания активной массы положительных пластин предотвратить пока не удалось.

#### Коррозия электродов

В результате процесса коррозии свинцового электрода связь активной массы с проводником тока постепенно ухудшается, что приводит к росту внутреннего сопротивления,

а к концу срока службы может даже превратиться в обрывы электрической цепи. Интенсивность коррозионного износа электродов резко возрастает при повышении температуры, поэтому крайне важно поддерживать оптимальную температуру эксплуатации свинцово-кислотных аккумуляторов. Также важно, чтобы с изменением температуры окружающей среды изменялась величина напряжения поддерживающего заряда. С этой целью зарядно-подзарядные устройства, предназначенные для эксплуатации совместно со свинцово-кислотными аккумуляторами, оснащаются функцией изменения выходного напряжения в зависимости от температуры (функцией термокомпенсации). Оптимальной температурой эксплуатации АКБ считается  $+20^\circ\text{C}$ . При увеличении температуры эксплуатации на каждые  $10^\circ\text{C}$  срок их эксплуатации сокращается в два раза.

#### Сульфатация пластин

Одна из причин выхода из строя аккумулятора — повышенная сульфатация пластин. Процесс сульфатации заключается в образовании крупных нерастворимых кристаллов сульфата свинца ( $\text{PbSO}_4$ ), которые являются

диэлектриком и практически не участвуют в основных токообразующих процессах. Сульфатация пластин, как правило, вызвана нарушением правил эксплуатации аккумулятора. Можно выделить основные причины, приводящие к сульфатации [9]:

- 1) Систематические недозаряды аккумулятора.
- 2) Глубокие разряды ( $U < 1,75 \text{ В}$ ).
- 3) Длительное пребывание АКБ в разряженном состоянии.
- 4) Снижение уровня электролита (ниже верхней кромки пластин).
- 5) Повышенный саморазряд.
- 6) Повышенная концентрация электролита.

При этом происходит рост дендритов — нерастворимых кристаллов сульфата свинца с характерной формой и длиной до нескольких миллиметров (рис. 4).

#### Качественные и количественные характеристики свинцово-кислотных АКБ

К основным характеристикам кислотно-свинцовых АКБ следует отнести:

- напряжение холостого хода;
- удельную плотность электролита;
- внутреннее сопротивление (или импеданс);
- емкость.

Эти характеристики являются качественными и количественными для АКБ.

Но, кроме них, важен и внешний визуальный осмотр АКБ. При визуальном осмотре могут быть выявлены внешние неисправности АКБ (повреждение корпуса, коррозия электродов, низкий уровень электролита и т. д.).

Поэтому рассмотрим подробнее такую характеристику аккумулятора, как внутреннее сопротивление, или импеданс.

#### Внутреннее сопротивление и импеданс свинцово-кислотной АКБ

Типичное значение внутреннего сопротивления свинцово-кислотной АКБ составляет порядка  $0,6\text{--}3 \text{ м}\Omega$  [2, 9].

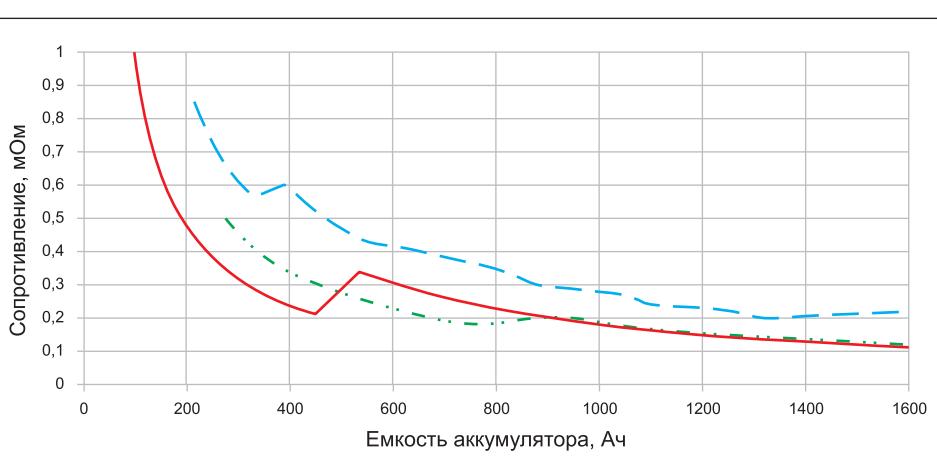
В полное сопротивление АКБ на 80% вносят вклад пластины, активное вещество, перемычки, клеммы, сепаратор и электролит [10]. Любые изменения этих компонентов, например коррозия пластин и перемычек, потеря активного вещества, высыхание электролита, вызывают увеличение сопротивления аккумулятора. Существуют способы разряда аккумулятора с целью определения его сопротивления. Однако они неудобны и непрактичны, так как не могут быть осуществлены в условиях эксплуатации аккумуляторных батарей в системах гарантированного электропитания.

Внутреннее сопротивление АКБ зависит от емкости обратно [8]:  $R_{\text{вн}} = 1/C$ .

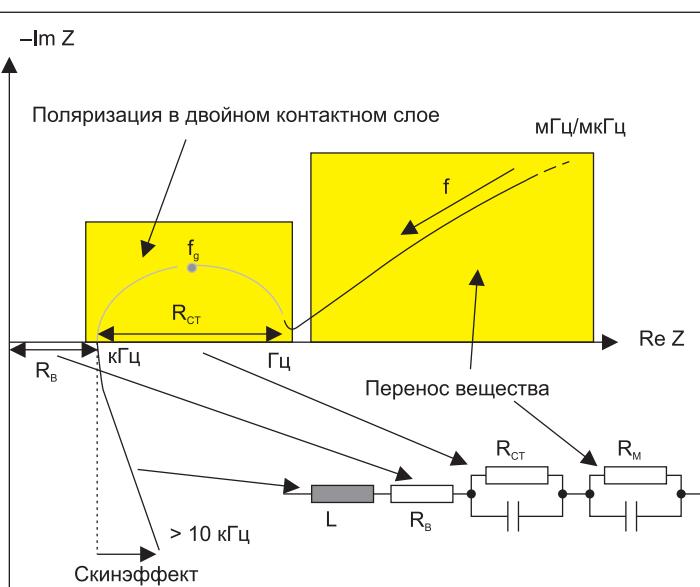
Измерение емкости ( $C$ ) или внутреннего сопротивления ( $R_{\text{вн}}$ ) дает информацию о состоянии АКБ.

На рис. 5 представлены графики зависимости  $R_{\text{вн}}$ , определенных методом DC, от емкости аккумуляторов [8].

Характерные изломы кривых (рис. 5) определяются изменениями типа аккумуляторов



**Рис. 5.** Графики зависимости внутреннего сопротивления от емкости свинцово-кислотных АКБ



**Рис. 6.** Характер изменения импеданса в зависимости от частоты

электродов. По наличию многочисленных изломов можно дать оценку состоянию АКБ в целом и приблизительно предсказать срок ее эксплуатации.

Существуют методы восстановления АКБ из глубокого разряда. Это методы зарядки АКБ кратковременными циклами заряда/разряда. Для этого необходимо создавать реверсно-импульсные токи определенной частоты. В этом случае АКБ уже будет иметь свой внутренний импеданс.

На рис. 6 показана эквивалентная электрическая схема свинцово-кислотной АКБ и характер ее импеданса в широком диапазоне частот от мГц до 10 кГц и выше [7]:

$R_M$  — сопротивление утечки аккумулятора (при наличии тока саморазряда);  
емкостный характер возникает за счет параллельного соединения пластина аккумулятора;  $R_{CT}$  — сопротивление двойного слоя металла-электролит;

$L$  — индуктивность батареи при частоте выше кГц;

$R_B$  — сопротивление при высокой частоте тока заряда аккумулятора.

Из графика внутреннего импеданса (рис. 6) следует, что аккумуляторная батарея, с точки зрения своих электрических свойств, проявляет себя весьма по-разному в зависимости от частоты [8].

В диапазоне частот от единиц мГц до единиц Гц преобладают инерционные процессы, связанные с превращением химических веществ. Они отображены на эквивалентной электрической схеме в виде электрохимической емкости (емкости заряда или разряда) и сопротивления утечки  $R_M$  (соответствующего току саморазряда). Полное сопротивление в указанном диапазоне частот имеет активно-емкостный характер.

В диапазоне частот выше Гц и до кГц полярность внешнего электрического поля меняется настолько быстро, что перенос веществ и их химические превращения происходят не успевают. Здесь в действие вступают приграничные эффекты, связанные с поляризацией контактных слоев разнородных проводников. Это означает, что внешняя энергия (энергия внешнего электрического поля) не приводит к реакциям заряда или разряда аккумулятора, а только переориентирует диполи в двойном контактном слое на границе металла-электролит. На эквивалентной схеме это показано как емкость двойного слоя и сопротивление утечки  $R_{CT}$ . Полное сопротивление в указанном диапазоне частот имеет активно-емкостный характер.

Диапазон частот 1–10 кГц характеризуется отсутствием реактивных составляющих в сопротивлении АКБ, которое носит сугубо активный характер и определяется электрической проводимостью составляющих частей аккумулятора.

В диапазоне частот выше 10 кГц батарея ведет себя как индуктивность, чья величина определяется пространственным расположением аккумуляторов и длиной шин подключения.

Используя такое поведение внутреннего импеданса в зависимости от частоты, можно сделать следующие выводы: чтобы избежать нежелательных пульсаций тока АКБ и уве-

личить срок службы аккумулятора, предпочтительно применять зарядные устройства, использующие ШИМ-модуляцию, частота пульсаций напряжения которых составляет до нескольких десятков килогерц.

### Экспериментальный метод измерения внутреннего сопротивления АКБ

Различают методы измерения внутреннего сопротивления на переменном и постоянном токах (для щелочных, NiCd-батарей). Методики измерения внутреннего сопротивления подробно описаны в ГОСТ Р МЭК 60285-2002 [3].

Внутреннее сопротивление свинцово-кислотных батарей измеряется лишь на постоянном токе [4, 5]. Из ГОСТ Р 53165-2008 [6] следует, что измерение внутреннего сопротивления стартерных свинцово-кислотных АБ вовсе не предусмотрено. Но все же исследователями продолжаются работы по совершенствованию методов измерения внутреннего сопротивления и оценки технического состояния свинцово-кислотных АКБ, в том числе и при различных температурах окружающей среды [7].

В работе [8] проводились эксперименты со свинцово-кислотными АКБ модели 6СТ-190Л производства ООО «РАЗ Тангстоун». Емкость таких АКБ составляет 190 А·ч, а номинальное напряжение — 12 В.

Экспериментальная установка описана в [8].

Предварительно выполнен монтаж термопар в кислотостойкой оболочке внутри корпуса АКБ. Всего смонтировано пять термопар. Общий вид АБ, размещенной в климатической камере со смонтированными термопарами, представлен на рис. 7.

Три термопары размещались по краям и в середине аккумулятора, одна термопара смонтирована на выводе АКБ и еще одна находилась в подвешенном состоянии для

контроля температуры внутри морозильной камеры. К выводам АКБ подключены тестер аккумуляторных батарей Midtronics Celltron Start CTS-500 и портативный электроизмерительный прибор «Анализатор ЭДА».

Лабораторная установка позволяла измерять: емкость АКБ ( $C$ , А·ч), степень заряженности АКБ ( $\Delta C_p$ , %), напряжение разомкнутой цепи ( $U_{npr}$ , В), напряжение под нагрузкой ( $U_n$ , В), ток разряда ( $I_p$ , А), время заряда ( $t_p$ , А), плотность электролита ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>), температуру электролита ( $T_m$ , К или °C), температуру окружающей среды ( $T_{okp}$ , К или °C), время разряда ( $\tau_p$ , с), время заряда ( $\tau_p$ , с), ток холодной прокрутки ( $I_{xpr}$ , А); внутреннее сопротивление ( $r$ , Ом).

Для исключения возможных ошибок и взаимного влияния друг на друга измерительные приборы подключались к АКБ поочередно. Периодичность измерений составляла 15 мин. Величина внутреннего сопротивления  $r$  вычислялась по формуле:

$$r = \frac{\Delta U(\sim)}{I(\sim)}, \quad (3)$$

где  $\Delta U(\sim)$  — изменение напряжения на АКБ при воздействии на нее тестовым сигналом;  $I(\sim)$  — переменный ток, пропускаемый через АКБ.

Для расчета  $r$  бралось действующее значение переменного напряжения  $\Delta U(\sim)$ . На генераторе устанавливалась частота переменного напряжения  $f = 10$  Гц с номиналом  $U(\sim) = 100$  мВ. Затем генератор подключался к выводам АКБ. Параллельно к выводам АКБ подключался USB-осциллограф.

Эксперимент позволил выявить качественные особенности изменения внутреннего сопротивления АКБ с различной степенью заряженности аккумулятора и температурой электролита. На рис. 8 показаны графики зависимости емкости и внутреннего сопротивления от температуры.

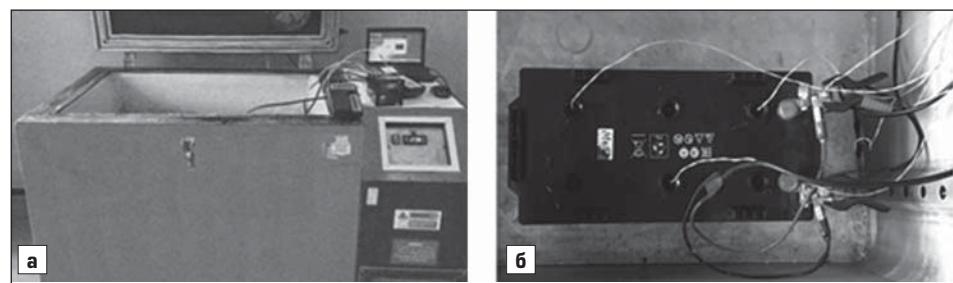


Рис. 7. Климатическая камера с АКБ: а) общий вид камеры; б) с АКБ внутри камеры

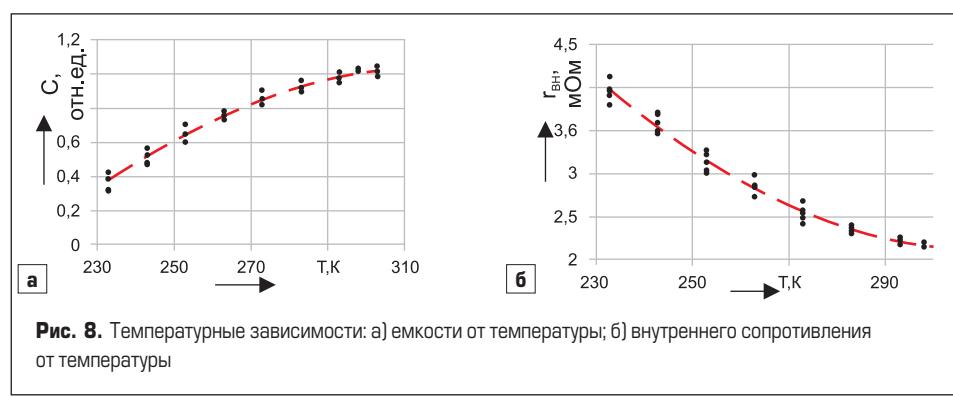


Рис. 8. Температурные зависимости: а) емкости от температуры; б) внутреннего сопротивления от температуры

## Анализ полученных результатов

В эксперименте температуру в климатической камере не опускали ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  из-за опасения выхода из строя АКБ при сильных разрядах.

В работе [8] проводился эксперимент с изменениями частот переменного тестового напряжения. Выяснили, что в области нижней границы частотного диапазона импеданс достигает сравнительно больших значений, что объясняется более сильным характером поляризации, которая увеличивается при уменьшении частоты воздействующего тока. При пропускании через батарею переменного тока с номиналом, близким к 1000 Гц, отклонение напряжения на выводах батареи составляло около  $\Delta U_n \approx 5,1 \times 10^{-6}$  В, тогда как при частотах переменного тока около 10 Гц отклонение  $\Delta U_n \approx 5,1 \times 10^{-6}$  В и более. Следовательно, изменение напряжения на выводах батареи в указанной области частот обладает наибольшей чувствительностью, что с экономической точки зрения предпочтительнее при измерениях.

В настоящей работе проводился расчет коэффициента корреляции между величиной внутреннего сопротивления и емкости АКБ. Использовалась формула линейного коэффициента корреляции Пирсона:

$$K_{r,C} = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - r)(C_i - C)}{n\sigma_r\sigma_C}, \quad (4)$$

где  $n = 8$  — число измерений емкости и внутреннего сопротивления (по рис. 6);  $r_i$  и  $C_i$  — отдельное измерение каждой компоненты внутреннего сопротивления и емкости;

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad \begin{array}{l} \text{среднее значение} \\ \text{внутреннего} \\ \text{сопротивления;} \end{array}$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad \begin{array}{l} \text{среднее значение} \\ \text{емкости АКБ;} \end{array}$$

$$\sigma_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - r)^2} \quad \begin{array}{l} \text{среднеквадратическое} \\ \text{отклонение внутреннего} \\ \text{сопротивления АКБ;} \end{array}$$

$$\sigma_C = \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - C)^2} \quad \begin{array}{l} \text{— среднеквадратическое} \\ \text{отклонение емкости АКБ.} \end{array}$$

По результатам эксперимента коэффициент корреляции составил  $K_{r,C} \approx -0,78$ , что свидетельствует о сильной обратной связи между внутренним сопротивлением и емкостью АКБ.

## Вывод

По анализу результатов экспериментальных данных, полученных в работе [8], и по итогам обзора литературных источников, публикаций, монографий можно однозначно утверждать, что внутреннее сопротивление (или импеданс) наряду с емкостью является важной характеристикой внутреннего состояния свинцово-кислотной АКБ.

Проведен анализ изменения внутреннего импеданса от частоты напряжения заряда (рис. 6). Данная зависимость может помочь в выборе методов и режима заряда свинцово-кислотной АКБ.

В работе была проанализирована экспериментальная установка из [8] и проведен статистический анализ полученных данных (рис. 8). По результатам статистического анализа выполнен расчет коэффициента корреляции  $K_{r,C}$  между внутренним сопротивлением ( $r$ ) и емкостью ( $C$ ) АКБ 6СТ-190Л на основе полученных результатов (рис. 8). Корреляция между внутренним сопротивлением и емкостью оказалась равной  $-0,78$ , что свидетельствует о тесной обратной связи между внутренним сопротивлением и емкостью  $r/C$ . Коэффициент  $K_{r,C}$  может быть применен для контроля качества АКБ в течение срока эксплуатации. При деградации АКБ ожидается повышение  $K_{r,C}$ .

## Литература

1. Стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Основные понятия, конструкция, режимы работы и области приме-

нения. Handbook (Part 1) Exide technologies. Edition 2, August 2006.

2. Никель-кадмиеевые и свинцово-кислотные аккумуляторы. Сравнение технологий. EnerSys, 2017.
3. ГОСТ Р МЭК 60285-2002. Аккумуляторы и батареи щелочные. Аккумуляторы никель-кадмиеевые герметичные цилиндрические. Введ. 01.07.2003. М.: Изд-во стандартов, 2003.
4. ГОСТ Р МЭК 60896-21-2013. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Часть 21. Типы с регулирующим клапаном. Методы испытаний. Введ. 22.11.2013. М.: Стандартинформ, 2014.
5. ГОСТ 26881-86Е. Аккумуляторы свинцовые стационарные. Общие технические условия. Государственный комитет СССР по стандартам. М., 1986.
6. ГОСТ Р 53165-2008. Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники. Общие технические условия. Введ. 01.07.2009. М.: Стандартинформ, 2009.
7. Алешкин А. А., Бубнов Ю. И., Протопопов В. Х., Ягнятинский В. М. Метод оперативной диагностики основных эксплуатационных параметров свинцовых аккумуляторов (батарей). Материалы 9-й международной конференции по свинцово-кислотным аккумуляторам LABAT 2014. Sofia: Lead-Acid Batteries Department institute of Electrochemistry and Energy Systems, Bulgarian Academy of Sciences, 2014.
8. Постников А. А. Экспериментальное исследование изменения внутреннего сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 5.
9. Русин А. И., Кудрявцев А. А. Свинцовые аккумуляторы. Теория, конструкция, технология, эксплуатация, утилизация, экология. СПб, 2021.
10. Павлов Д. Свинцово-кислотные аккумуляторы: теория и технология. Справочник по технологии свинцово-кислотных аккумуляторов и ее влияния на продукцию. Пер. с анг. к. х. н. Буков К. Г., к. т. н. Ягнятинский В. М. 2-е изд. 2019.

## IGBT-модули 1200 В 600–900 А от AMG Power



Компания AMG Power расширила линейку IGBT-модулей 1200 В двумя модулями 12-го класса — на 600 и 900 А.

Применение модулей:

- управление приводами;
- инверторы солнечных панелей;
- преобразователи высокой мощности;
- ИБП.

Партномер	Напряжение $V_{CES}$ , В	Ток $I_C$ , А	Корпус	Топология
AMG600G1200MED	1200	600	Econodual	полумост
AMG900G1200MED	1200	900	Econodual	полумост

Преимущества:

- низкое напряжение насыщения коллектор-эмиттер:  $U_{CE(sat)} = 1,5$  В (при  $+25^{\circ}\text{C}$ );
- затвор IGBT-чипа по технологии МРТ (micro-pattern trench);
- низкие потери при переключении;
- надежность RBSOA;
- низкие потери при обратном восстановлении;
- низкое значение индуктивности:  $L_{sCE} = 20$  нГн.

<https://macrogroup.ru/>

# Электродвигатели в автомобилестроении

**Электродвигатели нашли широкое распространение в самых разных отраслях техники, и в этой публикации мы обсудим их применение в автомобилестроении. Поскольку в одной из предыдущих статей мы уже рассказывали о приводах в робототехнике, то пропустим этап производства и сразу перейдем к применению электродвигателей в автомобилестроении.**

**Современный автомобиль уже не обходится без тягового электродвигателя или тяговых мотор-колес, обеспечивающих движение транспортного средства, но данную тему мы затронем лишь по касательной. В статье речь пойдет об электродвигателях и сервоприводах, расположенных в разных узлах и системах автомобиля. В большинстве современных автомобилей имеется десять приводных узлов, которые в том числе оснащены высокоточными датчиками обратной связи и современной управляющей электроникой.**

**Дмитрий Аверичев<sup>1</sup>**

**Юлия Березина<sup>1</sup>**

*sales@inelso.ru*

**С**амый главный агрегат, без которого немыслимо движение автомобиля с ДВС, — бензонасос высокого давления. Он представляет собой электрическую помпу, способную создавать давление до 200 бар. Основным исполнительным механизмом помпы является плоский многополюсный высокооборотный бесколлекторный двигатель. Его скорость вращения зависит от нажатия на педаль газа. Высокооборотные двигатели Assun Motor, поставляемые компанией «ИНЕЛСО», могут работать в агрессивной среде бензонасоса.

Далее мы можем рассмотреть работу компрессора и турбины, так называемый турбонаддув, — это также моторизованный элемент двигателя, где применяется высокооборотный мотор. Данная система нужна для увеличения мощности и динамики малолитражных двигателей. Главная задача турбонагнетателя — подавать воздух высокого давления и отводить выхлопные газы. Автомобиль может иметь две турбины — для низких оборотов и для высоких, чтобы сохранять динамику во всем диапазоне оборотов.

Другая система, существующая в современных автомобилях, — это АБС (антиблокировочная система, англ. Anti-lock braking system, ABS), позволяющая сохранять управление машиной в случае резкого торможения. В ней электродвигатель обеспечивает корректную циркуляцию тормозной жидкости. Электрический двигатель работает как насос, создавая давление жидкости во время работы насоса и убирая давление, когда оно не требуется. Таким образом происходит движение тормозных колодок. При работе АБС число ударов тормозных колодок о тормозной диск доходит до 180 в минуту. Главным

требованием к двигателям в системе АБС является их быстрый разгон, в связи с чем в ней применяются в основном высокодинамичные двигатели.

В настоящее время электродвигатели используются и в рулевой рейке: раньше это была гидравлическая система, передающая усилие с рулевого колеса на кулики передних колес, что обеспечивало поворот транспортного средства в нужную сторону. Пример такой системы показан на рис. 1.

Но поскольку у этой системы есть существенные недостатки — сложность и громоздкость, ведь необходимо протягивать рейку от руля до оси вращения передних колес, то в настоящее время все чаще при-



**Рис. 1. Гидравлическая рулевая рейка**

меняют электрические рулевые рейки (или, как их еще называют — электроусилитель рулевого управления, ЭРУ, англ. Electric Power Steering, EPS), ее структурная схема показана на рис. 2.

Принцип работы данной системы основан на установке датчиков положения (энкодеров) на руле и на оси колес. Датчики угла вращения производства Fenac Technology могут отличнно справиться с такой задачей. При повороте руля водителем датчик фиксирует изменения угла положения и передает сигнал на общий блок управления. С блока управления сигнал поступает на сервопривод, который приводит в действие механическую передачу «шестерня — рейка», изменяющую положение оси колес. Изменение угла наклона оси также фиксируется датчиком, сигнал от которого поступает также в контроллер, то есть данная система является замкнутой (англ. Closed-loop control system). Описанный вид рулевой рейки обладает рядом неоспоримых преимуществ перед своим гидравлическим предшественником — она значительно тише, проще в обслуживании и ее работа более плавная. К недостаткам относятся более высокая стоимость и невозможность использования на тяжелых транспортных средствах из-за малой мощности. На рис. 3 наглядно показаны механические передачи ЭРУ.

В данной системе электродвигатель может передавать усилие либо на вал рулевого колеса, либо на рулевую рейку. В первом случае двигатель встроен в рулевую колонку, и передача усилия на вал осуществляется с помощью механической передачи. Но большую популярность приобрел второй вариант, который также получил название электромеханического усилителя рулевого управления (ЭМУР).

Для применения в этом узле подойдут высокомоментные двигатели от производителя Assun Motor.

Электродвигатель может устанавливаться непосредственно в руль, если автомобиль оснащен системами автоматизации, например функциями сохранения полосы или автопарковкой. Как правило, в такую систему входит видеокамера, захватывающая изображение перед автомобилем и оцифровывающая его, инфракрасные датчики для обработки изображения в темное время суток (в некоторых случаях присутствуют и лазерные датчики), общий блок управления, подрулевой переключатель для информирования системы об изменении полосы движения, а также исполнительные механизмы, к которым в зависимости от типа системы могут относиться системы оповещения (вибромотор в руле, контрольная лампа и др.) или системы корректировки траектории (электродвигатель). Системы контроля полосы делятся на две основные группы:

- LKS (Lane Keeping System — система сохранения полосы) — данный вид систем способен вернуть автомобиль в нужную полосу независимо от водителя, если он не реагирует на сигналы и предупреждения.
- LDS (Lane Departure System — система покидания полосы) — система только информирует о выезде транспортного средства из полосы движения.

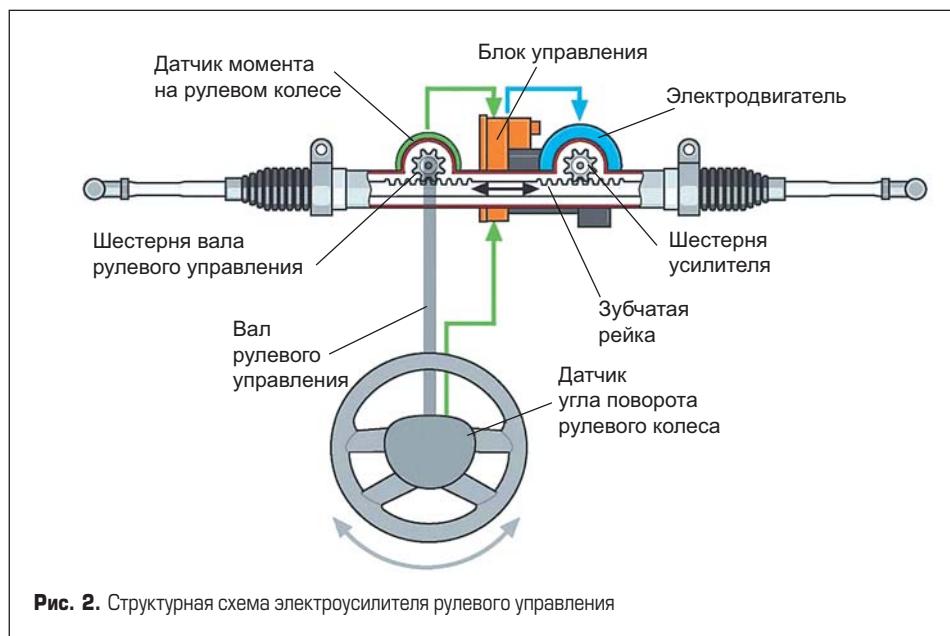


Рис. 2. Структурная схема электроусилителя рулевого управления

Система работает следующим образом: датчики получают данные о дорожной разметке в режиме реального времени, после чего эти данные поступают в блок управления, где обрабатываются для дальнейшего использования. Если автомобиль начнет отклоняться от выбранной полосы (самопроизвольно или водитель не включил перед перестроением сигнал поворота), то программа сочтет это отклонением. Как правило, после этого следует предупреждающий сигнал, например звуковой или вибрационный. На данном этапе работа системы LDS заканчивается. Однако если в автомобиле установлена система LKS и водитель не реагирует на сигналы системы, то с контроллера поступает сигнал на электродвигатель, поворачивающий руль на угол, необходимый для выравнивания транспортного средства. Здесь также устанавливается электрическая рулевая рейка, и сигнал с датчика на оси поступает все в тот же общий блок управления. Таким образом, контроллер обрабатывает данные с датчиков, установленных у руля, на валу колес и в системе камер, что

позволяет автомобилю определять и корректировать свое положение. В этой системе обязательно устанавливаются датчики по току, отключающие подачу питания на электродвигатель в том случае, если водитель, не отключив систему, снова начал управлять транспортным средством вручную. Когда на датчик двигателя поступает информация о препятствии (в данном случае — о руках человека на рулевом колесе), двигатель должен увеличить значение крутящего момента для его преодоления, что может привести к травме. Одновременно с повышением крутящего момента повышается ток. Как только ток достигает порогового значения, срабатывает другой датчик и питание отключается, двигатель останавливается. Это позволяет избежать травмы человека при неправильной эксплуатации данной системы.

Также сервоприводы присутствуют в системе позиционирования зеркал. Как правило, для перемещения зеркал в вертикальной и горизонтальной плоскости в устройстве механизма установлены два сервопривода

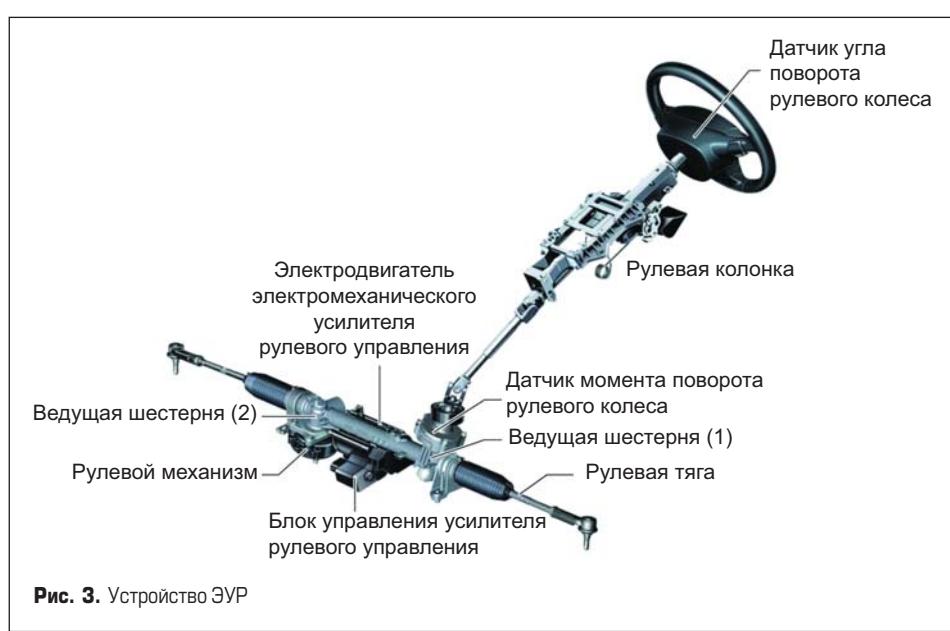


Рис. 3. Устройство ЭРУ

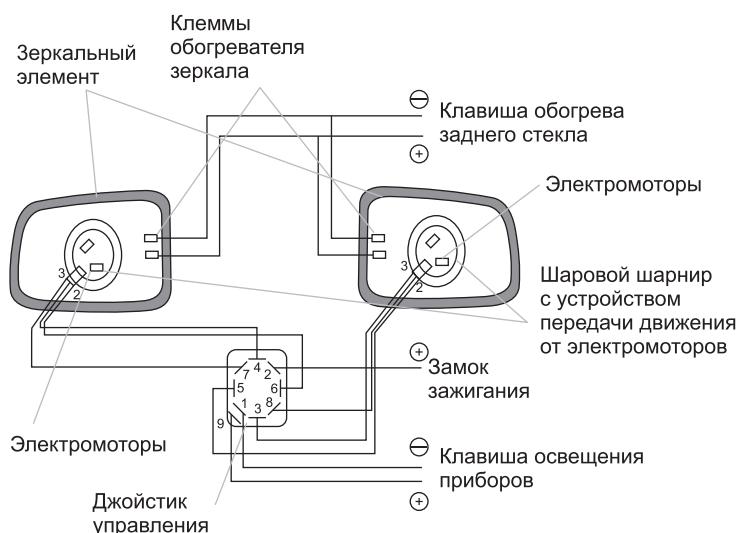


Рис. 4. Электродвигатели в системе позиционирования зеркал

с различными механическими передачами (например, червячной, шарико-винтовой или прямозубой). На рис. 4 показана принципиальная схема подключения сервоприводов, расположенных в зеркалах. Датчики положения, входящие в систему, могут быть любой точности, поскольку каждый водитель настраивает положение зеркал в соответствии со своими требованиями.

Если зеркало оснащено функцией автоматического складывания, то в нем присутствует еще один сервопривод, в состав которого входят электродвигатель и датчик-концевик. В зеркалах необходимо устанавливать небольшие двигатели с высокими значениями моментных характеристик, поскольку при начале движения конструкции может быть необходимо преодолеть какое-то сопротивление (например, на морозе за ночь лед). Концевые выключатели в этом случае используются для контроля движения зеркала в установленных пределах, не допуская чрезмерного отклонения их опоры.

В приводах позиционирования зеркал можно также использовать двигатели Assun Motor.

В устройство дворников, или, как их более корректно принято называть, стеклоочистителей, входит миниатюрный электропривод с редуктором, механическая энергия с которого поступает на рычажный механизм или червячную передачу, в свою очередь обеспечивающие движение дворников. В составе данной системы также имеются датчики-концевики, но если в зеркалах они предназначены для предотвращения повреждения самих зеркал, то здесь они необходимы для остановки стеклоочистителей в одном из крайних боковых положений, а не посреди лобового стекла. Привод дворников с червячным редуктором показан на рис. 5.

При включении дворников с помощью подрулевого переключателя электродвигатель начинает вращаться со скоростью, необходимой для обеспечения скорости движения дворников, которую задал водитель. С двигателя



Рис. 5. Привод стеклоочистителей с червячным редуктором

крутящий момент поступает на редуктор, откуда потом передается на трапецию, преобразующую вращательное движение в возвратно-поступательное, а затем уже с помощью тяг усилие передается на стеклоочистители.

Приводы должны быть не мощными, но достаточно компактными, и, как правило, в таком узле установлены коллекторные двигатели.

Поскольку данный узел предполагает использование редуктора, то допустимо взять двигатели Assun Motor с относительно небольшими значениями крутящего момента. Assun Motor также производит планетарные и угловые редукторы, совместимые с их двигателями.

Еще одной важной системой, без которой невозможно представить современный автомобиль, является система отопления и вентиляции. Основа этой системы — отопительный блок, в чей состав входит радиатор, система клапанов и заслонок, а также электровентилятор, который гонит теплый или холодный воздух по системе патрубков. Именно для работы вентилятора и необходим электродвигатель. В данной системе используются отдельно двигатель без редуктора, поскольку его единственной задачей является вращение лопастей вентилятора — здесь не требуется высокий момент, но нужны высокие значения скорости.

Двигатели для системы отопления и вентиляции могут быть как отдельными, так и сразу совмещенными с крыльчаткой. Скорость вращения двигателя и, соответственно, вентилятора управляет либо вручную с помощью регулятора, либо автоматически, если в автомобиле присутствует опция климат-контроля. Для работы такой системы в салоне устанавливаются дополнительные датчики температуры. Помимо изменения скорости вращения вентилятора и интенсивности работы радиатора, система автоматически контролирует положение заслонок и изменяет направление циркуляции воздуха в салоне. Для этого в устройство заслонок и дефлекторов входят электродвигатели, обеспечивающие подвижность самих узлов.

Электродвигатели в системе вентиляции и отопления могут быть как с одним выходным валом, так и с двумя, в этом случае крыльчатки монтируются сразу с двух сторон. Электродвигатель и крыльчатка (или крыльчатки) образуют цельный узел — электровентилятор, который в зависимости от типа конструкции может быть осевым или центробежным. Осевой вентилятор — это привыч-



Рис. 6. Система отопления салона автомобиля



**Рис. 7.** Электровентилятор центробежного типа с двумя крыльчатками

ный всем вентилятор, формирующий поток воздуха вдоль своей оси. Однако в настоящее время они почти не используются, поскольку им на смену пришли центробежные вентиляторы. Они выполнены в виде колеса с большим количеством лопаток, и формируемый ими поток воздуха движется от оси колеса к его периферии, поскольку воздушный поток образуется за счет возникающих при вращении крыльчатки центробежных сил. Пример такого вентилятора показан на рис. 7, и в данном случае используется двигатель с двухсторонним валом и двумя крыльчатками.

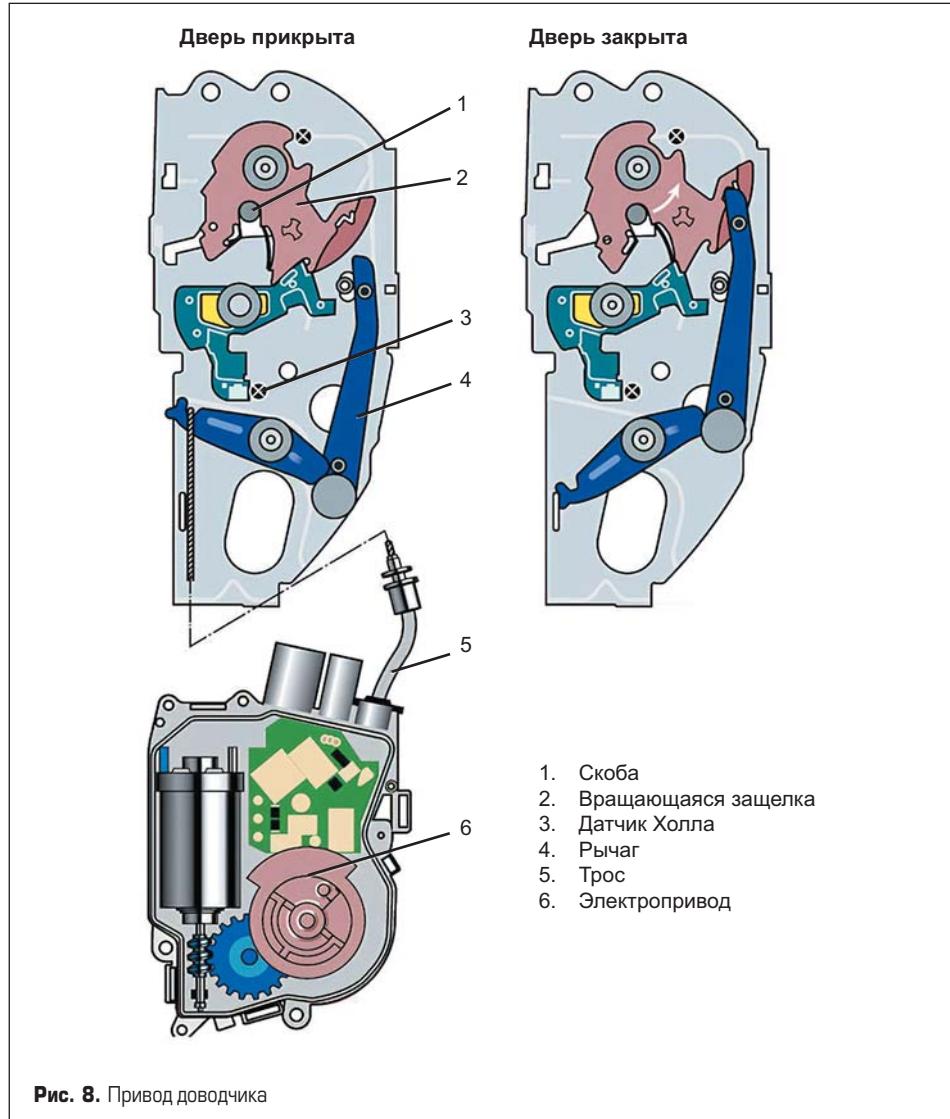
В настоящее время центробежные электровентиляторы применяются практически во всех транспортных средствах, так как обладают большей эффективностью при меньших габаритах.

В системе вентиляции используются преимущественно датчики Холла, определяющие скорость вращения вентиляторов и воздушного потока.

В автомобилях премиум-класса в двери устанавливаются доводчики, позволяющие закрыть дверь при минимально прикладываемом усилии, а также обеспечивающие плотное закрытие двери и улучшенную шумоизоляцию. Автодоводчики делятся на пневматические и электрические, но в состав обоих видов входят электродвигатели. В пневматических моделях с помощью электродвигателя в движение приводится вакуумный насос, через систему трубок соединенный с каждой дверью и багажником. Как только человек немного прикрывает дверь, но не захлопывает ее, срабатывает датчик, активирующий двигатель и, соответственно, насос. В трубках создается разряжение, и вакуумный элемент доводчика (пневмоцилиндр) притягивает дверь так, что она плотно «прилипает» к корпусу автомобиля. Подобная система применяется, например, в автомобилях класса люкс.

Некоторые производители используют не пневматические, а электрические приводы, и в этом случае на замке каждой из дверей размещается собственный электродвигатель, а не один общий. В целом данные модели функционируют похоже: при закрытии дверей срабатывает датчик, запускающий моторчик, который соединен с «притягивающим» механизмом червячным редуктором и шестеренками.

Для запуска и остановки работы двигателей в обоих видах доводчиков используются, как правило, датчики Холла, встроенные в замок двери. Двигатель запускается, когда дверь закрыта на «первый щелчок» замка, это позво-



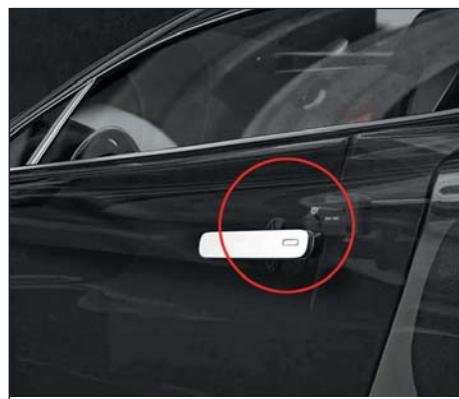
**Рис. 8.** Привод доводчика

ляет избежать случайного запуска привода, например при задевании двери. Соответственно, когда дверь плотно закрыта, тот же датчик останавливает двигатель. На рис. 8 показана схема работы электрического доводчика.

При закрывании двери врачающаяся защелка захватывает скобу. Как только это происходит, датчик Холла подает на контроллер сигнал о неплотном закрытии двери. Сигнал с контроллера поступает на электропривод, состоящий из двигателя и двухступенчатого

редуктора. Электропривод натягивает трос, и рычаг смещается. Рычаг давит на врачающуюся защелку, которая притягивает дверь на «второй щелчок» замка. Это фиксируется датчиком, и электропривод выключается.

В автомобилях премиум-класса двигатели также могут устанавливаться в ручки, что позволяет им выдвигаться из корпуса машины. На рис. 9 показана дверная ручка, красным выделен привод, а на рис. 10 показан внешний вид подобного привода.



**Рис. 9.** Автомобильная ручка с возможностью автоматического выдвижения



**Рис. 10.** Привод для автомобильной ручки

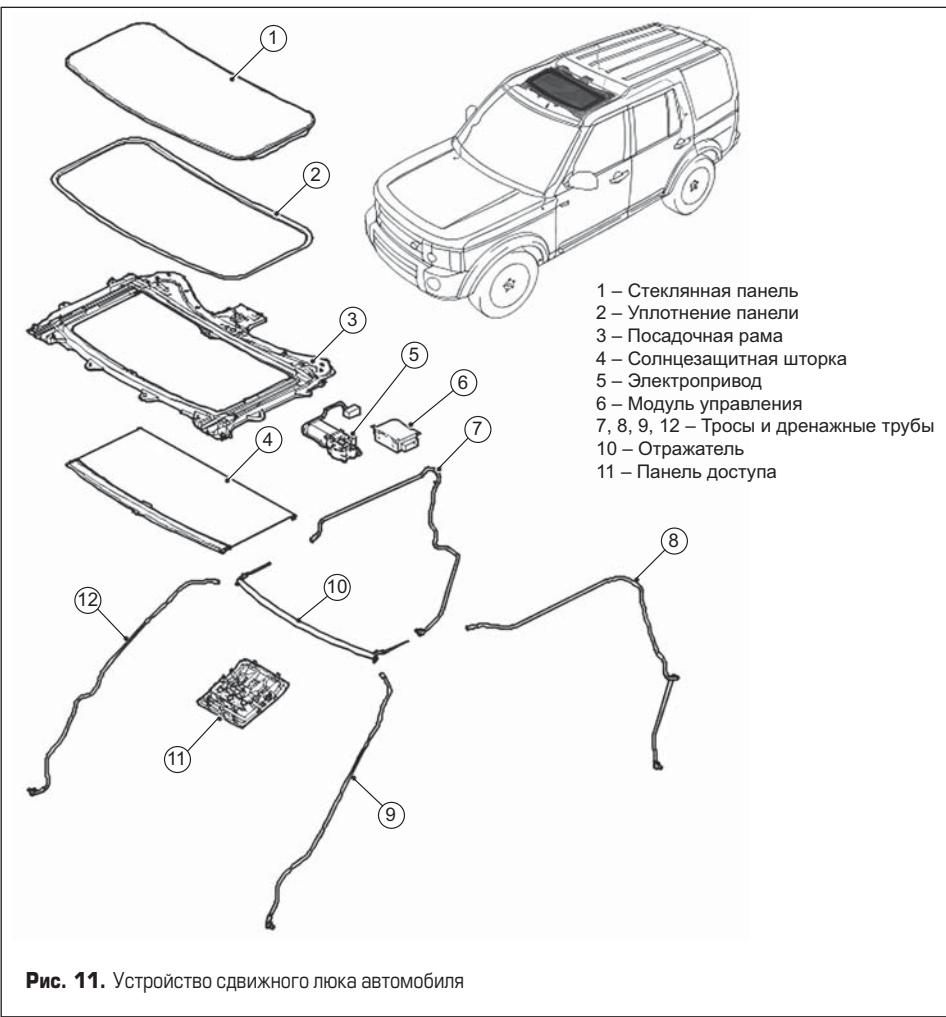


Рис. 11. Устройство сдвижного люка автомобиля

Как видно на рисунке, обычно в таких приборах используются миниатюрные электродвигатели, крутящий момент с которых передается на дверную ручку через цилиндрическую зубчатую передачу, что позволяет повысить значение крутящего момента и применять данную функцию даже в тяжелых условиях. Используемые датчики аналогичны тем, что установлены в системе автоматического сохранения полосы, — датчики по току, предотвращающие нанесение вреда людям при неправильной эксплуатации.

В автомобилях с люком в крыше добавляют с дополнительные оси с электроприводами,

необходимые для открытия люка. Такая система может быть реализована двумя способами:

- Сдвижное открытие люка: в этом случае крышка люка немного приподнимается, выходя из посадочной рамы, и сдвигается параллельно крыше автомобиля.
- Подъемное открытие люка: люк открывается как книжка — его задний край приподнимается вверх, пока передний остается на месте. Данный тип люков также может быть реализован двумя способами:
  - рычажное исполнение: крышка выталкивается вверх (распространено в общественном транспорте);

- винтовое исполнение: крышка постепенно поднимается с помощью червячной передачи.

Обе системы могут быть реализованы для открытия люка вручную (в этом случае в их устройстве нет электродвигателей, крышка люка просто двигается руками), но сейчас в подавляющем большинстве случаев используются именно электрические приводы. На рис. 11 показана схема устройства сдвижного люка.

В данном случае электродвигатель приводит в действие тросы, сдвигающие стеклянную панель вдоль двух алюминиевых направляющих. Привод устанавливается в задней части посадочной рамы. В его составе предусмотрен электродвигатель с редуктором и червячная передача, представляющая собой шестерню на выходном валу редуктора, находящуюся в зацеплении с витыми тросами. Смещаясь, трос подается в двухканальную разводку в раме, защищающую трос от заедания, а также снижающую уровень шума. Контроллер люка тоже устанавливается на раму и подключается к электродвигателю и к электрической системе автомобиля. Дренажные шланги необходимы для отвода воды, которая может скапливаться в раме люка. Солнцезащитная шторка, находящаяся в салоне, как правило, перемещается вручную, но есть и автомобили, где ее открытие также осуществляется с помощью привода, и в этом случае будет необходимо устанавливать уже два электродвигателя.

Некоторые машины, называемые кабриолетами, оснащены полностью открывающейся (как правило, складывающейся) крышей, и для этого тоже понадобятся приводные системы.

В данную систему входят следующие модули:

- Стеклянная сдвижная крыша (собственно, это модуль, выполняющий роль люка).
- Сегмент M, в котором находится центральная рама всей крыши, а также установлен электропривод для открывания сдвижного люка.
- Сегмент C, в который входит заднее стекло, а также два привода (левый и правый), соответствующих продольным балкам крыши, фиксаторы и две пары гидравлических цилиндров.

Единственный электропривод в такой системе применяется для открытия сдвижного люка, механизм полного открытия крыши реализован исключительно на гидравлических приводах. В более простых моделях кабриолетов, как правило, с менее жесткими крышами, механизм может быть реализован так, как показано на рис. 13.

Эта система значительно проще, поскольку состоит из одного электропривода, приводящего в действие шарнирные сочленения, скла-

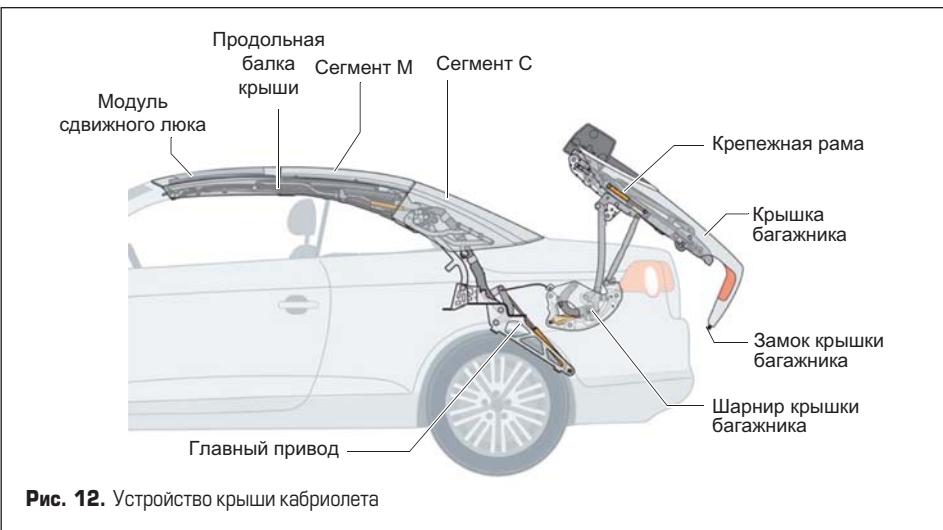


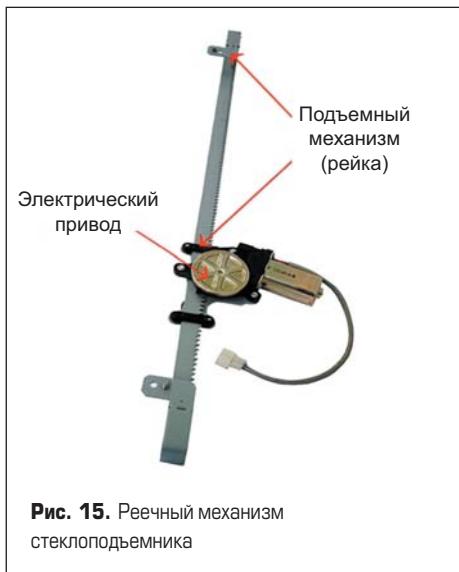
Рис. 12. Устройство крыши кабриолета



Рис. 13. Устройство крыши кабриолета с электроприводом



**Рис. 14.** Тросовый механизм стеклоподъемника



**Рис. 15.** Реечный механизм стеклоподъемника



**Рис. 16.** Рычажный механизм стеклоподъемника

дывающие крышу, но также обладает рядом недостатков, в частности более низкой защищай от погодных условий и загрязнений.

Таким образом, и у гидравлического, и у электромеханического привода кабриолетов есть свои достоинства и недостатки, поскольку гидравлический привод устанавливают в более жестких и надежных крышах, но при этом такая система существенно дороже и сложнее в исполнении. Электромеханические же приводы значительно дешевле, но менее надежны и не подходят для жестких крыш, поэтому они устанавливаются преимущественно в странах с теплым климатом (в частности, подобные автомобили были широко распространены в 1930–1960-е годы в США, поскольку климат там был значительно мягче, чем в Европе — на родине кабриолетов).

Еще один механизм, присутствующий в каждом современном автомобиле, — стеклоподъемник, позволяющий поднимать и опускать стекла боковых (дверных) окон. Мы не будем останавливаться на устройстве стеклоподъемника с механическим приводом, а рассмотрим только с электрическим.

Механизм подъема может быть одного из трех типов:

- тросовый;
- рычажный;
- реечный.

На рис. 14–16 показано устройство всех типов подъемных механизмов с комментариями об их устройстве.

Данный стеклоподъемник состоит из привода, подвижного гибкого элемента (как правило, троса, но иногда также могут использовать цепь или зубчатый ремень), кронштейна для стекла и системы направляющих роликов. С вала редуктора усилие передается на зубчатую передачу, которая связана с приводным роликом, обеспечивающим поступательное движение троса. Для фиксации стекла в нужном положении предусмотрен пружинный стопорный механизм.

Этот тип подъемного механизма имеет наиболее простое устройство: с сервопривода крутящий момент передается на ведущую шестерню, которая начинает перемещаться вдоль рейки вместе с кареткой, где закреплено стекло.

Рычажный механизм состоит из приводного механизма, системы рычагов и кулисы с кронштейном крепления стекла. С выходного вала редуктора крутящий момент передается на ведущую шестерню, а затем подается на зубчатый сектор и преобразуется в поступательное движение рычага. Противоположная сторона рычага толкает кулису, на которой установлено стекло, а рычаг перемещается по пазу кулисы.

Во всех трех случаях в состав механизма входит привод, состоящий из электродвигателя и редуктора. Также в составе системы обязательно должны присутствовать датчики, позволяющие отключить питание не только при достижении стеклом одного из крайних положений, но и при воздействии сил, мешающих движению (например, в случае, если ребенок попробует пальцами остановить стекло), что позволит избежать травм.

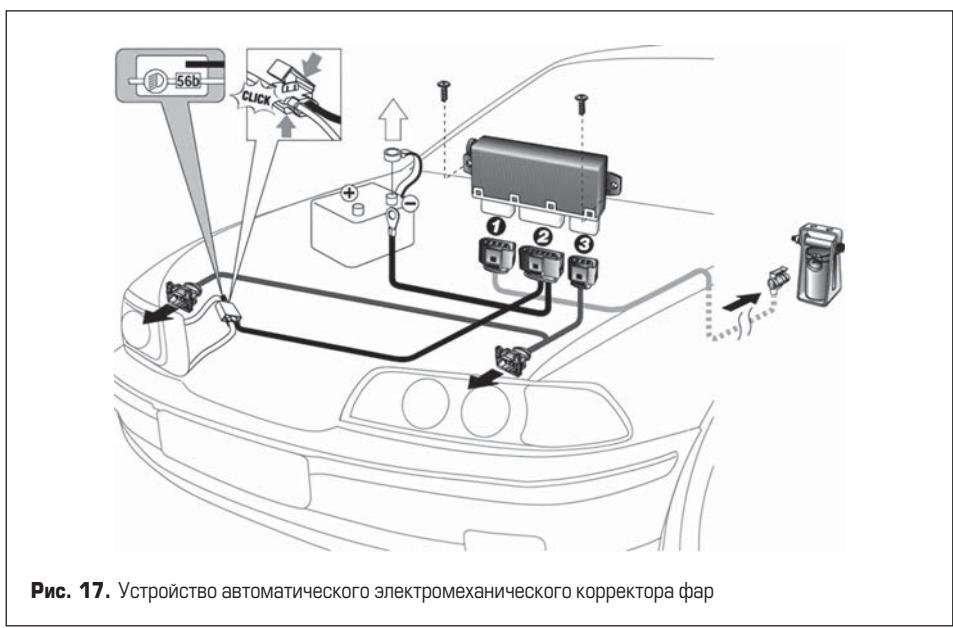
Для защиты от солнечного света многие автомобили оснащены шторками на окнах. Изначально предполагалось, что их нужно будет открывать и закрывать вручную, но постепенно эта система была автоматизирована. Как правило, электрические шторки расположены на алюминиевых направляющих,

перемещение по которым осуществляется с помощью электродвигателя.

Еще одна система, в которой могут устанавливаться миниатюрные сервоприводы, — фары, а если точнее, корректор фар. Это узел, позволяющий скорректировать направление лучей света. При включении ближнего света световые потоки должны быть направлены вниз и освещать дорожное полотно, но не слепить водителей встречных автомобилей. Однако при изменении положения корпуса машины в пространстве световой поток может сместиться — например, при чрезмерной загрузке багажника, что приведет к тому, что он будет ближе к земле. Для этого и нужен корректор фар, позволяющий в ручном (хотя данный вид уже почти вышел из употребления) или автоматическом режиме регулировать положение наклона фар. И, как и большинство других подобных систем в автомобиле, корректоры фар могут быть гидравлическими и электромеханическими. Гидравлические корректоры регулируются только в ручном режиме, а вот электромеханические могут управляться как водителем, так и электроникой.

Ручной электромеханический корректор состоит из регуляторов, кабелей и сервоприводов, в состав каждого из которых входят электродвигатель и червячная передача, преобразующая вращательное движение в поступательное. Шток сервопривода имеет шаровое соединение с фарой и путем подъема и отпускания изменяет ее наклон.

На рис. 17 показано устройство автоматического электромеханического корректо-



**Рис. 17.** Устройство автоматического электромеханического корректора фар



**Рис. 18.** Разрез автомобильного кресла

ра фар. В его состав входят более сложные компоненты, такие как электронный блок управления (контроллер), сервоприводы фар и датчики дорожного просвета (датчики положения кузова).

Угол наклона фар регулируется на основе полученных с датчиков данных об угле наклона кузова, для этого используются преимущественно рычажные датчики, состоящие непосредственно из датчика, жестко закрепленного на кузове, и тяги, установленной на подвеске. Ход подвески через тягу передается датчику, благодаря чему определяется угол наклона кузова.

Используемые датчики бывают двух видов:

- потенциометрические;
- датчики Холла.

Как правило, используется не один датчик, а сразу несколько: один на задней оси кузова и один или два на передней. Применение двух датчиков на передней оси учитывает не только общую нагрузку, но и вес водителя.

Данные с датчиков поступают на контроллер, который определяет, на какой угол отклонился кузов, и подает сигнал на электродвигатели в приводах фар. Сами сервоприводы аналогичны используемым в ручных электромеханических корректорах.

Все уже привыкли к тому, что передние кресла можно отрегулировать под себя. Здесь также регулировка может осуществляться вручную, когда человек физически прикладывает усилие и сдвигает, или поднимает, или опускает кресло или подголовник, используя расположенные внутри кресла механические передачи, однако все эти перемещения могут быть выполнены электромеханическими, что позволяет человеку просто нажать на кнопку для регулировки положения сиденья. Автомобили различных производителей имеют разные регулировки, но полный список всех регулировок в машинах премиум-класса выглядит следующим образом:

- продольное перемещение;
- вертикальное перемещение;
- угол наклона спинки;
- для составных спинок:
  - угол наклона верхней части спинки,
  - высота и вылет поясничной поддержки;
- угол подъема подголовника;
- вылет подголовника;
- складывание сидений.

Кроме того, многие современные автомобили оснащены системой вентиляции кресел. На рис. 18 показан разрез кресла, где красным выделены миниатюрные электровентиляторы.

Для работы таких вентиляторов используются электродвигатели без редуктора, поскольку они должны обеспечивать высокую скорость вращения при низком уровне шума.

## Литература

1. [www.inelso.ru/proizvoditeli/assun-motor/](http://www.inelso.ru/proizvoditeli/assun-motor/)
2. [www.inelso.ru/proizvoditeli/fenac/](http://www.inelso.ru/proizvoditeli/fenac/)
3. [www.drive2.ru/b/1955764/](http://www.drive2.ru/b/1955764/)
4. [www.techautoport.ru/hodovaya-chast/\\_rulevoe-upravlenie/gidrousilite.html](http://www.techautoport.ru/hodovaya-chast/_rulevoe-upravlenie/gidrousilite.html)
5. [www.auto.today/bok/16822-elektricheskaya-rulevaya-reyka-princip-raboty-obsluzhivanie-i-remont.html](http://www.auto.today/bok/16822-elektricheskaya-rulevaya-reyka-princip-raboty-obsluzhivanie-i-remont.html)
6. [www.kolesa.ru/article/shestereni-moroz-i-voda-kak-ustroen-privod-zerkal-i-kak-ego-mozhno-ili-nelzya-slomat](http://www.kolesa.ru/article/shestereni-moroz-i-voda-kak-ustroen-privod-zerkal-i-kak-ego-mozhno-ili-nelzya-slomat)
7. [www.autoopt.ru/articles/products/187342422](http://www.autoopt.ru/articles/products/187342422)
8. [www.motorpage.ru/faq/stekloochistiteli\\_ustrojstvo\\_i\\_princip\\_raboti.html](http://www.motorpage.ru/faq/stekloochistiteli_ustrojstvo_i_princip_raboti.html)
9. [www.journal.tinkoff.ru/guide/pogoda-v-avto/](http://www.journal.tinkoff.ru/guide/pogoda-v-avto/)
10. [www.motorpage.ru/faq/sistema\\_podachi\\_vozduha\\_v\\_salon\\_avtomobilja.html](http://www.motorpage.ru/faq/sistema_podachi_vozduha_v_salon_avtomobilja.html)
11. [www.autoopt.ru/articles/products/128635904](http://www.autoopt.ru/articles/products/128635904)
12. [www.carwow.ru/dovodchiki-dverej-v-avtomobile/](http://www.carwow.ru/dovodchiki-dverej-v-avtomobile/)
13. [www.zr.ru/content/articles/920068-zatvori-potikhonku-kalitku/](http://www.zr.ru/content/articles/920068-zatvori-potikhonku-kalitku/)
14. [www.zwgearbox.com/automobile-drive/car-flush-door-handle-motor](http://www.zwgearbox.com/automobile-drive/car-flush-door-handle-motor)
15. [www.infocar.ua/term\\_luk.html](http://www.infocar.ua/term_luk.html)
16. [www.lrman.ru/discovery/3/carcass/sunroof\\_description\\_roof\\_hatch](http://www.lrman.ru/discovery/3/carcass/sunroof_description_roof_hatch)
17. [www.drivevaz.ru/steklopodemniki-lada-kalina/](http://www.drivevaz.ru/steklopodemniki-lada-kalina/)
18. [www.avto.pro/autonews/kak\\_vibrat\\_steklopodemniki-20170501/](http://www.avto.pro/autonews/kak_vibrat_steklopodemniki-20170501/)
19. [www.autoopt.ru/articles/products/24402959](http://www.autoopt.ru/articles/products/24402959)
20. [www.avtoall.ru/article/3827372/](http://www.avtoall.ru/article/3827372/)
21. [www.extxe.com/18402/sidenja-i-podgolovniki-sovremenno-go-avtomobilja/](http://www.extxe.com/18402/sidenja-i-podgolovniki-sovremenno-go-avtomobilja/)
22. [https://extxe.com/18402/sidenja-i-podgolovniki-sovremenno-go-avtomobilja/](http://www.extxe.com/18402/sidenja-i-podgolovniki-sovremenno-go-avtomobilja/)

## AC/DC-источники питания 130–500 Вт с кондуктивным охлаждением промышленного применения от Traco Power



Компания Traco Power выпустила линейку AC/DC-источников питания с кондуктивным охлаждением мощностью 130–500 Вт с усиленной системой изоляции 4250 В переменного тока — серии TCI 130, TCI 240 и TCI 500 (U). Представленная линейка устройств способна максимально

повысить эффективность систем с кондуктивным охлаждением, поскольку обеспечивает превосходные температурные характеристики при монтаже на металлическом корпусе или опорной плате. Таким образом, серия TCI может выдавать до 100% максимальной выходной мощности без использования вентилятора.

КПД до 94% позволяет серии TCI работать при температуре  $-30\ldots+50^{\circ}\text{C}$  без снижения мощности или до  $+80^{\circ}\text{C}$  при снижении мощности либо при принудительном охлаждении. Данная серия соответствует требованиям OVC III и может работать на высоте до 5000 м. Активная коррекция коэффициента мощности и характеристики электромагнитной совместимости дают возможность применения в промышленности, автоматизации, тестировании и измерениях.

Основные параметры источников питания переменного тока серии TCI:

- подход к проектированию с кондуктивным охлаждением;
- работа без вентилятора с выходной мощностью до 100%;
- диапазон рабочих температур:  $-30\ldots+80^{\circ}\text{C}$ ;
- усиленная изоляция: 4250 В переменного тока между входом и выходом;
- категория перенапряжения: OVC III;
- КПД: до 94%;
- работает на высоте: до 5000 м;
- встроенный фильтр класса В по стандарту EN 55032;
- подготовлен к классу защиты II;
- гарантия: три года.

<https://macrogroup.ru/>

# Новые решения для ветроэнергетики

**Одной из главных задач XXI века является сдерживание глобального потепления, которое может привести к катастрофическим изменениям климата. Эта цель может быть достигнута только за счет резкого сокращения выбросов парниковых газов до конца середины столетия. По оценкам специалистов, в 2019 году производство энергии стало крупнейшим источником парникового эффекта и обусловило почти треть глобального мирового загрязнения.**

**Марсель Морисс  
(Marcel Morisse)<sup>1</sup>**

**Майкл Боссхардт  
(Michael Busshardt)<sup>1</sup>**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

Для решения глобальных проблем экологии необходимо безотлагательно создать инфраструктуру «чистой» энергетики, позволяющую снизить ее вклад в парниковый эффект. Широкое развитие ветроэнергетики является ключевым фактором на этом пути, и она уже занимает лидирующее положение. За последние 20 лет размеры ветротурбин увеличились втрое, благодаря этому их мощность значительно возросла и вскоре превысит отметку в 15 МВт. Соответственно продолжает увеличиваться потребность в высокоэффективных преобразователях для ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Конвертеры ВЭУ, работающие в суровых условиях окружающей среды, требуют высокого уровня надежности и гарантированно длительного срока службы. Они должны иметь большую плотность мощности, обеспечивающую увеличение энергетических показателей в условиях ограничения габаритов системы. Кроме того, для удовлетворения растущего спроса необходимо увеличение производственных мощностей. Не менее важна и модернизация существующих инверторов, помогающая сократить риски и время разработки.

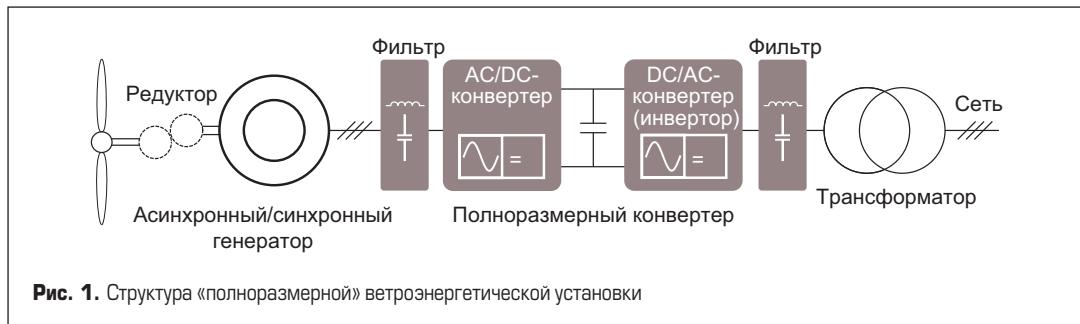
Для решения этих задач предназначены IGBT-модули в корпусе PrimePACK с чипами IGBT5.XT (FF1800R17IP5). С момента выпуска в 2016 году они уже стали промышленным стандартом для преобразователей ВЭУ. Сочетание передовых технологий промежуточных соединений и современных чипов

IGBT/FWD обеспечивает этим силовым ключам хорошие показатели надежности, а также высокую плотность мощности [1].

Тем не менее мировые глобальные проблемы требуют дальнейшего совершенствования полупроводниковых технологий. Принимая во внимание специфические условия эксплуатации современных ВЭУ, компания Infineon разработала два модуля IGBT, оптимизированных для этих условий. Применение новых силовых ключей позволяет сделать еще один шаг к повышению плотности мощности, используя при этом преимущества конструктива PrimePACK.

В статье описаны этапы процесса оптимизации силового преобразователя и прокомментированы основные моменты разработки. Особое внимание обращается на преимущества новых компонентов, обеспечивающих повышение производительности СЭУ. В конце рассматриваются другие приложения, которые могут извлечь выгоду от использования усовершенствованных модулей PrimePACK.

При анализе различных систем ВЭУ и сопутствующих отраслей промышленности четко прослеживается тенденция к модульному проектированию конвертерных блоков и их стандартизации. Такой подход удовлетворяет растущую потребность в повышении мощности при сокращении этапов разработки. Это позволяет использовать одни и те же унифицированные блоки для ВЭУ с более высокой номинальной мощностью. Однако из-за ограниченного пространства в гондоле ветротурбины приме-



<sup>1</sup>Infineon Technologies

нение большого количества силовых сборок может оказаться невозможным, поэтому необходимо повышать плотность мощности отдельных блоков.

Требования к электрическим характеристикам выходного конвертера (MSC — machine-side converter) и активного сетевого выпрямителя (LSC — line-side converter) в системе ВЭУ существенно различаются, что является еще одним ключевым аспектом разработки. Это особенно верно для «полноразмерной» преобразовательной системы, все узлы которой рассчитаны на полную мощность, показанной на рис. 1. Из-за перетока мощности от генератора к DC-шине чипы диодов в конвертере MSC подвергаются наибольшей нагрузке. С другой стороны, в конверторе LSC поток энергии, поступающий в AC-сеть, создает максимальную нагрузку для кристаллов IGBT.

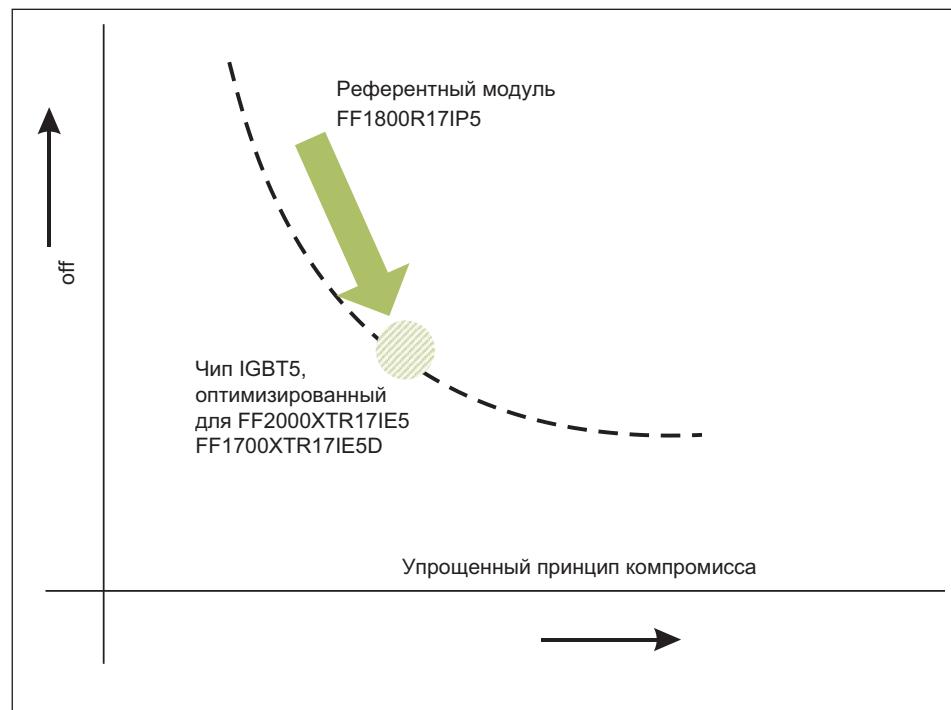
Для решения описанных выше задач на основе модуля FF1800R17IP5 разработаны два различных силовых ключа, оптимизированных в соответствии с конкретными особенностями генераторного и сетевого преобразователя. Основные этапы выработки требований и оптимизации этих двух систем обсуждаются в следующем разделе.

В ветроэнергетических системах использование высоких частот коммутации позволяет снизить потери в генераторе и обеспечить приемлемые размеры сетевого фильтра, позволяющие разместить его в шкафу конвертера. Как правило, частоты переключения в преобразователях ВЭУ значительно выше, чем у общепромышленных инверторов приводов с аналогичной номинальной мощностью.

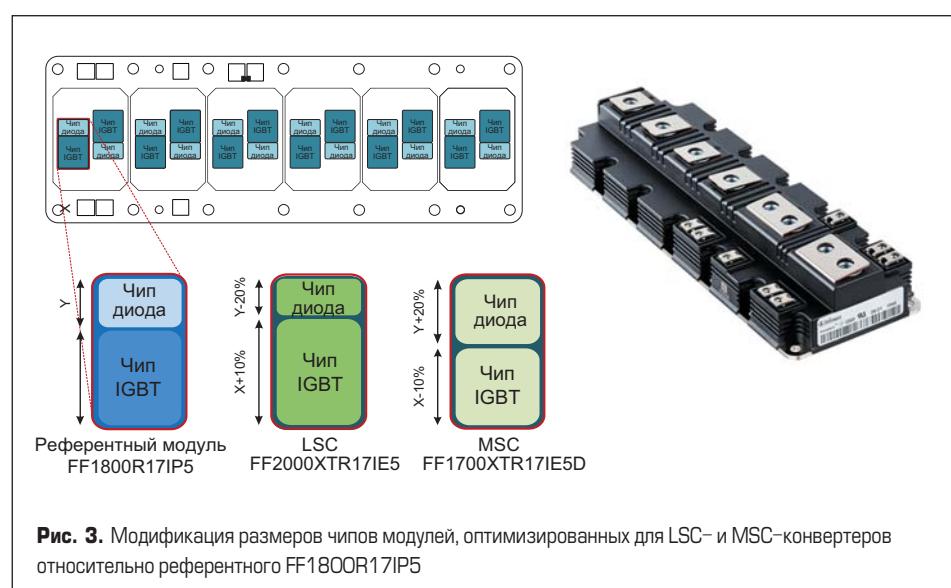
В данной связи важно отметить, что любая технология IGBT всегда представляет собой компромисс между потерями переключения и проводимости (рис. 2). В усовершенствованном чипе IGBT5 этот компромисс направлен на повышение частоты коммутации за счет снижения динамических потерь. Поскольку потери при переключении IGBT генерируются как в LSC- так и в MSC-конвертере, то оба варианта модуля были оптимизированы в соответствии с рабочими режимами конкретного устройства. Сопутствующее увеличение  $V_{CE,sat}$  частично компенсировано дополнительными конструктивными мерами [2, 3, 4], результаты показаны на рис. 2.

Дополнительной мерой повышения производительности модулей стала оптимизация их топологии. Были изменены размеры кристаллов для уменьшения потерь проводимости и улучшения теплопроводности чипов, которые подвергаются наибольшей нагрузке. Как показано на рис. 3, размер IGBT увеличен для модуля, предназначенного для установки в LSC, а в модуле, оптимизированном для применения в MSC, установлен больший диод. Эти два конструктивных усовершенствования привели к выпуску новых компонентов, обозначенных как FF2000XTR17IE5 (для LSC) и FF1700XTR17IE5D (для MSC).

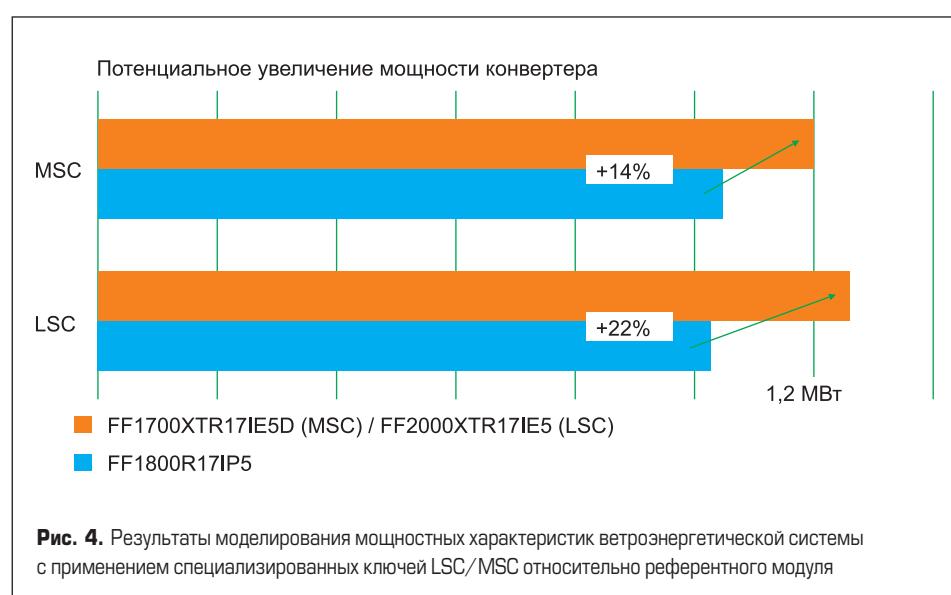
На рис. 4 продемонстрированы преимущества специализированных силовых ключей, предназначенных для применения в типовой



**Рис. 2.** Чип IGBT5 – компромисс в сторону уменьшения динамических потерь силовых модулей для LSC- и MSC-конвертеров



**Рис. 3.** Модификация размеров чипов модулей, оптимизированных для LSC- и MSC-конвертеров относительно референтного FF1800R17IP5



**Рис. 4.** Результаты моделирования мощностных характеристик ветроэнергетической системы с применением специализированных ключей LSC/MSC относительно референтного модуля

**Таблица 1.** Системные параметры конвертеров LSC (левая колонка) и MSC (правая колонка).

Напряжение DC-шины	1200 В	
Частота коммутации	5 кГц (DPWM1)*	5 кГц (DPWM0)*
Коэффициент модуляции M	0,9	1
Коэффициент мощности ( $\cos \phi$ )	0,9 (емкостная нагрузка)	0,8 (индуктивная нагрузка)
Номинальный ток $I_g$	900 А	1000 А
Номинальная активная мощность $P_g$	1 МВт	
Тепловое сопротивление «радиатор – окружающая среда» $R_{th(h-a)}$		21 К/Вт
Температура охладителя $T_{liquid}$		+40 °C

\*Параметры DPWM (ШИМ) в соответствии с [5]

ВЭУ. Соответствующие условия эксплуатации, для которых проведено моделирование, показаны в таблице 1. Отметим, что значительное увеличение мощности по сравнению с «референтным» решением, показанным на рис. 4, достигнуто путем простой замены силовых ключей без изменения остальных компонентов преобразователя и системы управления.

В данном случае максимальная «виртуальная» температура кристалла  $T_{vj,max}$  является предельным параметром, определяющим достижимую мощность преобразователя.

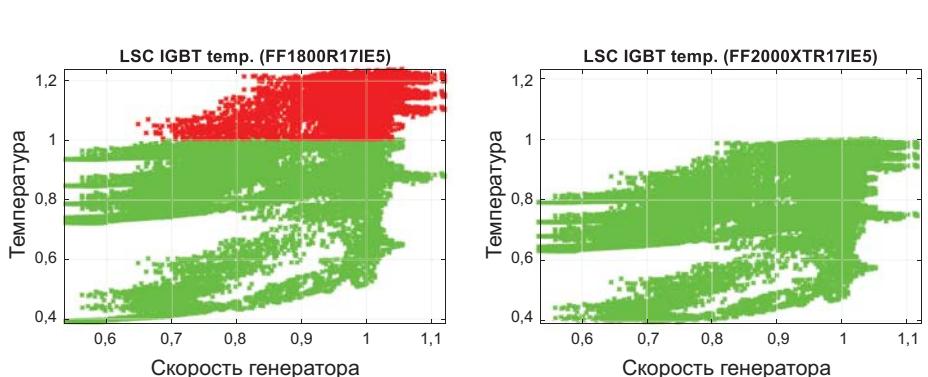
Для модулей PrimePACK с технологией IGBT5.XT этот показатель составляет +175 °C. Однако при моделировании температура была ограничена на уровне +145 °C, чтобы обеспечить необходимый запас по перегрузке.

Требования к сроку службы, учитывающие циклическую нагрузку силовых полупроводниковых модулей, являются еще одним ключевым фактором проектирования ветроэнергетических систем. Этот момент особенно важен из-за потенциально низких рабочих частот генератора в сочетании с изменяющи-

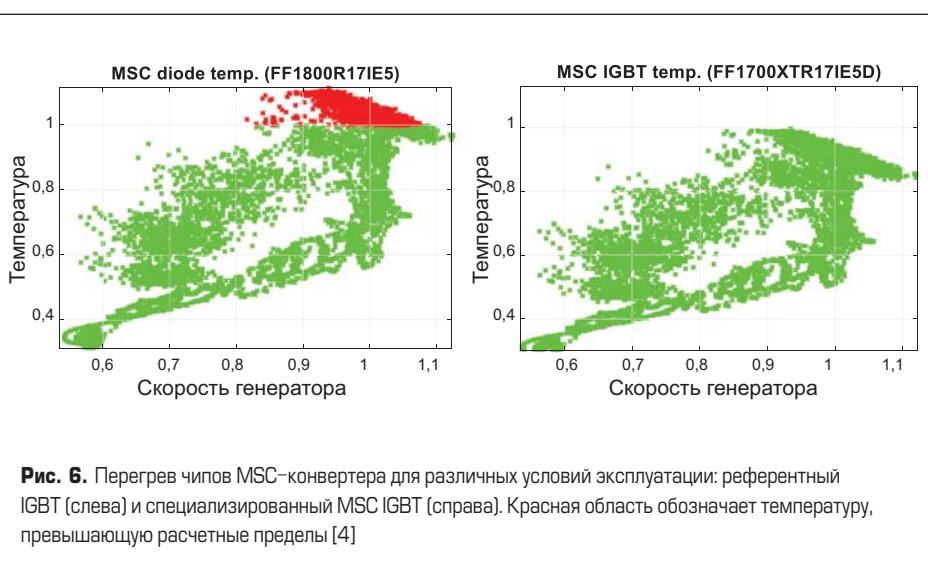
мися условиями ветра, врачающего ветротурбину. Однако для модулей PrimePACK, упомянутых в статье, это не является проблемой даже в условиях жесткого термоциклирования. Сочетание технологии промежуточных соединений .XT и чипов IGBT5 обеспечивает очень высокую устойчивость к циклическим нагрузкам [6].

Что касается преимуществ специализированных модулей FF2000XTR17IE5 и FF1700XTR17IE5D, то до сих пор мы рассматривали только одну стабильную рабочую зону. Для приближения к реальным условиям работы в [4] рассматривается матрица рабочих точек, полученных на основе различных сочетаний скоростей ветра и требований к сети, что создает целый набор режимов нагрузки для LSC- и MSC-конвертеров при различных скоростях генератора. В каждом конкретном режиме эксплуатации будут наблюдаться различные температуры кристаллов  $T_{vj,max}$ . На рис. 5 и 6 показано, как применение двух специализированных модулей значительно расширяет рабочий диапазон. Это достигается за счет снижения предельных температур чипов IGBT в LSC-конвертере на 25% и диодов в MSC-конвертере на 13% по сравнению с эталонным модулем.

В заключение отметим, что, хотя специализированные силовые модули, о которых говорится в статье, предназначены для использования в ветроэнергетике, они могут быть с успехом использованы и в других мощных системах с односторонним потоком энергии. В частности, повышение частоты переключения способствует снижению потерь в двигателе электропривода. Обратите внимание на то, что оба ключа были оптимизированы с учетом этого обстоятельства. Кроме того, FF1700R17IE5D с увеличенным размером диода может эффективно работать в активных сетевых конвертерах приводов или электролизеров.



**Рис. 5.** Перегрев чипов LSC-конвертера для различных условий эксплуатации: референтный IGBT (слева) и специализированный LSC IGBT (справа). Красная область обозначает температуру, превышающую расчетные пределы [4]



**Рис. 6.** Перегрев чипов MSC-конвертера для различных условий эксплуатации: референтный IGBT (слева) и специализированный MSC IGBT (справа). Красная область обозначает температуру, превышающую расчетные пределы [4]

## Литература

1. Infineon Technologies AG. “PrimePACK3+ B-series module FF1800R17IP5 datasheet, 2020”, v.3.5.
2. T. Laska et al. “The Field Stop IGBT Concept with an Optimized Diode”, 2000, PCIM, Nuremberg, Germany.
3. A. Stegner et al. “Next Generation 1700V IGBT and Emitter Controlled Diode with XT technology”, 2014, PCIM, Nuremberg, Germany.
4. M. Morisse et al. “System Evaluation and Optimization of Wind Converters Using Dedicated Power Modules for Line-side and Machine-side Converters”, 2023, PCIM Nuremberg, Germany.
5. D. Grahame Holmes et al. “Pulse Width Modulation for Power Converters”, 2003, IEEE Press, New Jersey, USA.
6. T. Methfessel et al. “Enhanced Lifetime and Power-Cycling Modelling for PrimePACK.XT Power Modules”, 2020, PCIM Europe digital, Germany.



# EXPO ELECTRONICA

26-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

16 – 18 АПРЕЛЯ 2024  
МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ, КРОКУС ЭКСПО



ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ,  
МОДУЛИ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ



ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ  
И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЭЛЕКТРОНИКИ



ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ



РОБОТОТЕХНИКА

NEW



ИТ- И ЦИФРОВЫЕ  
РЕШЕНИЯ

NEW



ПОЛУЧИТЕ БЕСПЛАТНЫЙ БИЛЕТ  
ПО QR КОДУ ИЛИ НА САЙТЕ  
[EXPOELECTRONICA.RU](http://EXPOELECTRONICA.RU)

по промокоду  
**EEMAGAZINE24**

# Перечень статей, опубликованных в журнале «Силовая электроника» в 2023 году

## Силовая элементная база

Новое поколение оптотиристоров серии ТО725-8-20-7 для поверхностного монтажа от АО «Оптрон-Ставрополь». Андрей Семенев. №1. Стр. 4.

Инновационные разработки отечественных многокристальных силовых модулей. Часть II. Металлокерамические силовые модули. Игорь Воронин, Павел Воронин, Евгений Лапин. №1. Стр. 6.

Современная силовая электроника: разворот на Восток и «доступная функциональность». Денис Новоторженцев, Андрей Колпаков. №1. Стр. 10.

Полумостовые силовые интегральные модули с 100%-ной защитой для встраиваемых инверторов. Альфред Хезенер (Alfred Hesener). Перевод: Иван Сергеев. №1. Стр. 14.

Новые технологии измерения тока для систем с силовыми приборами SiC и GaN. (Miho Onuma), Такахиза Шикама (Takahisa Shikama). Перевод: Иван Сергеев. №1. Стр. 18.

Радиационно стойкие *p*-канальные полевые транзисторы: простое и надежное энергоснабжение в космосе. Оскар Мансилья (Oscar Mansilla), Руши Патель (Rushi Patel), Мишель Лозада (Michelle Lozada). Перевод: Николай Бойправ. №2. Стр. 6.

Силовые биполярные приборы отечественного производства. Юлия Демидова, Александр Плотников, Алексей Хапугин, Алексей Гришанин. №2. Стр. 10.

Современная силовая электроника: разворот на Восток и «доступная функциональность». Часть 2. NOVOSENSE Microelectronics. Денис Новоторженцев, Андрей Колпаков. №2. Стр. 15.

Двухуровневый контроль скорости коммутации увеличивает запас по надеж-

ности в критических тепловых режимах. Вольфганг Франк (Wolfgang Frank), Никлас Тон (Niclas Thon). Перевод: Иван Сергеев. №2. Стр. 22.

Вперед и вверх! Драйвер для IGBT 65-го класса от АО «Ангстрем». Константин Шеремет. №2. Стр. 26.

Силовые модули для бортовых зарядных устройств. Корай Йылмаз (Koray Yilmaz), Кристофер Шефер (Christopher Schäfer). Перевод: Иван Сергеев. №2. Стр. 29.

TMR-сенсор против резистивного шунта: как поменялись их роли. Тим Каске (Tim Kaske). Перевод: Евгений Карташев. №2. Стр. 32.

Отечественные датчики тока и напряжения для силовой электроники. Олег Болотин, Николай Гребенников, Григорий Портной, Константин Разумовский, Олег Яценко. №2. Стр. 36.

Дискретные 1200 В SiC MOSFET-приборы улучшенной конструкции для высокoeffективных сварочных агрегатов. Хорхе Сересо (Jorge Cerezo). Перевод: Евгений Карташев. №3. Стр. 6.

Влияние параметров IGBT-модулей на их параллельную работу. Н. Солтай (N. Soltau), Э. Визнер (E. Wiesner), Ю. Андо (Y. Ando), Дж. Сакаи (J. Sakai), К. Хатори (K. Hatori). Перевод: Евгений Карташев. №3. Стр. 10.

Российская силовая электроника: разворот на Восток и доступная функциональность. Часть 3. Firstack Technology Денис Новоторженцев, Андрей Колпаков. №3. Стр. 14.

Силовые блоки на основе биполярных полупроводниковых приборов. Вячеслав Мускатиньев, Алексей Сабешкин, Наталия Мельникова, Сергей Потапов, Алексей Хапугин. №3. Стр. 21.

Ликбез: 10 советов по проектированию с использованием высоковольтных ре-

зисторов. Стивен Оксли (Stephen Oxley). Перевод: Иван Сергеев. №3. Стр. 26.

Российские преобразователи напряжения ПИН в Госреестре СИ РФ. Олег Болотин, Николай Гребенников, Григорий Портной, Константин Разумовский, Олег Яценко. №3. Стр. 30.

К вопросу цифровых двойников судовых пропульсивных комплексов. Роберт Шульга. №3. Стр. 34.

Генезис GeneSiC и будущее карбида кремния. Льюв Вон-Эдмундс (Llew Vaughan-Edmunds). Перевод: Иван Сергеев. №4. Стр. 6.

SiC-диоды компании Global Power Technology. Валерия Смирнова. №4. Стр. 12.

Российская силовая электроника: разворот на Восток и доступная функциональность. Часть 4. AnXon. Кевин Ли (Kevin Lee), Денис Новоторженцев, Андрей Колпаков. №4. Стр. 14.

Современные оптоэлектронные приборы для силовой электроники. Александр Кургин, Владимир Рассказов, Александр Федоров. №4. Стр. 20.

Современные датчики от компании «НПО «Горизонт Плюс». Олег Болотин, Николай Гребенников, Григорий Портной, Константин Разумовский, Олег Яценко. №4. Стр. 24.

Решения для общепромышленных приводов: энергоэффективность и удельная мощность систем с модулями SiC. Константинос Патманидис (Konstantinos Patmanidis), Стефано Рузца (Stefano Ruzza), Клаудио Виллани (Claudio Villani). Перевод: Евгений Карташев. №4. Стр. 28.

Понимание теории динамического теплового импеданса. Кристофер Вокур (Christophe Vaucourt). Перевод: Андрей Колпаков. №4. Стр. 32.

Вакуумные конденсаторы фиксированной и переменной емкости IVELVAC. Антон Кравцов. №5. Стр. 6.

АО «Завод «Комета» — российский производитель трансформаторов и дросселей. Андрей Пивень. №5. Стр. 8.

Новые производители IGBT на российском рынке. Алексей Волков. №5. Стр. 10.

Развитие технологий приборов IGCT. Роберт Шульга. №5. Стр. 12.

Российская силовая электроника: разворот на Восток и доступная функциональность. Часть 5. Zenli. Денис Новоторженцев, Андрей Колпаков. №5. Стр. 17.

Одно семейство для решения всех задач: драйверы затворов Si, SiC и GaN. Кармен Бенедетти Матришиано (Carmen Benedetti Matrisciano), Диого Варахао (Diogo Varajao). Перевод: Евгений Карташев. №5. Стр. 22.

Микросхемы серии IZ5014S от ОАО «Интеграл». №5. Стр. 26.

Оценка виртуальной температуры полупроводникового диода с использованием кривых динамического теплового импеданса. № 6. Стр. 4.

Повышение надежности SiC-модулей. Евангелос Теодоссиу (Evangelos Theodossiu), Абель Текес (Ábel Tökés). Перевод: Иван Сергеев. № 6. Стр. 7.

Российская силовая электроника — разворот на Восток и «доступная функциональность». Часть 6. SilverMicro. Андрей Колпаков. № 6. Стр. 10.

Развитие технологий модулей IGBT. Часть 1. Конструктивно-технологические особенности паяных модулей традиционной конструкции. Роберт Шульга. № 6. Стр. 13.

Использование GaN FET с контроллерами и драйверами, разработанными для Si MOSFET. Александро Позо (Alejandro Pozo). Перевод: Евгений Карташев. № 6. Стр. 20.

Интеллектуальные цифровые драйверы сокращают время проектирования и раскрывают потенциал карбида кремния (SiC). Прадип Кулкарни (Pradeep Kulkarni). Перевод: Иван Сергеев. № 6. Стр. 23.

Новые серийные датчики тока и напряжения от российского производителя. Олег Болотин, Николай Гребенщиков, Григорий Портной, Константин Разумовский, Олег Яценко. № 6. Стр. 26.

## Приводы

Современный электропривод с синхронным реактивным двигателем. Роберт Шульга. №1. Стр. 20.

Специализированные источники вторичного электропитания для космической промышленности. Михаил Краснов, Евгений Лукьянов, Денис Авсюкевич, Иван Надоров. №3. Стр. 41.

Инвертор тягового привода E-Traction. Николай Гусев. №4. Стр. 36.

Использование широкозонных полупроводников для снижения потерь в элек-

троприводе. Гильерме Буэно Мариани (Guilherme Bueno Mariani). Перевод: Иван Сергеев. №5. Стр. 28.

Управление бесколлекторными двигателями постоянного тока. Марк Патрик (Mark Patrick). Перевод: Евгений Карташев. №5. Стр. 32.

Тяговый электропривод высокоскоростного поезда. Роберт Шульга. №5. Стр. 38.

мобилей: оптимизация габаритов, мощности и цены. Риккардо Коллура (Riccardo Collura). Перевод: Иван Сергеев. №5. Стр. 48.

Высокочастотная динамика преобразователей постоянного тока, работающих в режиме прерывистой проводимости. Норик Петросян, Карлен Бегоян, Мовсес Мовсисян. № 6. Стр. 29.

## Источники питания

Математическое описание процессов в силовой части преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения. Александр Федоренко, Александр Пахомов. №1. Стр. 25.

Современные концепции построения систем бесперебойного гарантированного электропитания. Александр Рябов, Олег Веригин. №1. Стр. 30.

Определение параметров элементов силовой схемы мостового резонансного DC/DC-преобразователя. Борис Глебов. №1. Стр. 33.

Как использовать инверсные повышающе-понижающие преобразователи при работе с высоким напряжением? Оливье Гиллеман. Перевод: Николай Бойправ. №1. Стр. 38.

ООО «ММП-Ирбис» и новая реальность на рынке производителей российской силовой электроники. Нина Борзилова, Алексей Пасечник. №2. Стр. 40.

Биполярный источник питания с низким уровнем EMI. Тимур Улудаг (Timur Uludag). Перевод: Евгений Карташев. №2. Стр. 43.

Моделирование эквивалентных схем преобразователей постоянного тока в режиме прерывистой проводимости. Норик Петросян, Карлен Бегоян. №2. Стр. 48.

Как оптимизировать схему импульсного источника питания путем минимизации ESR и ESL «горячих контуров» печатных плат. Цзинцзин Сан (Jingjing Sun), Лин Цзян (Ling Jiang), Генри Чжан (Henry Zhang). Перевод: Евгений Карташев. №2. Стр. 54.

Винторулевые колонки, водометы и их тяговые характеристики. Роберт Шульга. №2. Стр. 60.

Высоковольтные источники питания для монтажа на печатную плату. Андрей Руцкой, Михаил Моисеев. №3. Стр. 44.

Импульсный источник питания с КПД более 96% на основе транзисторов GaN. Себастьян Фишер (Sebastian Fischer), Эрик Хинтерлейтнер (Erich Hinterleitner). Перевод: Иван Сергеев. №3. Стр. 48.

Способ улучшения свойств мостового резонансного DC/DC-преобразователя. Борис Глебов. №3. Стр. 52.

Коррекция коэффициента мощности методом управления пиковым током. Бошэнг Сан (Bosheng Sun). №4. Стр. 40.

Понижение пульсации выходного тока мостового резонансного DC/DC-преобразователя. Борис Глебов. №5. Стр. 45.

Двунаправленные преобразователи для устройств быстрой зарядки электро-

## Охлаждение

Контурные тепловые трубы для систем охлаждения мощной электроники. Юрий Майданик. №4. Стр. 44.

## Химические источники тока

Руководство по быстрой зарядке аккумуляторных батарей. Франко Контадини (Franco Contadini), Alessandro Леонарди (Alessandro Leonardi). Перевод: Евгений Карташев. Часть 1. № 6. Стр. 34.

Оценка качества свинцово-кислотного аккумулятора по изменению его внутреннего сопротивления. Денис Павлов, Алексей Осетров, Владимир Чащин. № 6. Стр. 38.

## Применение

Стенды для проверки генераторов и стартеров серии СКИФ. Андрей Пивень. №1. Стр. 44.

## Софт

ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink. Урок 40. Гибридная мехатронная система с суммированием механических мощностей на выходном валу. Сергей Герман-Галкин. №1. Стр. 46.

ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink. Урок 41. Стабилизатор постоянного напряжения с корректором коэффициента мощности на базе трехфазного активного выпрямителя. Сергей Герман-Галкин. №4. Стр. 48.

## Транспорт

Электродвигатели в автомобилестроении. Дмитрий Аверичев, Юлия Березина. № 6. Стр. 43.

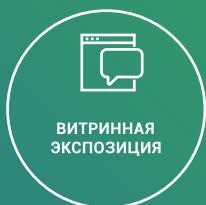
## Энергетика

Новые решения для ветроэнергетики. Марсель Морисс (Marcel Morisse), Майкл Боссхардт (Michael Busshardt). Перевод: Евгений Карташев. № 6. Стр. 50.

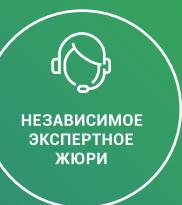
# ELECTRONICA ПРЕМИЯ

ПРЕМИЯ ELECTRONICA - НЕЗАВИСИМОЕ ЕЖЕГОДНОЕ МЕРОПРИЯТИЕ, НАПРАВЛЕННОЕ НА ПОДДЕРЖКУ И ПРОДВИЖЕНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ РОССИЙСКИХ КОМПАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

## ПРЕИМУЩЕСТВА УЧАСТИЯ



ВИТРИННАЯ  
ЭКСПОЗИЦИЯ



НЕЗАВИСИМОЕ  
ЭКСПЕРТНОЕ  
ЖЮРИ



ОНЛАЙН-ЗАЩИТА  
НОМИНАНТОВ  
ДЛЯ ГОЛОСОВАНИЯ  
ЖЮРИ



ШИРОКАЯ  
РЕКЛАМНАЯ  
КАМПАНИЯ

## КАТЕГОРИИ УЧАСТИЯ:

### МИКРО- ЭЛЕКТРОНИКА

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ ДИЗАЙН-ЦЕНТРОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

### ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КИИ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ И ВНЕДРЕНИЕ ДОВЕРЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ПЛАТФОРМ
- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ
- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО СРЕДСТВ БЕЗОПАСНОСТИ КИИ
- ЗА ВКЛАД В РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОГРАММЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ РОССИИ

### ДИСТРИБУЦИЯ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК ЭКБ
- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И СИСТЕМ

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ АУТСОРСИНГ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ КОНТРАКТНОЙ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ КОНТРАКТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗРАБОТКУ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КООПЕРАЦИИ

### ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВА И МАТЕРИАЛОВ
- ЗА РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

### РОБОТОТЕХНИКА

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
- ЗА РАЗРАБОТКУ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ В ОБЛАСТИ РОБОТОТЕХНИКИ И СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
- ЗА ВНЕДРЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И КОМПЛЕКСОВ

### ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭКБ
- ЗА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА СОЗДАНИЕ САПР И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ

### ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА ПОДГОТОВКУ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ
- ЗА РАЗВИТИЕ НОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ И ИНИЦИАТИВ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ
- ЗА ВНЕДРЕНИЕ УНИКАЛЬНЫХ КАДРОВЫХ ПРОГРАММ НА СВОЕМ ПРЕДПРИЯТИИ
- ЗА СОЗДАНИЕ КАДРОВОГО РЕЗЕРВА ОТРАСЛИ В РАМКАХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ

### ЛОКАЛИЗАЦИЯ

#### НОМИНАЦИЯ:

- ЗА РАЗВИТИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

В РАМКАХ

 EXPO  
ELECTRONICA  
2024

ПОДАЙТЕ  
ЗАЯВКУ

ОНЛАЙН НА  
[EXPOELECTRONICA.RU](http://EXPOELECTRONICA.RU)



Организатор  
Organiser

ОРГАНИЗATOR



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



MKB

МЕЖДУНАРОДНЫЕ  
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ «АРМИЯ-2024»**

**12–18 АВГУСТА  
ПАТРИОТ ЭКСПО**

# СИЛОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ

ДЛЯ ВАШЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ

Xiner  
SilverMicro  
SPS  
Leapers  
JeanSemi  
Fusemi  
CRRC  
StarPower  
Firstack  
Novosense  
Zenli  
TechSem  
AnXon  
CRE



Широкая номенклатура от ведущих производителей.  
Инженерное сопровождение и техническая поддержка.  
Программы защиты от контрафакта и фальсификата.  
Мультимодальная логистика - доставка в срок.  
Универсальная система ценообразования.

Компания ЮниРЭК осуществляет прямые поставки  
модулей IGBT Xiner, SilverMicro, SPS, Leapers, JeanSemi,  
Fusemi, CRRC, StarPower  
драйверов Firstack, Novosense  
диодно-тиристорных модулей Zenli, TechSem  
конденсаторов AnXon и CRE



ЮниРЭК



+7 (383) 205-24-96  
[info@unirec.ru](mailto:info@unirec.ru)

**unirec.ru**

реклама