

ТЕМАТИЧЕСКОЕ  
ПРИЛОЖЕНИЕ  
К ЖУРНАЛУ  
КОМПОНЕНТЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ  
**12+**

**WWW.POWER-E.RU**

№ 5'2023  
НОЯБРЬ

# СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ISSN 2079-9322



IGBT-модули  
и SiC MOSFET  
**1200 и 1700 В**

[WWW.I-POWERS.RU](http://WWW.I-POWERS.RU)



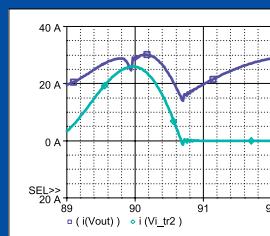
Вакуумные конденсаторы  
фиксированной  
и переменной  
емкости IVELVAC



Развитие технологий  
приборов IGCT



Использование  
широкозонных  
полупроводников  
для снижения потерь  
в электроприводе



Понижение пульсации  
выходного тока  
мостового резонансного  
DC/DC-преобразователя

# 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



АО «Элпресс»  
[www.ao-elpress.ru](http://www.ao-elpress.ru)  
[el.press@mail.ru](mailto:el.press@mail.ru)  
8 (8342) 29-68-67

## ЕСТЕСТВЕННО НАДЁЖНО И ПРОСТО



**БВБМ1Т-200-0,3-Е**

**БВБМТТ-50-0,3-Е**

- питание обмотки возбуждения двигателя
- выпрямление трёхфазного переменного тока
- естественное воздушное охлаждение
- снабберные цепи • драйверы • номинальный выпрямленный ток 50 А и 200 А • максимальное выходное напряжение 0,3 кВ • частота питающей сети 50 Гц • реверсивный режим работы
- электронная компонентная база от ведущего отечественного производителя



ПАО «Электровыпрямитель»  
[www.elvpr.ru](http://www.elvpr.ru)  
[nicspp@elvpr.ru](mailto:nicspp@elvpr.ru)  
8 (8342) 48-07-33

**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**

Ольга Ворченко olga.vorchenko@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 29.11.23  
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 “HELEN GROUP”  
Москва, ул. Русаковская, д. 13/5.

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.

Возрастное ограничение 12+

# В номере:

## Силовая элементная база

**Антон Кравцов**

Вакуумные конденсаторы  
фиксированной и переменной емкости IVELVAC ..... 6

**Андрей Пивень**

АО «Завод «Комета» — российский производитель  
трансформаторов и дросселей ..... 8

**Алексей Волков**

Новые производители IGBT на российском рынке ..... 10

**Роберт Шульга**

Развитие технологий приборов IGCT ..... 12

**Денис Новоторженцев, Андрей Колпаков**

Российская силовая электроника:  
разворот на Восток и доступная функциональность.  
Часть 5. Zenli ..... 17

**Кармен Бенедетти Матришиано (Carmen Benedetti Matrisciano),**

**Диого Варахао (Diogo Varajao)**

**Перевод: Евгений Карташев**

Одно семейство для решения всех задач:  
драйверы затворов Si, SiC и GaN ..... 22

Микросхемы серии IZ5014S от ОАО «Интеграл» ..... 26

## ОБРАЗЦЫ И ОТЛАДОЧНЫЕ СРЕДСТВА НА СКЛАДЕ PT ELECTRONICS

Силовые модули и  
источники питания

Беспроводные  
компоненты и антенны

Активные  
компоненты

Электромеханические  
и пассивные компоненты

ВЧ/СВЧ  
компоненты

Силовые  
полу-  
проводники

Датчики тока, напряжения,  
давления, температуры

Компоненты  
для  
тактирования

Высоконадежная продукция  
для ответственных применений

Контрольно-измерительное  
оборудование

КАТАЛОГ АНАЛОГОВ  
КОМПОНЕНТОВ КИТАЙСКИХ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

ПОДБОР  
КОМПЛЕКТУЮЩИХ,  
ОПТИМИЗАЦИЯ,  
УНИФИКАЦИЯ БАЗЫ

ПОСТАВКА  
ОБРАЗЦОВ И  
ОТЛАДОЧНЫХ СРЕДСТВ

ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ПОДДЕРЖКА  
НА ВСЕХ  
ЭТАПАХ ПРОЕКТА

# В номере:

Editor-in-chief

Pavel Pravosudov pavel@fsmedia.ru

Managing editor

Natalia Novikova natalia.novikova@fsmedia.ru

Technical editor

Andrey Kolpakov

Design and layout

Olga Vorchenko olga.vorchenko@fsmedia.ru

Advertising department

Olga Zaytseva olga\_z@fsmedia.ru

Subscription department

podpiska@fsmedia.ru

Editorial office

115088, Russia,  
Moscow, Juzhnoportovaja, str. D, building 7  
Tel./Fax: +7 (495) 414-2132

197101, Russia, St. Petersburg,  
Petrogradskaya Emb., b. 34 "B"  
Tel.: +7 (812) 467-4585  
E-mail: compitech@fsmedia.ru  
[www.power-e.ru/eng.php](http://www.power-e.ru/eng.php)

Representative office in Belarus

Minsk, Premier Electric  
Tel.: (10-37517) 297-3350, 297-3362  
E-mail: murom@premier-electric.com

## Приводы

**Гильерме Буэно Мариани (Guilherme Bueno Mariani)**  
**Перевод: Иван Сергеев**

Использование широкозонных полупроводников  
для снижения потерь в электроприводе ..... 28

**Марк Патрик (Mark Patrick)**  
**Перевод: Евгений Карташев**

Управление бесколлекторными двигателями постоянного тока ..... 32

**Роберт Шульга**

Тяговый электропривод высокоскоростного поезда ..... 38

## Источники питания

**Борис Глебов**

Понижение пульсации выходного тока  
мостового резонансного DC/DC-преобразователя ..... 45

**Риккардо Коллурा (Riccardo Collura)**  
**Перевод: Иван Сергеев**

Двунаправленные преобразователи  
для устройств быстрой зарядки электромобилей:  
оптимизация габаритов, мощности и цены ..... 48

IVELVAC – ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

ДЛЯ КАПИТАЛОЕМКИХ  
ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



ОБЪЕДИНЯЕМ ПЕРЕДОВЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ И РЕШЕНИЯ

реклама

[www.et-complex.ru](http://www.et-complex.ru)  
[sale@et-complex.ru](mailto:sale@et-complex.ru)

 **ЭТ-КОМПЛЕКС**

125363, г. Москва,  
ул. Штурвальная, д. 3, стр. 1  
тел. +7 (495) 925-5015

[www.ivelvac.com](http://www.ivelvac.com)  
[info@ivelvac.com](mailto:info@ivelvac.com)



На правах рекламы

# Вакуумные конденсаторы фиксированной и переменной ёмкости IVELVAC



**Стремительное распространение беспроводных технологий связи, включая 5G, привело к значительному увеличению спроса на высококачественные компоненты, в частности, на вакуумные конденсаторы. Такие компоненты применяются при настройке радиочастоты, согласовании импеданса, поддержании непрерывности сигнала в современных системах связи. В статье рассматриваются вакуумные конденсаторы компании IVELVAC, их особенности и характеристики.**

**Антон Кравцов**

kravtsovau@escltd.ru

**О**собенность вакуумных конденсаторов заключается в том, что в них в качестве диэлектрика вместо воздуха или других изолирующих материалов используется вакуум. Вакуумный диэлектрик допускает более высокое номинальное напряжение, чем воздушный диэлектрик.

По сравнению с газонаполненными конденсаторами, требующими периодической подкачки газа, вакуумные конденсаторы имеют более простую и легкую конструкцию, меньшие потери и лучшую температурную стабильность. Они устойчивее к вибрации, выдерживают более высокое значение реактивной мощности.

Производство вакуумных конденсаторов увеличивается с появлением новых технологий высоких частот и мощностей. Вакуумные конденсаторы имеют решающее значение для поддержания стабильного и эффективного функционирования в процессах обработки материалов, производстве полупроводников, высокомощных аэрокосмических радиочастотных генераторах и в системах генерации плазмы.

Рост спроса на быструю передачу данных, широкое покрытие сети и эффективную обработку сигналов повышает важность конденсаторов как компонентов, поддерживающих бесперебойное функционирование современных систем связи. Развитие беспроводной связи и «Интернета вещей» предполагает создание надежных компонентов для полезной нагрузки спутников и устройств.

Вакуумные конденсаторы обеспечивают необходимую стабильность и производительность для спутников и устройств «Интернета вещей», облегчая глобальную связь. Кроме того, достижения в области телекоммуникационных технологий требуют сложного испытательного и измерительного оборудования.



**Рис. 1.**

Вакуумный конденсатор  
переменной ёмкости

## Вакуумные конденсаторы IVELVAC

Вакуумные конденсаторы IVELVAC применяются в оборудовании, используемом для анализа сигналов, мониторинга эфира и оптимизации сети. Их точность и стабильность способствуют прецизионным измерениям и диагностике.

Типичный вакуумный конденсатор IVELVAC состоит из двух наборов концентрических цилиндрических пластин: одной регулируемой, а другой фиксированной, заключенных в вакуумированную керамическую

оболочку с медными уплотнениями на обоих концах. Гибкий металлический сильфон, прикрепленный к подшипнику скольжения, поддерживает вакуум, позволяя при этом изменять ёмкость (рис. 1).

Линейное изменение ёмкости осуществляется механически — с помощью регулировочного винта. Напряжение внутреннего пробоя в первую очередь определяется расстоянием между противоположными пластинами и уровнем вакуума.

Ниже приведены общие характеристики вакуумных конденсаторов IVELVAC. Номинальные значения тока представлены для обычного конвекционного охлаждения при температуре окружающей среды +25 °C, если не указано иное:

- максимально допустимая рабочая температура: +125 °C (257 °F) для керамического корпуса конденсатора;
  - охлаждение: естественная конвекция, если не указано иное;
  - монтажное положение: любое;
  - вращение для увеличения ёмкости: против часовой стрелки.
- Преимущества:
- высокое значение напряжения;
  - высокое значение тока;
  - широкий диапазон настройки; пределы изменения ёмкости могут достигать десятков тысяч процентов (10–1000 пФ) в среднем — тысячи процентов;
  - низкий тангенс угла потерь;
  - работа на большой высоте (до 2000 м).

## Обзор вакуумных конденсаторов IVELVAC

### Ток и напряжение

Максимальный рабочий ток вакуумных конденсаторов ограничен повышением температуры и рабочим напряжением. На более низких частотах конденсатор является токоограничивающим устройством из-за своего емкостного реактивного сопротивления. На некоторых частотах внутреннее выделение тепла превышает теплоотводящие возможности устройства, а его токовая нагрузка ограничена тепловыми соображениями.

Для каждого из перечисленных конденсаторов приведена диаграмма зависимости тока от частоты (рис. 2). Пиковое напряжение ограничено меха-

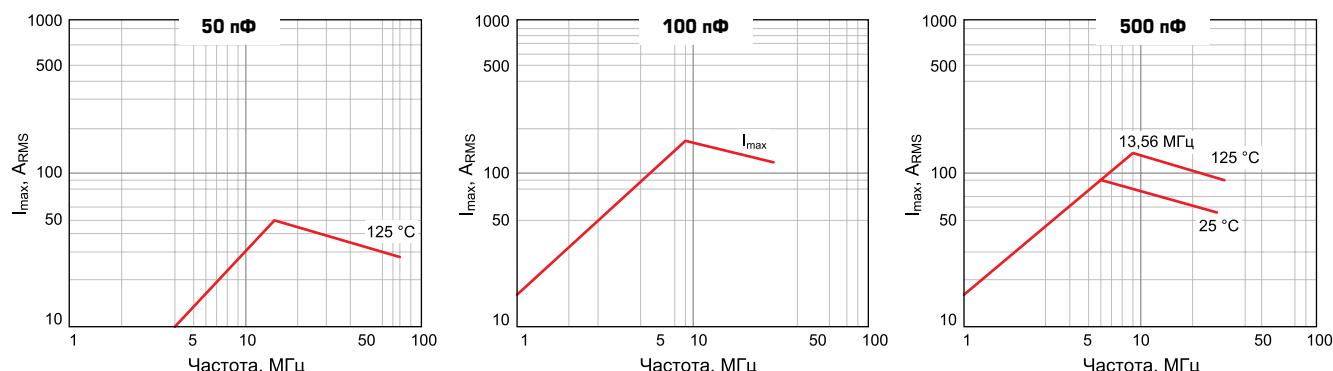


Рис. 2. Примеры диаграмм зависимости тока от частоты

Таблица 1. Диапазон характеристик конденсаторов IVELVAC

	Конденсаторы IVELVAC	
	фиксированной емкости	переменной емкости
Емкость, пФ	1–4000	3–3000
Напряжение, кВ	2–33	1,8–50
Ток, А	8–400	20–1085

нической конструкцией конденсатора. Оно не зависит от частоты. В технических характеристиках продукции IVELVAC указано два номинальных напряжения: испытательное напряжение переменного тока и рабочее напряжение.

Примеры диаграмм зависимости тока от частоты показаны на рис. 2.

#### Температура

Вакуумные конденсаторы IVELVAC рассчитаны на максимальную рабочую температуру +125 °C (257 °F) при нормальном конвекционном охлаждении и температуре окружающей среды +25 °C (72 °F).

#### Емкость

Конденсаторы постоянной емкости номиналом более 50 пФ должны находиться в пределах  $\pm 5\%$  от номинального значения. Конденсаторы с номинальной емкостью 50 пФ или менее должны находиться в пределах  $\pm 10\%$  от номинального значения, или 0,5 пФ, в зависимости от того, что больше. Для конденсаторов переменной емкости нижний предел будет равен или меньше минимального номинала. При вращении регулировочного винта изменение емкости происходит равномерно, реверса значения емкости не происходит.

#### Диапазон характеристик конденсаторов IVELVAC

Диапазон характеристик конденсаторов IVELVAC приведен в таблице 1.

Типичные характеристики конденсаторов IVELVAC приведены в таблицах 2 и 3.

#### Крутящий момент

В конденсаторах переменной емкости линейное скользящее движение узла подвижного электрода преобразуется во вращательное движение через резьбовой вал. Значения крутяще-

Таблица 2. Типичные характеристики конденсаторов IVELVAC фиксированной емкости

Емкость, пФ	Пиковое тестовое напряжение, кВ	Номинальное пиковое напряжение, кВ	Максимальный ток, А	Диаметр, мм	Высота, мм	Вес, кг
50 ±10%	15	9	27	47	62	0,35
100 ±5%	15	9	80	45	62	0,3
180 ±5%	15	9	97	48	62	0,39
200 ±5%	50	30	220	116	137	2,6
500 ±5%	12	7,2	126	48	52	0,4
1000 ±5%	10	6	116	48	52	0,4

Таблица 3. Типичные характеристики конденсаторов IVELVAC переменной емкости

Емкость, пФ	Пиковое тестовое напряжение, кВ	Номинальное пиковое напряжение, кВ	Максимальный ток, А	Диаметр, мм	Высота, мм	Крутящий момент, Н·м	Вес, кг
6–50	21	15	50	62	180	≤0,2	0,9
25–450	40	24	138	143	244	≤1,5	5,6
30–650	55	33	238	186	302	≤1,5	8,7
10–1000	5	3,5	60	88	219	≤0,2	1,5
35–1500	15	9	108	142,5	250	≤0,75	6
100–1500	40	24	136	182	354	≤1,5	11

го момента, приведенные в таблицах, представляют собой максимальный крутящий момент, необходимый для достижения минимальной емкости при вращении стандартным ходовым винтом; крутящий момент, необходимый для настройки от минимума, может быть меньше половины этого значения. Ограничители диапазона емкости встроены в каждый конденсатор переменной емкости. Пользователю рекомендуется устанавливать собственные внешние упоры для предотвращения повреждений.

#### Механическая износостойкость

Механический срок службы конденсаторов переменной емкости зависит от длины хода, скорости работы, материала сильфона и общего количества циклов. Были проведены обширные механические испытания на долговечность: рабочие агрегаты выполняли полные циклы от максимальной до минимальной производительности и обратно до максимальной, охватывая 95% полного хода подвижных пластин. Конденсаторы с большим сильфоном и коротким ходом имеют максимальный срок службы при циклическом режиме работы.

#### Применение

Вакуумные конденсаторы IVELVAC переменной емкости обладают уникальными пре-

имуществами, включая регулируемую емкость и стабильную производительность, что делает их незаменимыми компонентами в различных высокочастотных и высоковольтных системах. Кроме того, растущий спрос на вакуумные конденсаторы переменной емкости играет жизненно важную роль в оптимизации и повышении производительности сложных электронных систем в различных секторах, что, в свою очередь, стимулирует рынок вакуумных конденсаторов.

Компания предоставляет широкий выбор вакуумных конденсаторов IVELVAC как постоянной, так и переменной емкости, изготавливающихся для разных номинальных напряжений и с широким емкостным диапазоном для применения в различных приложениях. Своим постоянным заказчикам компания готова предложить систему плановых закупок и резервирования продукции на собственном складе.

Конструкция вакуумных конденсаторов IVELVAC способна выдерживать высокие напряжения, поэтому данные устройства можно применять в ВЧ-усилителях, вращательных передатчиках, высокоэнергомеханических физических экспериментах. Уникальные характеристики вакуумных конденсаторов IVELVAC позволяют использовать их в условиях, где важны эксплуатационные параметры, долговечность, стабильность.

# АО «Завод «Комета» —

российский производитель  
трансформаторов и дросселей



комета53.рф

**Сегодня трудно себе представить электротехническое оборудование без трансформаторов, выполняющих функцию гальванической развязки силовых цепей, а также реакторов, именуемых дросселями, для сглаживания высокочастотных пульсаций в электрической сети. Расчет необходимого трансформатора, а особенно дросселя, требует от инженера не только глубоких познаний в области электротехники, но и большого опыта работы. Чтобы исключить вероятность ошибки, лучше использовать готовые решения на базе освоенной линейки изделий.**

Андрей Пивень<sup>1</sup>

**З**авод «Комета» специализируется на производстве силовых однофазных и трехфазных трансформаторов мощностью 20 Вт – 10 кВт, предназначенных для питания электротехнической аппаратуры различного назначения: шкафов и щитов управления оборудованием, сетевого электроснабжения, промышленной автоматики, аппаратуры специального назначения, электронных устройств. Рабочая частота достигает 50, 400 и до 1000 Гц, входное напряжение 220 и 380 В. Выходные напряжения могут быть любыми, в зависимости от требований заказчика. Для защиты от внешних воздействий (влаги, пыли) трансформаторы покрывают специальными защитными лаками. Освоенная номенклатура насчитывает более 30 видов и свыше 300 типоисполнений.

Также на предприятии освоена широкая номенклатура моторных и сетевых дросселей, предназначенных для работы в различных электрических устройствах в сетях трехфазного переменного тока.

Мощность варьируется от 3 до 300 кВ·А, индуктивность 0,02–2,93 мГн. Для аппаратуры специального назначения может использоваться вариант с повышенной устойчивостью к механическим воздействиям. Всего освоено около сотни исполнений дросселей для самых различных требований и характеристик.

## Дроссели

Дроссели предназначены для работы в электрических устройствах и трехфазных сетях переменного тока частотой 50 Гц и напряжением не более 500 В, устанавливаются на входе преобразователей частоты (ПЧ) для снижения высокочастотных гармоник в токе, потребляемом из сети. Климатическое исполнение УХЛ 3 по ГОСТ 15150-69. Класс нагревостойкости изоляционных материалов В (+130 °C) по ГОСТ 8865-87. Пропитаны лаком МЛ-92 ГОСТ 15865-70. Максимальная рабочая температура +130 °C.



Рис. 1. Дроссели трехфазные



Рис. 2. Трансформаторы питания

Таблица 1. Дроссели трехфазные сетевые серии ДРТ

Мощность ПЧ, кВ·А	Наименование	Индуктивность, мГн, ±20%	Ток*, А	L, мм	В, мм	Н, мм	Масса, кг
4,5	ДРТ-4,5	1,83	16	145	104	191	5
5,5	ДРТ-5,5	1,83	16	145	104	191	5
7,5	ДРТ-7,5	1,47	20	145	104	191	3
11	ДРТ-11	0,98	30	145	104	191	6
11	ДРТ-11М	0,98	30	145	125	150	6
15	ДРТ-15	0,73	40	145	104	191	6
15	ДРТ-15М	0,73	40	145	125	150	6
18,5	ДРТ-19	0,59	50	180	115	155	6,2
22	ДРТ-22	0,48	60	330	136	185	13,5
30	ДРТ-30	0,39	75	330	136	185	13,5
37	ДРТ-37	0,33	90	330	160	210	17,5
45	ДРТ-45	0,25	115	330	160	255	22
55	ДРТ-55	0,2	150	330	160	255	22
75	ДРТ-75	0,16	180	330	160	255	26,5
90	ДРТ-90	0,16	180	340	205	255	42
110	ДРТ-110	0,14	210	340	205	255	42
132	ДРТ-132	0,12	250	340	205	255	42
160	ДРТ-160	0,1	300	340	205	255	42
200	ДРТ-200	0,081	380	340	205	255	42
250	ДРТ-250	0,051	500	340	205	255	60

Таблица 2. Дроссели трехфазные сетевые серии ДРС

Мощность ПЧ, кВ·А	Наименование	Индуктивность, мГн, ±20%	Ток*, А	L, мм	В, мм	Н, мм	Масса, кг
4	ДРС-2,93/10	2,93	10	145	104	191	5
18,5	ДРС-0,28/45	0,28	45	145	104	191	5
22	ДРС-0,15/65	0,15	65	330	160	185	14
30	ДРС-0,15/80	0,15	80	330	160	210	16
37	ДРС-0,13/90	0,13	90	330	160	210	16
45	ДРС-0,12/110	0,12	110	330	160	210	18
45	ДРС-0,05/110	0,05	110	330	160	255	20
45	ДРС-0,3/110	0,3	110	330	160	255	22
50	ДРС-0,08/128	0,08	128	330	160	210	17
55	ДРС-0,11/140	0,11	140	330	160	210	18
55	ДРС-0,07/150	0,07	150	330	160	255	20
60	ДРС-0,075/150	0,075	150	330	160	255	20
90	ДРС-0,075/180	0,075	180	330	160	255	21
110	ДРС-0,06/220	0,06	220	330	160	255	23
132	ДРС-0,05/260	0,05	260	330	160	255	25
160	ДРС-0,04/325	0,04	150	325	160	255	25
250	ДРС-0,025/500	0,07	150	330	160	255	20

### Трансформаторы

Назначение трансформаторов — питание аппаратуры и оборудования от однофазной и трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц. Устройства соответствуют требованиям безопасности ГОСТ 12.2.006-87 и ГОСТ 27570.0-87. Климатическое исполнение УХЛ 4.2 по ГОСТ 15150-69. Класс нагревостойкости изоляционных материалов В (+130 °C). Используемый магнитопровод — витой ленточный. Перегрев трансформатора при максимальной мощности +65 °C. Значения выходных напряжений и токов могут быть любыми. Варианты конструкции под печатный монтаж. При необходимости между первичной и вторичной обмотками устанавливается экран.

Номенклатура продукции, выпускаемой АО «Завод «Комета», постоянно расширяется. Готовятся к производству новые типоисполнения трансформаторов мощностью до 200 Вт под печатный монтаж. В ближайших планах предприятия — освоение новых образцов дросселей, позволяющих решить вопросы с импортозамещением в данной сфере.

\* Максимальное значение тока, при котором дроссель не входит в насыщение.

Таблица 3. Дроссели трехфазные моторные серии ДРМ

Мощность ПЧ, кВ·А	Наименование	Индуктивность, мГн, ±20%	Ток*, А	L, мм	В, мм	Н, мм	Масса, кг
3	ДРМ-2/6,3	2	6,3	145	104	191	5
4	ДРМ-2,93/10	2,93	10	145	104	191	5
5,5	ДРМ-1,27/11	1,27	11	145	104	191	4,5
5,5	ДРМ-4,6/11	4,6	11	145	104	191	5
5,5	ДРМ-1,0/16	1	16	145	104	191	5
5,5	ДРМ-3,8/16	3,8	16	180	125	160	5,2
7,5	ДРМ-2,5/20	3	20	180	104	191	5,5
11	ДРМ-2,0/32	2	32	330	160	255	15
15	ДРМ-0,3/40	0,3	40	330	160	255	11,5
15	ДРМ-0,4/41	0,4	41	330	160	185	14
18,5	ДРМ-1,3/48	1,3	48	330	160	255	24
22	ДРМ-0,1/60	0,1	60	330	160	255	18,5
30	ДРМ-0,18/75	0,18	75	330	160	210	16
30	ДРМ-0,8/75	0,8	75	340	205	255	32
37	ДРМ-0,15/96	0,15	96	330	160	210	17
45	ДРМ-0,12/110	0,12	110	330	160	210	18
45	ДРМ-0,05/110	0,05	110	330	160	255	20
45	ДРМ-0,45/110	0,45	110	340	205	255	38
55	ДРМ-0,05/150	0,05	150	330	160	255	22
55	ДРМ-0,075/150	0,075	150	330	160	255	22
55	ДРМ-0,4/150	0,4	150	340	205	255	40
90	ДРМ-0,08/195	0,08	195	330	160	255	24
110	ДРМ-0,2/200	0,2	200	340	205	255	46
110	ДРМ-0,03/200	0,03	200	330	160	255	22
132	ДРМ-0,05/270	0,05	270	330	160	255	24
180	ДРМ-0,05/340	0,05	340	340	205	255	45
300	ДРМ-0,02/630	0,02	630	340	260	255	65

Таблица 4. Трансформаторы питания

Тип	L, мм	В, мм	Н, мм	Мощность, Вт	Масса, кг
Однофазные					
ТПК-25	66	56	46	25	0,6
ТПК-40	72	61	50	40	0,7
ТПК-50	82	70	70	48	0,6
ТПК-60	68	67	57	60	0,7
ТПК-110	112	66	69	110	1,5
ТПК-125	120	72	70	125	1,8
ТПК-190	136	100	70	220	2,8
ТПК-0,4	155	106	154	400	6
ТПК-0,6	155	106	177	600	7
ТПК-1,0	155	106	222	1000	12
ТПК-2,0	155	150	227	2000	18
ТПК-1,0K	235	120	180	1000	12
ТПК-2,0K	235	165	180	2000	18
ТПК-0,8C	216	102	197	800	9
ТПК-1,2C	216	102	220	1200	13
ТПК-2,0C	216	122	265	2000	18
ТПК-3,0C	216	165	265	3000	28
ТПК-4,5	216	206	270	4500	39
ТПК-6,0	216	248	270	6000	49
Трехфазные					
ТПФ-0,3	145	140	70	300	4,1
ТПФ-0,3В	145	170	77	300	4,3
ТПФ-0,025	82	41	75	25	0,6
ТПФ-0,13	180	100	87	130	2,6
ТПФ-1,0	330	110	210	1000	15
ТПФ-1,5	330	110	230	1500	18
ТПФ-2,5	330	110	275	2500	27
ТПФ-5,0	340	164	275	5000	43
ТПФ-7,5	340	212	275	7500	60
ТПФ-9,0	340	254	275	9000	76

# Новые производители IGBT на российском рынке

**В настоящее время российские разработчики в значительной мере лишились возможности использовать привычные компоненты западных компаний. Взамен них используются ближайшие российские аналоги, а чаще — продукция китайских предприятий. Такая же ситуация сложилась и с IGBT. В статье мы кратко рассмотрим IGBT китайских производителей и сравним их с изделиями мирового лидера — компании Infineon. Статья носит справочный характер, в ней не рассматриваются топологии силовых каскадов с IGBT и принципы их работы.**

Алексей Волков

a.volkov@promelec.ru

Хотя первые IGBT появились уже в далеком 1985 году, нельзя сказать, что они оказались на «технологоческой полке», когда даже для минимальных усовершенствований продукта требуются столь значительные затраты, что всякое улучшение теряет смысл. До сих пор IGBT продолжают совершенствоваться, и ведущие производители регулярно сообщают о появлении транзисторов новых поколений, превосходящих по параметрам своих предшественников.

Введение

нении мы будем рассматривать основные, на наш взгляд, параметры модулей.

Все рассматриваемые IGBT изготовлены по технологии Trench-FS со слоем Field-Stop (FS). Схематично структура такого IGBT приведена на рисунке. По сравнению с планарной структурой температурный коэффициент прямого падения напряжения у Trench-FS лучше, и у этого IGBT больше устойчивость к перегрузкам по току. Хвост тока при выключении Trench-FS несколько выше, но спадает он значительно быстрее.

К сожалению, не существует единого общепринятого стандарта определения параметров IGBT, поэтому некоторые параметры в справочной документации определены для разных условий. В таблице 1 приведены параметры, которые в первую очередь обычно учитываются при выборе силовых сборок: максимально допустимый ток коллектора и ток короткого замыкания, максимальная рассеиваемая мощность, а также тепловые сопротивления переход-корпус IGBT и антипараллельного диода. Как видно из таблицы, компании оценивают максимальный длительный ток и максимальную рассеиваемую мощность при разной температуре корпуса  $T_O$  но при одинаковой температуре перехода  $T_{VJ} = +175^\circ\text{C}$ .

Важным параметром, определяющим потери на проводимость, является напряжение насыщения коллекtor-эмиттер  $V_{CESAT}$ . Значение этого параметра при

**Таблица 1.** Максимально допустимый ток коллектора и максимальная рассеиваемая мощность

Параметр	CRRC	Leapers	Xiner	StarPower	«Протон-Электротекс»	Infineon
Длительный ток	450 А при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$	600 А при $T_C = +100^\circ C$	450 А при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = 175^\circ C$	450 А при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$ или 680 А при $T_C = +100^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$	450 А при $T_C = +80^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$ или 601 А при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$	450 А при $T_C = +100^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$ или 675 А при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$
Ток короткого замыкания, А, при $T_{VJ} = +150^\circ C$ , длительность не более 10 мкс	1900	2000	2400	1800	1525	1800
Максимальная рассасываемая мощность	2800 Вт при $T_C = +100^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$	3750 Вт при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$	2150 Вт при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$	2173 Вт	Нет данных	2250 Вт при $T_C = +25^\circ C$ и $T_{VJ} = +175^\circ C$
Тепловое сопротивление переход-корпус IGBT, К/Вт	0,052	0,04	0,07	0,069	0,054	0,066
Тепловое сопротивление переход-корпус антипарал- ельного диода, К/Вт	0,086	0,07	0,05	0,108	0,11	0,045

## **Рисунок.** Структура IGBT Trench-FS

**Таблица 2.** Напряжение насыщения коллектор–эмиттер  $V_{CESAT}$ 

Параметр	CRRC	Leapers	Xiner	StarPower	«Протон-Электротекс»	Infineon
Напряжение насыщения коллектор–эмиттер при температуре перехода, $V_{CESAT}/^{\circ}\text{C}$	1,65 В/25 °C; 2 В/150 °C	1,65 В/25 °C; 1,85 В/150 °C	1,75 В/25 °C; 2,05 В/150 °C	1,7 В/25 °C; 2,05 В/150 °C	2,25/25 °C; 2,95 В/150 °C	1,75 В/25 °C; 2,05 В/150 °C

**Таблица 3.** Входная емкость  $C_{IES}$ , обратная передаточная емкость (емкость Миллера)  $C_{RES}$  и заряд затвора  $Q_G$ 

Параметр	CRRC	Leapers	Xiner	StarPower	«Протон-Электротекс»	Infineon
Входная емкость $C_{IES}$ , нФ	62	39	30,5	Нет данных	34,0	28,0
Обратная передаточная емкость $C_{RES}$ , нФ	0,82	1,39	1	Нет данных	1,3	1,55
Заряд затвора $Q_G$ , нКл	4600	3300	1620	Нет данных	1750	3300

**Таблица 4.** Динамические параметры IGBT

Параметр	CRRC	Leapers	Xiner	StarPower	«Протон-Электротекс»	Infineon
Задержка на включение $t_{(ON)}, \mu\text{s}$	267	195	187	328	234	220
Время нарастания тока коллектора $t_{R(ON)}, \mu\text{s}$	102	58	66	76	63	70
Задержка на выключение $t_{(OFF)}, \mu\text{s}$	730	515	504	539	436	620
Время спада тока коллектора $t_{R(OFF)}, \mu\text{s}$	270	255	218	108	239	120
Потери энергии на включение $E_{ON}, \text{мДж}$	88	78,9	36	19,5	9,5	28,5
Потери энергии на выключение, $E_{OFF}, \text{мДж}$	62	52,21	51	46,6	57,5	61,5

**Таблица 5.** Параметры антипараллельного диода

Параметр	CRRC	Leapers	Xiners	StarPower	«Протон-Электротекс»	Infineon
Прямое падение напряжения $V_F, \text{В}$	1,75	1,7	2,4	1,65	2,7	1,65
Пиковый обратный ток $I_{RM}, \text{А}$	440	266	318	354	435	575
Заряд восстановления обратного сопротивления $Q_r, \text{мКл}$	100	84,87	53	79,6	48,5	105
Потери энергии восстановления обратного сопротивления $E_{REC}, \text{мДж}$	50	29,89	24	35,8	37,5	55

разной температуре перехода приведено в таблице 2. Для выбора драйверов затвора и оценки потерь на управление необходимо знать входную емкость  $C_{IES}$ , обратную передаточную емкость (емкость Миллера)  $C_{RES}$  и заряд затвора  $Q_G$ . Все три параметра представлены в таблице 3.

Наверное, самыми значимыми для разработчиков являются динамические параметры IGBT; они представлены в таблице 4. Чтобы не загромождать таблицу излишними данными, все параметры в ней указаны при

температуре перехода +150 °C (+175 °C для IGBT Xiner). При сравнении динамических параметров следует учесть разные сопротивления в цепи затвора. К сожалению, все производители, кроме «Протон-Электротекс», не указывают величину индуктивности нагрузки, при которой проводились испытания. Возможно, именно этими обстоятельствами и объясняются существенные различия динамических параметров IGBT.

Параметры антипараллельных диодов для температуры перехода +150 °C приведены в таблице 5. Как и при определении динамических параметров, не все производители указали индуктивность нагрузки, при которой проходили испытания.

## Выводы

Мы рассмотрели некоторые основные параметры полумостовых сборок IGBT производства немецкой, российской и китайских компаний. В идеальном варианте хотелось бы испытать все сборки на одном и том же стенде при одинаковых условиях. Но мы доверимся справочным данным от производителей.

Однако проблема заключается не в скептическом отношении к продукции производителей — это известные компании, чьи изделия продаются во многих странах. Нет оснований подозревать эти компании в обмане. Но поскольку не существует единого стандарта на испытание сборок IGBT, довольно трудно привести данные от производителей к общему знаменателю, чтобы выявить лидеров и аутсайдеров.

С другой стороны, условия проведения испытаний в разных компаниях не настолько разительно отличаются друг от друга, чтобы не попытаться сделать выводы из сравнения справочных данных. Возьмем на себя смелость утверждать, что продукция китайских производителей CRRC, Leapers, Xiner, StarPower во многих случаях вполне способна заменить сборки IGBT мирового лидера Infineon.

Возможно, параметры сборки IGBT от Infineon выглядят более сбалансированными, но и китайцам есть чем гордиться: например, высокая устойчивость их сборок к токам короткого замыкания и способность рассеивать высокую мощность свидетельствуют о высокой квалификации китайских инженеров и хорошей проработанности конструкции сборки.

Похоже, специалисты российской компании «Протон-Электротекс» разделяют философию своих коллег из Infineon и так же, как они, создали сбалансированное изделие.

Подводя итоги, можно сказать, что уход западных производителей IGBT, конечно, сказался на российских компаниях — им приходится искать замену привычным, проверенным компонентам, налаживать логистические цепочки. Тем не менее замена есть: на российском рынке предлагаются сборки IGBT китайских компаний; во многих случаях использование этих изделий не приведет к ухудшению качества и функциональности всего продукта в целом.

Москва, 105275  
ул. Уткина Дом 40

**ООО ТЕХНО**

**Interflux Electronics®**

Сервисные материалы  
для ручной пайки

Флюс-гель IF8300, IF7500HAB для BGA микросхем.  
Припой Aquasol 4018 водосмыляемым флюсом.  
Паяльная паста DP5600, DP 5505 универсальная,  
высокостабильная, не требующая очистки.  
Сервисные флюсы No-clean IF8001 и IF6000.  
Сервисные флюсы на водной основе  
SelectIF 2040 и PacIFic 2009M.



Тел: (495) 735-44-29  
<http://www.techno.ru>  
e-mail: [ywg@techno.ru](mailto:ywg@techno.ru)



# Развитие технологий приборов IGCT

**В статье рассмотрены структуры тиристора и силового запираемого тиристора (СЗТ). Выполнено исследование структур тиристорных модифицированных высоковольтных ячеек-аналогов IGBT с накоплением избыточной электронно-дырочной плазмы вблизи коллекторного  $p-n$ -перехода. К их числу относятся МСТ (MOS Controlled Thyristor), EST (Emitter Switched Thyristor), CIGBT (Clustered IGBT). Рассмотрена структура двухмодальных транзисторов (BIGT), функционально совмещающих IGBT и встречно-параллельный диод, которые нашли широкое применение в модулях.**

**Роберт Шульга\***,  
к. т. н.

**С**труктуры тиристора и силового запираемого тиристора достигли наилучших показателей сильноточности и высоковольтности среди широкой гаммы полупроводниковых приборов и предшествовали взлету популярности приборов IGBT и модулей на их основе. СЗТ на основе приборов IGCT отличает жесткая коммутация и минимум коммутационных потерь, что, однако, ограничивает их применение в высоковольтных устройствах при последовательном соединении. Пришедшие им на смену приборы IGBT с более мягким включением смогли вытеснить СЗТ в самых широких областях электротехники.

Цель статьи — систематизация конструкционно-технологических разработок приборов IGCT и их разновидностей для оптимизации параметров. В литературе [1–3] рассмотрены варианты использования указанных приборов в высоковольтных устройствах, а в [4–8] — применительно к контроллерам и низковольтным преобразователям. Библиография [12–17] рассматривает вопросы оптимизации характеристик приборов.

## Тиристор

Тиристор является наиболее распространенным «традиционным» ключом среди приборов СПП и изготавливается на основе четырехслойной полупроводниковской структуры. Для высоковольтных тиристоров предпочтительна исходная подложка  $n$ -типа проводимости с использованием высокоомного нейтронно-легированного кремния. Формирование коллекторного (отвечает за блокирование прямого напряжения) и анодного (блокирование анодного напряжения)  $p-n$ -переходов осуществляется симметричной двухсторонней диффузией примесей акцепторного типа (алюминий, галлий, бор) на глубину от десятков до сотни микрон. Катодный эмиттерный  $p-n$ -переход формируют диффузией примеси донорного типа, при этом предусматривается наличие технологической шунтировки самого перехода (областями типа  $p$ -проводимости), а также  $p$ -областей управления от внешнего вывода управляющего электрода тиристора.

Тиристоры и фототиристоры считаются самыми высоковольтными (до 12000 В) и сильнотоковыми (до 5000–6000 А среднего тока). Однако основная масса тиристоров изготавливается в диапазоне максимального повторяющегося напряжения  $U_{DRM}$  (менее 5000–6000 В), что объясняется скорее ограничением предела плотности номинальной коммутируемой мощности на уровне 200–220 кВт/см<sup>2</sup> при указанных напряжениях.

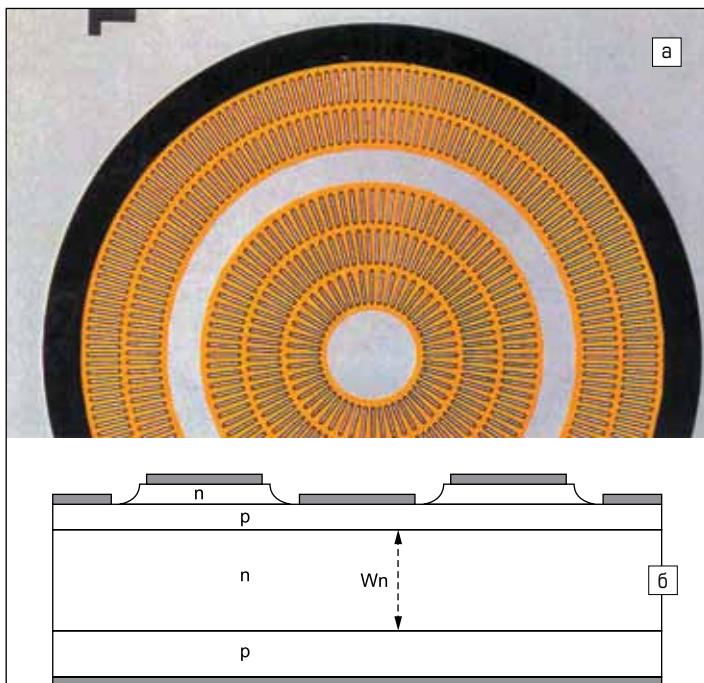
Преимущества тиристоров обусловлены малым током управления при большой коммутируемой мощности и малым падением напряжения во включенном состоянии. К основным функциональным недостаткам тиристора относится его неполная управляемость. Тиристор включается импульсом тока по цепи управления, а для его выключения необходимо прерывание (или смена полярности) силового тока в течение некоторого времени (время выключения). Этот недостаток не позволяет эффективно использовать тиристоры в целом ряде устройств СПП, где необходимо осуществлять включение и выключение с помощью сигнала управления.

## Запираемый тиристор

Силовой запираемый тиристор (СЗТ), или GTO (Gate Turn-Off thyristor), — это полностью управляемая модификация тиристора, в котором включение и выключение осуществляются импульсом тока в цепи управления. Типичная топология кремниевого выпрямительного элемента (ВЭ) мощного СЗТ приведена на рис. 1.

Из рис. 1a следует, что ВЭ содержит большое количество дискретных катодных эмиттерных ячеек, которые окружены односвязным базовым (управляющим) электродом. Каждая ячейка совместно с остальными тремя слоями кремниевой структуры образует отдельную тиристорную структуру. Типичные размеры ячеек составляют по ширине 0,2–0,3 мм, по длине 2,5–4 мм. Возможны различные варианты реализации общего контакта к дискретным катодным ячейкам. Однако чаще используют представленную на рис. 1b меза-конструкцию катодных ячеек, которая реализует разноуровневую металлизацию.

\* ВЭИ — филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина»



**Рис. 1.** Типичная топология кремниевого выпрямительного элемента (ВЭ) мощного СЗТ:  
а) соответствует расположению на шайбе катодных эмиттерных ячеек;  
б) соответствует меза-конструкции дискретных катодных ячеек

цию этих ячеек и *p*-базы для контакта со сплошным плоским катодным электродом.

СЗТ представляет глухое соединение в параллель множества элементарных тиристоров. Ширину катодных ячеек выбирают в соответствии с условием надежного выключения всех элементарных тиристоров запирающим током управления. Длина ячеек определяется исходя из наиболее эффективного использования площади ВЭ.

Основной недостаток GTO связан с высоким уровнем тока управления, сопоставимым с силовым током, что снижало эффективность указанного прибора, поэтому в середине 90-х годов прошлого века ведущими мировыми фирмами было разработано новое поколение СЗТ с жесткой коммутацией. Указанные приборы включают:

- GCT (Gate Commutated Thyristor) — СЗТ с жесткой коммутацией без драйвера;
- IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) — GCT, интегрированный с драйвером;
- ETO (Emitter Turn-Off Thyristor) — коммутируемый по каскодной схеме.

Перечисленные приборы имеют одинаковую конструкцию ВЭ, которая близко соответствует рис. 1. Отличием является меньшая ширина катодных эмиттерных ячеек ВЭ этих приборов, которая соответствует 0,1–0,2 мм, то есть ВЭ у них обладает более «тонкой» топологией.

GCT имеет систему параметров, идентичную традиционным СЗТ. Отличие состоит в том, что их выключение осуществляется запирающим импульсным током управления  $I_{CQM}$ , который равен по амплитуде силовому анодному току  $I_{TQRM}$ , причем ток управления возрастает до амплитудного значения примерно за 1 мкс. Скорость нарастания тока управления достигает 3000–4000 А/мкс. Напряжение источника запирающих импульсов тока управления составляет примерно 20 В, поэтому паразитная индуктивность цепи управления не должна превышать единиц наногенри.

В отличие от СЗТ, снижение собственной паразитной индуктивности GCT достигается использованием нескольких управляющих выводов или даже сплошного кольцевого управляющего вывода.

Благодаря высоким значениям  $di_{GQ}/dt$  инъекция электронов из *n*-эмиттера GCT прекращается за 1 мкс, затем GCT восстанавливает блокирующую способность подобно биполярному *p-n-p*-транзистору.

Включение GCT выполняется импульсами тока управления, амплитуда которых  $I_{GM}$  может достигать половины  $I_{TQRM}$ , причем длитель-

ность переднего фронта не превышает 1 мкс. Благодаря этому можно включить GCT однородно по всей площади ВЭ и резко снизить коммутационные потери при включении  $E_{ON}$ .

Жесткие процессы коммутации GCT предотвращают возможное шнурование тока в процессе включения и выключения, что позволяет на порядок уменьшить  $t_{on(min)}$  и  $t_{off(min)}$  по сравнению с традиционными СЗТ. Максимальная частота функционирования GCT достигает 40–50 кГц.

Компания ABB является мировым лидером по выпуску наиболее мощных GCT и IGCT, чьи характеристики приближаются к традиционным однооперационным тиристорам и достигают 10 000 В.

Существенным недостатком IGCT считается биполярный характер его управления. Для быстрого и безопасного включения и выключения прибора по цепи его управления должны быть пропущены импульсы тока амплитудой несколько тысяч ампер. Кроме того, для поддержания включеного состояния IGCT при малом значении анодного тока необходима подпитка по цепи управления током до нескольких ампер. Указанные особенности приводят к необходимости питать драйвер IGCT от источника значительной мощности, примерно 200–500 Вт, что не всегда осуществимо с учетом ограничения массогабаритных показателей и КПД устройства. Кроме того, жесткое включение и выключение прибора IGCT практически ограничивает число последовательно соединенных приборов (до 2–3 шт.) даже при условии подбора их характеристик, что препятствует их применению в высоковольтных установках, в отличие от приборов IGBT (Insulated gate bipolar transistor — биполярный транзистор с изолированным затвором, БТИЗ), обладающих более мягкими характеристиками и меньшей мощностью управления.

### Модифицированные высоковольтные ячейки-аналоги IGBT

Модифицированные высоковольтные ячейки-аналоги IGBT с накоплением избыточной электронно-дырочной плазмы вблизи коллекторного *p-n*-перехода разделяются на два подвида:

- транзисторные, в которых не происходит насыщение коллекторного *p-n*-перехода, причем в таких структурах выделяют транзисторную секцию и условный *p-i-n*-диод, вблизи *n<sup>+</sup>*-слоя которого происходит накапливание дополнительной избыточной электронно-дырочной плазмы;
- тиристорные, в которых сформирована четырехслойная структура, пропускающая основную часть тока, включение которой сопровождается насыщением коллекторного *p-n*-перехода.

Транзисторные модифицированные структуры рассмотрены ранее. Тиристорные структуры можно выделить как особый тип СПП в виде ключей тиристорного типа с МОП-управлением (представлены далее).

Общим недостатком модификаций тиристорного типа считается слабая возможность уменьшения остаточного падения напряжения из-за палиативного характера вводимых в конструкцию изменений. В результате практически все модифицированные конструкции кристаллов IGBT напряжением 4500–6500 В имеют при номинальном токе напряжение во включенном состоянии выше 2,5 В.

Радикального снижения этого параметра удается добиться применением кристаллов с МОП-тиристорной структурой, наиболее перспективных по комплексу характеристик.

### MCT (MOS Controlled Thyristor)

Структура ячейки MCT приведена на рис. 2. «Традиционный» MCT представлен на рис. 2а. Для включения на затвор подается положительное напряжение, формирующее индуцированный *n*-канал включения (ON FET CHANNEL). Протекание тока вызывает инъекцию дырок из нижнего (анодного) эмиттера, часть которых собирается коллекторным переходом, что вызывает включение тиристорной *n<sup>+</sup>-p-n-p*-структурь.

Для выключения прибора на затвор подается отрицательное напряжение, формирующее *p*-канал выключения (OFF FET CHANNEL). При этом *n<sup>+</sup>*-эмиттер тиристорной структуры оказывается зашунтированным и не может инжектировать электроны, благодаря чему тиристор выключается.

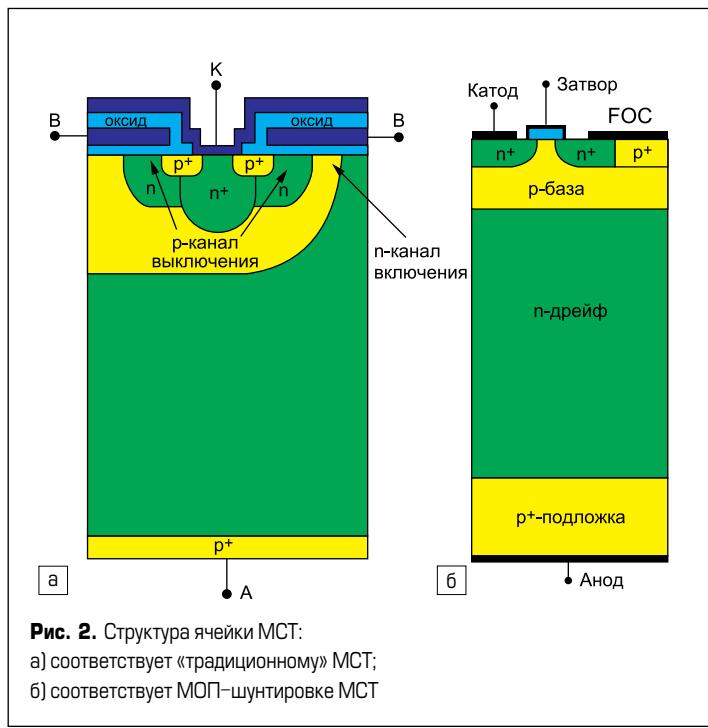


Рис. 2. Структура ячейки МСТ:

- а) соответствует «традиционному» МСТ;  
б) соответствует МОП-шунтировке МСТ

Приведенная структура позволяет получить хорошее сочетание расчетных характеристик. На кристалле напряжением до 6500 В при плотности тока 200 A/cm<sup>2</sup> удается получить падение напряжения 1,5–2 В при сопоставимых с IGBT потерях при переключении.

Реализация такой структуры на практике вызывает следующие затруднения:

- технологически сложно сформировать такую пятислойную структуру, в которой три слоя противоположной проводимости формируются диффузией с планарной стороны подложки;
- чрезвычайная «чувствительность» прибора к качеству изготовления канала выключения. Для безопасного выключения необходимо обеспечить шунт эмиттера, падение напряжения на котором не превышало бы 0,25 В при протекании тока 300–1000 A (при учете локализации тока) в пересчете на 1 см<sup>2</sup> активной площади кристалла.

Указанные трудности усложняют серийное освоение «традиционного» МСТ даже передовыми зарубежными фирмами.

Тиристор с МОП-шунтировкой на рис. 2б имеет значительно более простую конструкцию. Его включение производится аналогично «традиционному» МСТ. Для выключения сформирована специальная МОП-структура, при подаче положительного напряжения на затвор которой происходит шунтирование n<sup>+</sup>-эмиттера тиристорной структуры.

Недостатком конструкции является необходимость управления включением и выключением по двум различным управляющим электродам. Второй фатальный недостаток, препятствующий применению,— проблема организации эффективного шунта для выключения, присущая также «традиционному» МСТ. В результате прибор МСТ не получил развития.

### EST (Emitter Switched Thyristor)

Структура ячейки различных модификаций EST приведена на рис. 3. «Традиционный» EST на рис. 3а интегрирует в своей структуре две МОП-структуры с общим затвором и область катодного n-эмиттера, которая находится в выключенном состоянии под плавающим потенциалом. При подаче на затвор положительного напряжения осуществляется коммутация этой области с катодным контактом и с высокомомной дрейфовой областью, затем происходит включение тиристорной области по аналогии с МСТ. При выключении обе МОП-структуры отключают зону «плавающего» эмиттера от катода и дрейфовой областью, так что далее эта зона не участвует в проведении тока. При этом структура становится аналогичной p-n-p-транзистору с «оторванной» базой и выключается по соответствующему механизму.

В двухканальном EST на рис. 3б зона плавающего эмиттера окружена своей p-областью, не связанной с катодной областью. Управление производится одной МОП-структурой с двумя индуцируемыми n-каналами, которая осуществляет коммутацию или разрывы катодной области с плавающей эмиттерной зоной и дрейфовой областью (для включения). В этой конструкции катодная секция вместе с МОП-структурой полностью подобна ячейке IGBT, а зона плавающего эмиттера, окруженная собственной p-областью, образует дополнительный элемент, вписанный в промежуток между ячейками IGBT.

Ячейка двухзатворного EST на рис. 3в представляет собой объединение ячеек «традиционного» и двухканального EST.

Характеристики трех разновидностей EST достаточно близки. При сравнении с прибором МСТ отличие EST состоит в следующем:

- прибор намного проще в изготовлении, причем для двухканального EST маршрут изготовления и технологические процессы практически идентичны маршруту и процессам для IGBT;
- падение напряжения на включенном EST превышает падение напряжения на МСТ примерно на 0,2–0,5 В, причем у EST оно составляет 1,7–2,5 В, а у МСТ — 1,5–2 В;
- ток безопасного отключения определяется не эффективностью МОП-шунтировки, как у МСТ, а эффективностью традиционной шунтировки эмиттера паразитного тиристора и напряжением лавинного пробоя зоны плавающего эмиттера. Конструктивно и технологически оба последних требования выполняются проще, чем требования к МОП-шунтировке МСТ для обеспечения безопасно отключаемого тока.

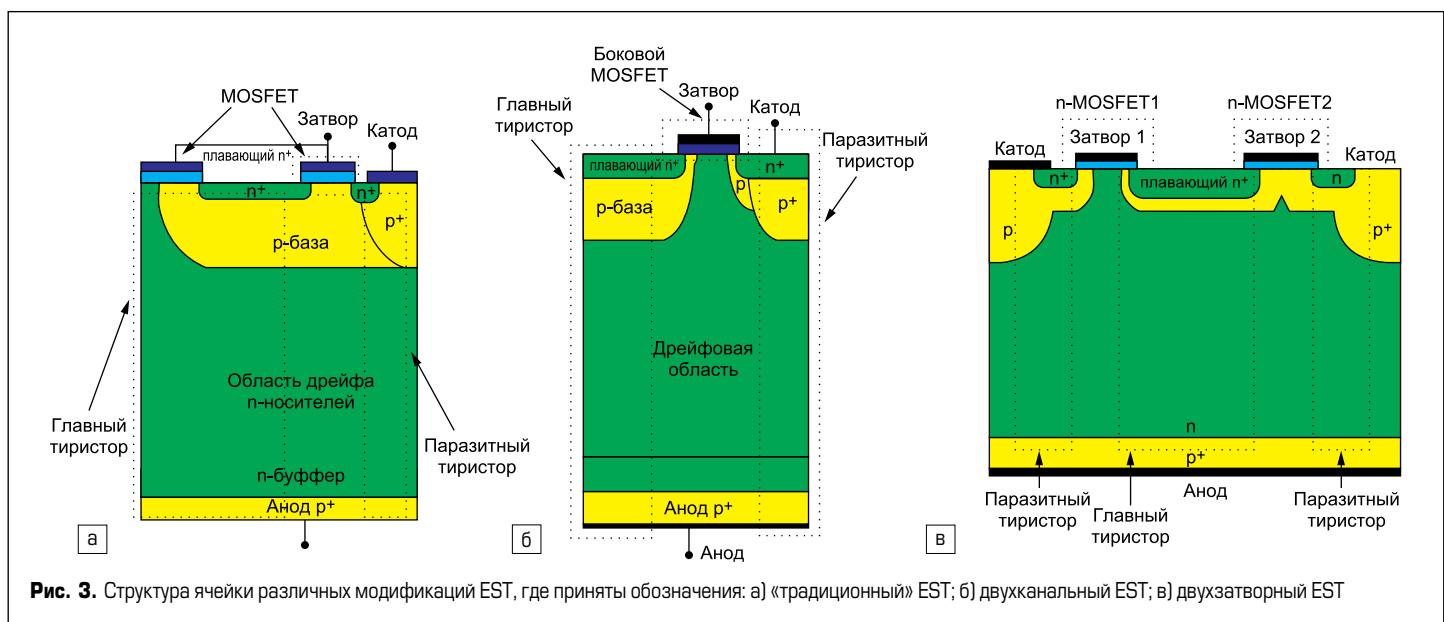
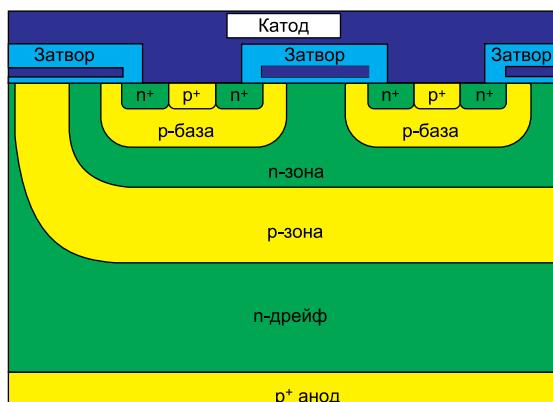


Рис. 3. Структура ячейки различных модификаций EST, где приняты обозначения: а) «традиционный» EST; б) двухканальный EST; в) двухзатворный EST



**Рис. 4.** Слева – структура ячейки CIGBT-кластеризованного IGBT; справа – схема замещения ячейки CIGBT

### CIGBT (Clustered IGBT)

Структура ячейки CIGBT-кластеризованного IGBT приведена на рис. 4, на нем же справа представлена схема замещения ячейки CIGBT.

Прибор представляет тиристорную структуру, *n*-эмиттер подключается к катоду с помощью низковольтного ДМОП-транзистора. Включение прибора происходит по механизму, описанному для МСТ при формировании каналов крайней для ячейки секции затвора и коммутации катода с дрейфовой областью (*n*-дрифт). Одновременно ДМОП-транзистор подключает к катоду эмиттер тиристорной структуры.

Включение происходит аналогично описанному для EST после снятия напряжения с затвора. При этом эмиттер тиристорной структуры становится плавающей зоной и в проведении тока не участвует. Для проведения тока переходного процесса зоны *p*-база и *p*-зона соединены между собой (соединения на рис. 4 не показаны).

Прибор представляет собой дальнейшее развитие семейства EST. На рис. 5 показан вариант ячейки тренч-CIGBT в виде тренч-МОП-транзистора, который позволяет мини-

мизировать соответствующую составляющую падения напряжения прибора. Конструкция позволяет применить эффективную «сетку» соединительных элементов между областями *p*-база и *p*-зона, чтобы получить исключительно высокие значения безопасно запираемых токов.

Недостатком конструкции является исключительно высокая технологическая сложность.

### Кристаллы двухмодальных транзисторов (BIGT) функционально совмещают IGBT и встречечно-параллельный диод

Ранее компанией ABB был предложен двухмодальный транзистор (BIGT), функционально совмещающий IGBT и встречечно-параллельный диод. На рис. 6 приведена структура двухмодального транзистора BIGT.

Предложенная конструкция развивает структуру IGBT с шунтированным нижним *p-n*-переходом, ранее приведенным для структуры с NPT IGBT (или RC IGBT). Диодная секция работает как встречечно-параллельный диод.

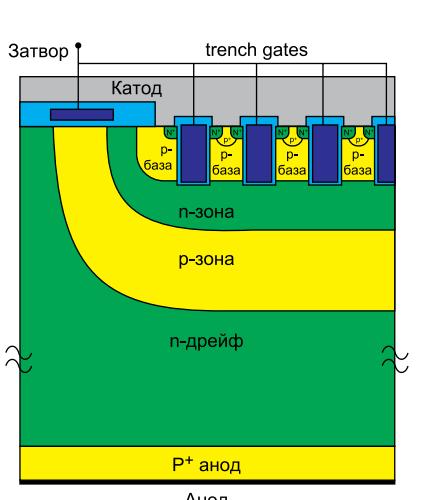
Ключ в виде IGBT со встречечно-параллельным диодом широко употребляется во многих конфигурациях модулей. Обычно он реализуется отдельными кристаллами IGBT и диода. Предложенный интегральный прибор позволяет в 1,5 раза сократить площадь, необходимую для размещения кристаллов ключа. Улучшается также тепловое сопротивление интегрального прибора за счет разновременной работы транзистора и диода, которое приводит к равномерному распределению тепла по всей площади основания модуля.

Ранее в RC IGBT предыдущих поколений применение диодных секций в качестве встречечно-параллельных диодов вызывало серьезные затруднения в части устранения явлений вторичного пробоя и безопасной работы, мягкости и малой энергии потерь при восстановлении диодных секций. По утверждению специалистов ABB, реализация технологии SPT+ в приборе BIGT позволяет преодолеть указанные затруднения.

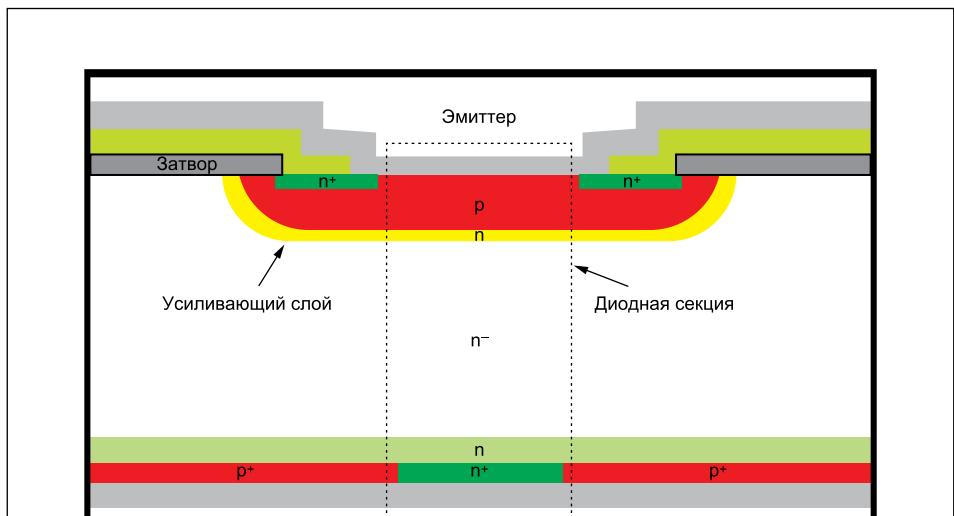
### Выводы

Рассмотрены структуры тиристора и силового запираемого тиристора (СЗТ), которые добились наибольших показателей сильноточности и высоковольтности среди широкой гаммы полупроводниковых приборов и предшествовали взлету популярности приборов IGBT и модулей на их основе. Анализируются приборы GCT и IGCT, которые отличают жесткая коммутация и минимальные потери на коммутацию.

Выполнено исследование структур тиристорных модифицированных высоковольтных ячеек-аналогов IGBT с накоплением избыточной электронно-дырочной плазмы вблизи коллекторного *p-n*-перехода. К их числу относятся МСТ (MOS Controlled Thyristor), EST (Emitter Switched Thyristor), CIGBT (Clustered IGBT). Рассмотрена структура двухмодальных транзисторов (BIGT), функционально совмещающих IGBT и встречечно-параллельный диод, нашедших широкое применение в модулях.



**Рис. 5.** Вариант ячейки тренч-CIGBT в виде тренч-МОП-транзистора



**Рис. 6.** Структура двухмодального транзистора BIGT

**Литература**

1. Шульга Р.Н. Энергетические характеристики преобразователей тока // Вести в электроэнергетике. 2021. № 6 (116).
2. Шульга Р. Н. Преобразовательные подстанции на тиристорах // Оперативное управление в электроэнергетике. 2021. № 6.
3. Шульга Р. Н. Преобразовательные подстанции на IGBT-транзисторах // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 12.
4. Шульга Р. Н. Приборы на основе карбида кремния — основа преобразователей для электроэнергетики // Силовая электроника. 2021. № 6.
5. Шульга Р. Н. Приборы на основе нитрида галлия — основа для преобразователей напряжения и частоты // Силовая электроника. 2021. № 6.
6. Шульга Р. Н. Преобразователи напряжения малой и большой мощности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 7.
7. Шульга Р. Н. Контроллеры DC/DC-конвертеров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 6.
8. Шульга Р. Н. Специальные вопросы электрооборудования. Часть 1. Контроллеры и преобразователи. М.: НТФ «Энергопресс», 2023.
9. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
10. Lehmann J., Netzel M., Pawel S., Doll Th. Method for Electrical Detection of End-of-Life Failures in Power Semiconductors. Semikron Elektronik GmbH.
11. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules // PCIM Europe Journal. 2003.
12. Thermal Considerations in the Application of Silicon Rectifier. IR Designer's Manual. 1991.
13. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Shorttime or Intermittent Duty. IEC 60747-6 by SEMIKRON.
14. Schmitt G. Ansteuerung von Hochvolt-IGBTs über optimierte Gatestromprofile. Dissertation. 2009.
15. Kaminski N. Leistungselektronik und Stromrichtertechnik 1 // Vorlesungs-skript Universität Bremen. 2009.
16. Knipper U. Untersuchungen zur Robustheit von IGBT-Chips im Lawinendurchbruch Dissertation. 2011.
17. Lutz J. Halbleiter-Leistungsbauelemente. Springer-Verlag, 2006.

**Силовые гибридные коннекторы с поддержкой 90 А от OUPINN**

Компания OUPINN разработала линейку силовых разъемов с поддержкой до 90 А на контакт — серию 9397. Разъем имеет в составе шесть силовых и 25 сигнальных контактов и допускает 1° отклонения в соединенном состоянии.

Коннекторы имеют укороченный контакт и подходят для применения в устройствах с горячей заменой.

Продукция представлена двумя позициями: 9397-1P06S25B7SAA01 и 9397-2P06S25B7PAA01.

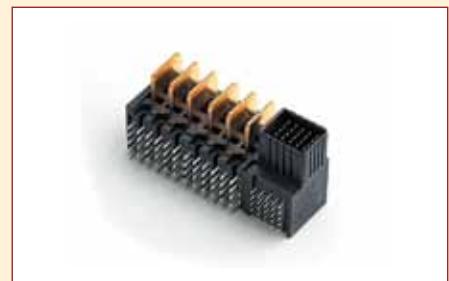
Особенности коннекторов серии 9397:

- поддержка 90 А на контакт;
- соответствие стандартам IEC-512-3;
- высота соединения: 20 мм.

Основные сферы применения:

- серверное оборудование;
- источники питания.

<https://macrogroup.ru/>

**Источники питания 150 и 200 Вт с широким входным диапазоном 12:1 от Traco Power**

Компания Traco Power выпустила DC/DC-источники питания мощностью 150 и 200 Вт с широким 12:1 входным диапазоном 14–160 В постоянного напряжения — TEP 150UIR и TEP 200UIR.

Устройства имеют стандартизованные размеры 1/2 brick, входной диапазон 14–160 В постоянного напряжения и несколько вариантов выходного напряжения: 5, 12, 15, 24, 48 В.

Серии TEP 150UIR и TEP 200UIR 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 серии DC/DC-источников питания:

- исполнение 1/2 brick: 2,3×2,3×0,5";
- рабочая температура: -40...+105 °C;

- сверхширокий диапазон входного напряжения 12:1: 14–160 В постоянного тока;
- 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.

Источники питания TEP 150UIR и TEP 200UIR имеют возможность подключения конденсатора задержки, что избавляет от необходимости использовать массивные конденсаторы на входе.

<https://macrogroup.ru/>

**IGBT-модули 1200 В 600-900 А от AMG Power**

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

Преимущества:

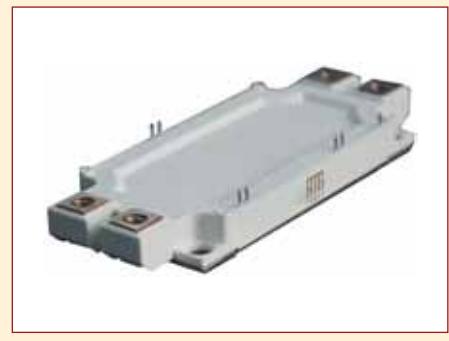
- низкое напряжение насыщения коллектор-эмиттер,  $U_{CE(sat)}$ : 1,5 В (при +25 °C);
- затвор IGBT-чипа по технологии МРТ (micro-pattern trench);
- низкие потери при переключении;

- надежность RBSOA;
- низкие потери при обратном восстановлении;
- низкое значение индуктивности,  $L_{sCE}$ : 20 нГн.

Применение модулей:

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

<https://macrogroup.ru/>





## ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ



Лидер по разработке и производству конденсаторов в Азии.



Разработка конденсаторов по техзаданию.



30-летний опыт работы. Более 137 патентов.



Надежные решения для преобразовательной техники.

Качество

Техподдержка

Гарантия

Склад в РФ



**ПРОМЭЛЕКТРОНИКА**

Официальный дистрибутор Cabo в РФ

8 800 1000-321 · [cabo@promelec.ru](mailto:cabo@promelec.ru)

[promelec.ru](http://promelec.ru)





## IGBT модули



- Японские кристаллы
- Транспортное и промышленное применения с частотой до 50 кГц
- Количество термоциклов в разы лучше чем у аналогов
- Техническая поддержка на всех этапах проектирования изделия
- Напряжение: 1200 В, 1700 В, номинальный ток 450 А, 600 А
- Напряжение изоляции 3400 В

Качество

Техподдержка

Гарантия

Склад в РФ



**ПРОМЭЛЕКТРОНИКА**

8 800 1000-321  
[a.volkov@promelec.ru](mailto:a.volkov@promelec.ru)  
[promelec.ru](http://promelec.ru)



реклама

# Российская силовая электроника: разворот на Восток и доступная функциональность.

## Часть 5. Zenli

**Денис Новоторженцев\***

denis\_n@prkexpert.ru

**Андрей Колпаков\***

akolpakov@prkexpert.ru

Авторы продолжают рассказывать о наиболее интересных производителях

компонентов силовой электроники из Китая. Предыдущие статьи, посвященные компаниям Xiner, Novosense, Firstack, AnXon, опубликованы в журнале «Силовая электроника» № 1-4'2023 [2-5].

К электронным компонентам, используемым в промышленных преобразователях, в частности диодно-тиристорным модулям, предъявляются все более высокие требования по плотности мощности и надежности. Компаниям-изготовителям, вынужденным решать столь противоречивые задачи, приходится вкладывать огромные средства в поиск новых технологий и совершенствование производства. Распространенное мнение о том, что применение выпрямительных полупроводниковых приборов не представляет никакой сложности, ошибочно, и в этом может убедиться каждый, кто прочитает серию статей «Диоды и тиристоры — это очень просто!», опубликованных в журнале «Силовая электроника» № 1-3'2012, № 4'2014, № 5'2018.

Технологии диодных и тиристорных модулей можно считать наиболее отработанными, тем не менее они являются неотъемлемой частью практически любого силового конвертера, поэтому такие компоненты вызывают неизменный интерес пользователей. Крупнейшим производителем выпрямительных мостов и диодно-тиристорных модулей в Китае считается TechSem. Однако есть еще одна компания, чья продукция удачно повторяет и дополняет номенклатуру TechSem, — это Zhejiang Zhengli Rectifier, или просто Zenli.

\*НПК «Эксперт».

### Знакомьтесь: Zenli

Компания Zhejiang Zhengli Rectifier Manufacturing Co., Ltd. (далее — Zenli), основанная в 1998 году, спе-

циализируется на разработке, производстве, продаже и послепродажном обслуживании силовых полупроводниковых приборов. Компания расположена в Люши, Вэньчжоу, Чжэцзян — столице электротехнической промышленности Китая. Основные продукты Zenli — диоды, тиристоры, выпрямительные мосты, твердотельные реле.

Фирма прошла сертификацию системы менеджмента и первой в отрасли получила европейский сертификат качества CE — ISO9001, экологический сертификат EU ROHS и другие. На Zenli создан центр исследований и разработок, совершенствуются производственные линии, посты контроля технологических процессов и сборки готовой продукции, освоена прецизионная штамповка, внедряются новые стандарты технологии производства, постоянно улучшается качество производственных процессов. В результате этого компании удалось сократить затраты и сделать продукцию более конкурентоспособной.

Zenli постоянно поддерживает и развивает сотрудничество с известными производителями силовой электроники по всему миру. Для лучшего удовлетворения потребностей клиентов и упрощения выбора компонентов на сайте компании показаны аналоги наиболее востребованных диодно-тиристорных модулей SEMIKRON, VISHAY, IXYS и других.



**Рис. 1.** В производственной программе Zenli — диодно-тиристорные модули, выпрямительные мосты, твердотельные реле, силовые сборки и многое другое

## Немного теории

### Конструкция диодно-тиристорных модулей

Проблема производства и модернизации стандартных продуктов, в частности диодов и тиристоров, состоит в том, что улучшение электрических и тепловых характеристик должно происходить без изменения размеров корпуса, а также способа крепления и подключения модулей. Замена устаревших компонентов на новые не должна требовать какой-либо доработки конструкции изделия. Это непосредственно относится к таким распространенным и популярным компонентам, как изолированные диодно-тиристорные модули.

Совершенствование конструкции выпрямительных силовых модулей ведется по многим направлениям, главное из которых — сокращение количества промежуточных слоев, необходимое для снижения теплового сопротивления. Пример такого эволюционного изменения показан на рис. 2, где видно, что у модуля (рис. 2б) отсутствуют многие переходные слои. Это позволяет уменьшить суммарное значение  $R_{th}$  и стоимость прибора, однако платой за подобное упрощение становится ухудшение стойкости к термоциклированию. Например, молибденовые пластины на рис. 2а предназначены именно для улучшения согласования коэффициентов теплового расширения (КТР или СТЕ — Coefficient of Thermal Expansion) и повышения надежности работы модуля в условиях циклического изменения нагрузки.

Тем не менее «упрощенный» модуль на рис. 2б получается заметно дешевле, а высокая стойкость к термоциклированию во многих случаях не является обязательным требованием. Важно отметить, что он полностью совместим с вариантом рис. 2а по габаритным размерам и способу подключения силовых и сигнальных выводов. Для пользователей это означает, что замена таких приборов происходит без каких-либо изменений в конструкции подводящих шин и радиаторов.

### Тепловые характеристики и стойкость к термоциклированию

Паяные соединения считаются наиболее критическим элементом конструкции, во многом определяющим ресурс силовых ключей

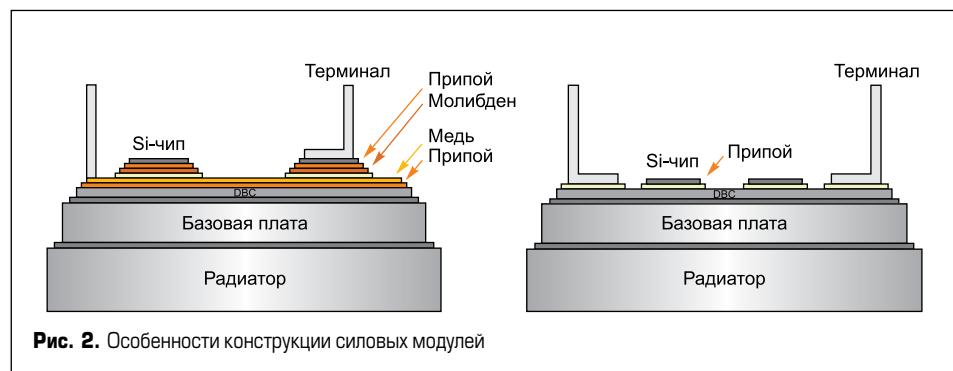


Рис. 2. Особенности конструкции силовых модулей

Коэффициенты теплового расширения (КТР, СТЕ)	
Si-кристалл	$4,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
DBC-подложка	$7,4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Медь	$17,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Алюминий	$25,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

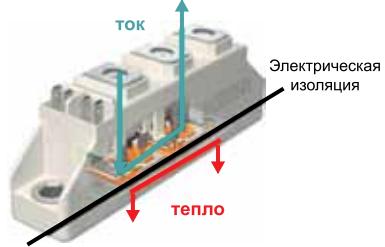


Рис. 3. Коэффициенты теплового расширения материалов стандартных диодно-тиристорных модулей

в условиях переменной нагрузки. Например, в течение срока службы стандартный диодно-тиристорный модуль (рис. 2а) способен выдержать не более 10 000 термоциклов с градиентом  $\Delta T_j = 100 \text{ K}$ . Основным механизмом отказа в данном случае является плавное разрушение паяных связей, вызванное усталостными процессами. Накопление усталости в слое пайки приводит к росту теплового сопротивления  $R_{th}$ , локальному перегреву чипов и преждевременному отказу компонента.

Величина  $R_{th(j-c)}$  (сопротивление «кристалл – корпус»), определяющая температуру перегрева чипа относительно корпуса на 1 Вт рассеиваемой мощности, является интегральным фактором, наиболее достоверно характеризующим тепловые свойства силового ключа. Упрощение конструкции и сокращение количества слоев позволяют снизить значение этого параметра до 30%.

Концепция изолированного силового модуля, впервые разработанная компанией SEMIKRON в 1975 году, состояла в разделении путей протекания электрических и тепловых

потоков (рис. 3б). В состав компонента входят различные материалы, отличающиеся термо-механическими характеристиками: полупроводниковые кристаллы, медные и алюминиевые проводники, керамика. Металлы и изоляторы с разной величиной КТР жестко связаны между собой. Вследствие этого любые колебания температуры чипов, вызванные изменениями тока нагрузки и внешних условий, приводят к возникновению термомеханических стрессов, действующих на сопрягающиеся слои.

В таблице на рис. 3 приведены значения КТР основных материалов конструкции изолированного силового модуля. С возрастанием градиента и средней температуры циклов увеличивается и риск разрушения связей. Уровень возникающего напряжения пропорционален разности КТР, площади контакта и перепаду температуры  $\Delta T$ .

Одно из возможных решений проблемы повышения стойкости силовых ключей к термоциклированию — замена паяных соединений чипов прижимными. Таким путем идут многие производители диодно-тиристорных

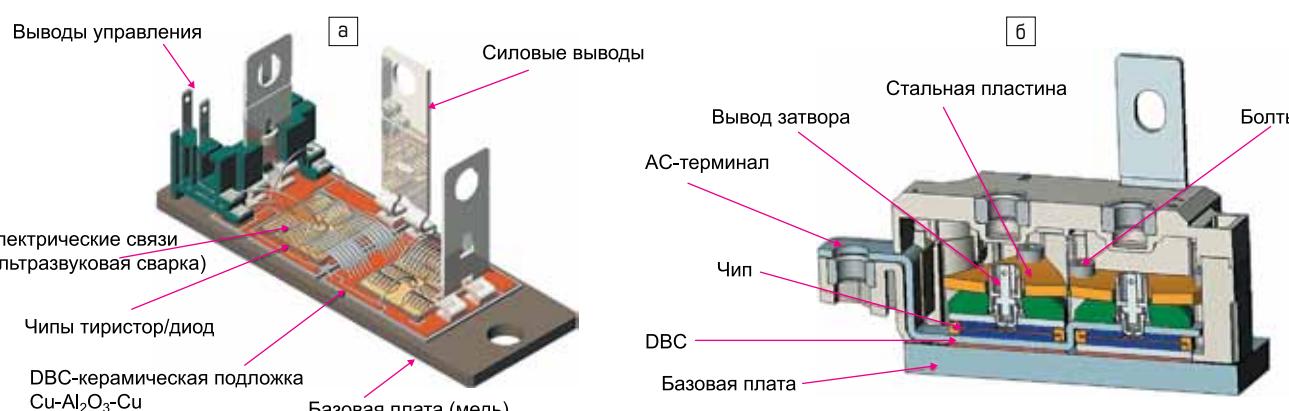


Рис. 4. а) Модуль с паяным соединением чипов; б) модуль с прижимным соединением чипов

**ZOL** // ZHEJIANG ZENLI ELECTRONIC CO., LTD.

STANDARD DIODE MODULE | 整流二极管模块

**Ordering Information Table**

Device Code:	M	T	C	F	200	H3	X
1. Power Module	1	1	1	1	1	1	1
2. Thyristor Diode	2	2	2	2	2	2	2
Kathode Thy. Zener diode	3	3	3	3	3	3	3
Circuit form: A-common positive pole G-common connection: A-common negative pole X-extreme parallel connection	4	4	4	4	4	4	4
Current Code: If <sub>200</sub>	5	5	5	5	5	5	5
Voltage Code: V <sub>200</sub>	6	6	6	6	6	6	6
Gate: Air-cool	7	7	7	7	7	7	7

**Features**

- Base & chip insulation AC voltage 2500V
- International standard packing
- Excellent temperature feature
- ≥300A could chose water-cool
- Easy to install

**Explanation**

- If<sub>200</sub> = I<sub>200</sub>, if<sub>200</sub> = half sine wave current when at 50Hz, If<sub>200</sub>=300A(A)
- When at 200V, If<sub>200</sub>(2m)=If<sub>200</sub>(10m) × 1.000,T<sub>p</sub>T<sub>20</sub> / If<sub>200</sub>(10m)×T<sub>p</sub>(10m) = 0.943,T<sub>p</sub>

**Applications**

- AC/DC motor control
- Motor soft start
- Industry heat-up control
- Rectifier power supply
- Welder
- Frequency transformer
- UPS power supply
- Battery charge & discharge

**Outline table (Dimension in mm)**

**Part number type & circuit**

**IXYS MOD**

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Symbol	Parameter	Conditions	MDX200	MDX250	MDX300	Unit
I <sub>FWAV</sub>	Peak collector-emitter current (Half-Wave)	Th=+140°C	200	250	300	A
I <sub>FWAVE</sub>	HBM on-state current	Th=+65°C	320	393	471	A
I <sub>FWM</sub>	Burst on-state current	8	11	12.5	A×10 <sup>3</sup>	
V <sub>DSS</sub>	Repetitive peak reverse voltage	Th=+140°C	400-2600	—	V	
I <sub>DM</sub>	Divisible voltage	Th=+140°C	≤20.0	≤20.0	≤20.0	mA
V <sub>FM</sub>	On-state Current	Th=+140°C	1.4	1.35	1.45	V
I <sub>TR</sub>	Gate Trigger Current	Th=+140°C	600	750	900	A
R <sub>J-C</sub>	Peak gate forward voltage	—	≤0.21	≤0.15	≤0.14	°C/W
T <sub>J</sub>	Junction temperature	—	-40→+150	—	—	°C
T <sub>SJg</sub>	Storage temperature	—	-40→+125	—	—	°C
MT	Mounting torque	—	5.0	—	—	N·m
WT	Weight	Typical value	880	870	880	g

Рис. 5. Фрагмент технической документации на диодно-тиристорные модули с номинальным током 200–300 А

модулей, включая Zenli, разница в конструкции данных компонентов показана на рис. 4. В варианте рис. 4а кристаллы устанавливаются на изолирующей DBC-подложке (как правило, она изготавливается из оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) методом пайки. Подключение электрических контактов чипов к медным токонесущим трассам осуществляется ультразвуковой сваркой алюминиевых проводников, а силовые и сигнальные терминалы модуля соединяются с помощью пайки. Такая технология обеспечивает минимальное тепловое сопротивление «кристалл – корпус»  $R_{th(j-c)}$ , и практически все диодно-тиристорные модули с номинальным током до 200 А имеют подобную конструкцию.

С увеличением тока нагрузки растут требования по стойкости силовых приборов к термоциклированию, поэтому выпрямители Zenli с рабочим током более 300 А выпускаются в прижимном варианте. Особенности прижимной конструкции показаны на рис. 4б — здесь полностью отсутствуют паяные и сварные соединения, а все электрические и тепловые связи кристаллов и выводов осуществляются только за счет прижима.

### Zenli — номенклатура

На рис. 5 показан фрагмент технической спецификации диодно-тиристорных модулей MT\*200 и MT\*300. Следует обратить внимание, что компоненты выпускаются в различных типах корпусов, соответствующих извест-



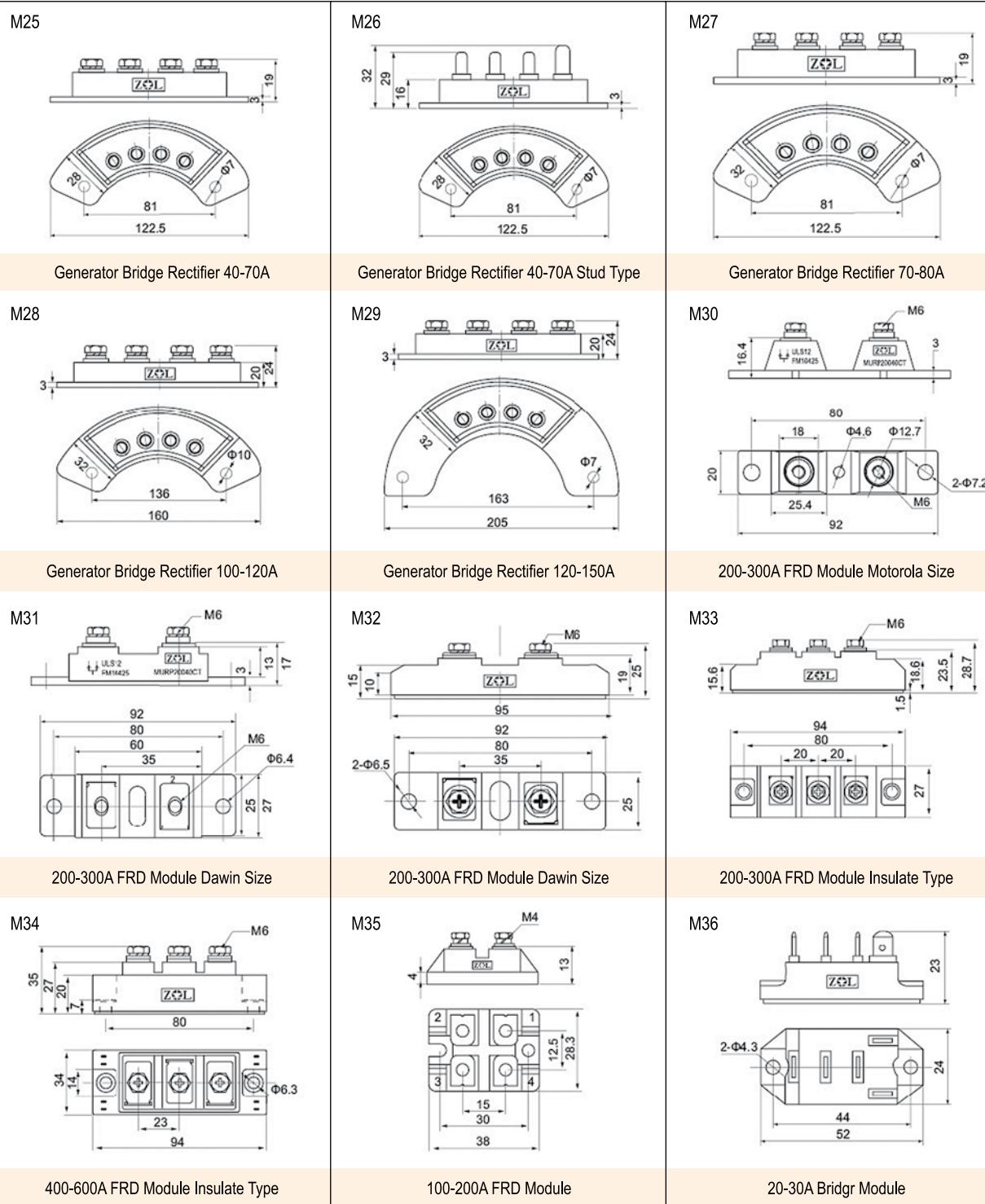
Рис. 6. Диодно-тиристорные модули Zenli в изолированных корпусах

ным мировым брендам, — это значительно облегчает заказчикам выбор нужной модели. Кроме стандартных корпусов с медной базовой платой, некоторые силовые модули имеют исполнение с жидкостным охлаждением (MFC800, MFC1000 на рис. 6), что редко встречается у европейских производителей. В капсулном исполнении (рис. 7) выпускаются стандартные и быстрые диоды и тиристоры с рабочим напряжением до 5 кВ и током до 5000 А, а также симисторы.

Кроме диодно-тиристорных модулей, новая линейка Zenli включает различные классы выпрямительных мостов (однофазных и трех-



**Рис. 7.** Диодно-тиристорные модули Zenli в капсулных корпусах.  
В таком конструктиве также выпускаются быстрые диоды и тиристоры



**Рис. 8.** Типы корпусов модулей Zenli (фрагмент)

**Таблица.** Группы компонентов Zenli и их основные характеристики

Диодные и диодно-тиристорные модули			
$IT_{(AV)}$ , A	$V_{RRM}/V_{DRM}/V_{TRM}$ , В	$V_{ISO}$ , В AC	Корпус
25–1000	400–2600	2500	M1, M2, M3, M4, M5, M7, M8, M9, M10, M11, M13, M16
Диодные выпрямительные мосты (однофазные и трехфазные)			
$IF_{(AV)}$ , A	$V_{RRM}$ , В	$V_{ISO}$ , В AC	Корпус
25–1000	10–2000	2500	M24, M25, M26, M27, M28, M43, M44, M46, M47, M48 M52, M53, M54, M55
Тиристорные выпрямительные мосты (1- и 3-фазные)			
$IF_{(AV)}$ , A	$V_{RRM}$ , В	$V_{ISO}$ , В AC	Корпус
25–300	400–2600	2500	M39, M40, M43, M52, M53
Быстрые диоды (Шоттки и сверхбыстрые)			
$IF_{(AV)}$ , A	$V_{RRM}$ , В	$V_{ISO}$ , В AC	Корпус
25–300	100–400	2500	M31, M31, M32, M33, M34
Дискретные диоды и тиристоры (в том числе капсулные)			
$IF_{(AV)}$ , A	$V_{RRM}/V_{DRM}/V_{TRM}$ , В	$V_{ISO}$ , В AC	Корпус
6–5000	400–16 000	—	DO-4, DO-5, DO-9, DO-30, E1, E2, E3, E5, E6, E8, E9, E11, E12, E13, E14, E15, E16, E23, E24, E25

фазных), дискретных диодов и тиристоров (в том числе в капсулном исполнении), а также выпрямительные сборки. Группы компонентов и их основные параметры приведены в таблице.

На рис. 8 представлен фрагмент таблицы с описанием корпусов, используемых Zenli при производстве диодно-тиристорных модулей, дающий представление о широком выборе вариантов исполнения. С полной номенклатурой можно ознакомиться на сайте компании [1].

### Заключение

Вся продукция компании Zenli имеет соответствующие сертификаты качества и надежности, для чего она проходит специальные квалификационные тесты. Целью таких испытаний является определение эксплуатационных пределов для различных условий эксплуатации, проверка соответствия уровня производства, оценка возможного влияния технологических

и конструкторских изменений на надежность изделий. Наиболее пристальное внимание уделяется оценке надежности полупроводниковых кристаллов и конструктивов модулей.

Компоненты нового поколения отличаются меньшим значением теплового сопротивления, повышенной плотностью тока и улучшенными перегрузочными характеристиками, они полностью соответствуют требова-

ниям экологических директив EU 2002/96/EG и 2000/53/EG.

### Литература

1. [www.chinazenli.com/](http://www.chinazenli.com/)
2. Колпаков А., Новоторженцев Д. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Часть 1. Xiner // Силовая электроника. 2023. № 1.
3. Колпаков А., Новоторженцев Д. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Часть 2. Novosense // Силовая электроника. 2023. № 2.
4. Колпаков А., Новоторженцев Д. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Часть 3. Firstack // Силовая электроника. 2023. № 3.
5. Колпаков А., Новоторженцев Д., Ли К. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Часть 4. AnXon // Силовая электроника. 2023. № 4.
6. Винтрич А и др. Диоды и тиристоры — это очень просто // Силовая электроника. 2012. № 1–3. Ч. 1–3; 2014. № 4. Ч. 4; 2018. № 5. Ч. 5.
7. Ma J., Gill M. New Assembly Technology for Soldered Thyristor Modules. Semikron international, 2008.



## Расширение номенклатуры IGBT-транзисторов в корпусах TO-247 и TO-247PLUS от Yangjie

Компания Yangjie расширила номенклатуру выпускаемых силовых IGBT-транзисторов в корпусах TO-247 и TO-247PLUS. Ассортимент включает изделия с пробивным напряжением коллектор-эмиттер 1200 В. Диапазон токов 40–75 А. Основные применения — высокочастотные устройства, такие как фотоэлектрические инверторы, накопители энергии, зарядные станции и т. д. Новые IGBT способны заменить дефицитные компоненты глобальных производителей без дополнительной переработки устройства. Соответствует стандартам RoHS.

Основные особенности новых IGBT-транзисторов:

- структура Trench-FS имеет улучшенное соотношение блокирующего напряжения и напряжения насыщения;
- максимальная температура перехода  $T_{jmax} = +175^{\circ}\text{C}$ ;
- высокие характеристики эффективности с низким  $V_{ce(sat)}$  и низкими потерями переключения, подходят для устройств новой энергетики;
- встроенный антипараллельный сверхбыстрый диод с «мягкой» характеристикой восстановления.

<https://macrogroup.ru/>

## Гибридный Si IGBT + SiC-диод Шоттки 650 В 60 А от Global Power Technology

Компания Global Power Technology выпустила гибридный Si IGBT + SiC-диод Шоттки 650 В 60 А в корпусе TO-247-3, работающий на частоте 80–100 кГц, — G3C06560B.

Основные параметры G3C06560B:

- напряжение коллектор-эмиттер (UCES): 650 В;
- ток ( $I_{Cmax}$ ): 60 А (при  $T_C = +100^{\circ}\text{C}$ );
- энергия переключения ( $E_{on} + E_{off}$ ): 1,35 мДж;

- напряжение насыщения коллектор-эмиттер: 1,8 В;
- тепловое сопротивление ( $R_{th(jc)}$ ): 0,62 °C/Bt;
- корпус: TO-247AC.

Применение гибридного диода Шоттки:

- ИБП;
- инверторы.

<https://macrogroup.ru/>

# Одно семейство для решения всех задач: драйверы затворов Si, SiC и GaN

**Описываемое семейство интегральных драйверов имеет различные варианты защиты от пониженного напряжения (UVLO), разные уровни изоляции и типы корпусов, что обеспечивает комплексное решение разнообразных задач. В новой линейке микросхем использована инновационная технология изоляции, соответствующая требованиям современных стандартов. Устройства отличаются улучшенными электрическими характеристиками и функциями защиты, что гарантирует высокую эффективность и надежную работу в широком диапазоне температур, а также увеличенный срок службы. Интегральные драйверы могут использоваться в широком спектре приложений, включая серверные и телекоммуникационные SMPS, солнечные инверторы и системы накопления энергии, электроприводы и системы с батарейным питанием, зарядные станции электромобилей и высокопроизводительные компьютеры.**

**Кармен Бенедетти  
Матришиано  
(Carmen Benedetti  
Matrisciano)\*  
Диого Варахао, доктор  
(Diogo Varajao)\***

**Перевод:  
Евгений Карташев**

Изоляторы используются в широком спектре применений, от импульсных источников питания (SMPS) телекоммуникационных и серверных систем [1] до солнечных инверторов, промышленных электроприводов переменного тока и зарядных устройств для электромобилей (EV). Их основная задача — обеспечение необходимой защиты персонала от поражения электрическим током, а также защита чувствительных и дорогостоящих низковольтных компонентов, в частности контроллеров, от отказов высоковольтных силовых каскадов [2]. Изоляция часто необходима для прекращения опасных контуров заземления, подавления токов смещения и высокочастотных помех, поступающих обратно в цепи управления.

Цифровые изоляторы и изолированные интегральные драйверы затворов приобрели доминирующее положение на рынке благодаря их неоспоримым преимуществам по сравнению с традиционными решениями, такими как импульсные трансформаторы [2] и оптроны.

В статье описаны функциональные возможности и преимущества нового семейства двухканальных изолированных IC-драйверов EDi EiceDRIVER 2. Новое поколение микросхем выпускается в 14- выводном корпусе DSO для увеличения изоляционных зазоров между каналами, они обеспечивают формирование «мертвого времени» и защиту от сквозного тока, быстрый запуск, а также надежную изоляцию, соответствующую последним стандартам (VDE 0884-11, IEC 60747-17). Кроме того, доступны IC в миниатюрном корпусе LGA 4×4, обеспечивающем 36%-ную экономию места в низковольтных приложениях. Благодаря наличию нескольких вариантов защиты от пониженного напряжения (UVLO), исполнений корпусов и уровней изоляции это се-

мейство продуктов удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к различным импульсным устройствам (табл. 1).

## Технология изоляции с характеристиками MFI и CMTI, отвечающими требованиям новейших стандартов

В новом поколении интегральных схем EiceDRIVER 2EDi использована проверенная технология магнитной изоляции на основе трансформатора без сердечника (СТ). Рабочее повторяющееся напряжение 1767 В<sub>RMS</sub> обеспечивается в течение срока службы 20 лет, что соответствует требованиям по времязависимой стойкости диэлектрика к пробою VDE 0884-11 и IEC 60747-17 — последнего стандарта для магнитных и емкостных изоляторов. Запатентованный чип-трансформатор с двойной катушкой гарантирует высокую устойчивость к магнитному полю (MFI), соответствующую самым строгим нормативам стандартов IEC 61000-4-8, IEC 61000-4-9, ISO 11452-8 и MIL-STD-461G-RS101. Он также обеспечивает высокую устойчивость к синфазным помехам (CMTI) — более 150 В/нс, что необходимо для управления широкозонными приборами (WBG), такими как SiC и GaN.

## Надежная изоляция силового каскада для защиты от электрической перегрузки (EOS)

В случае электрической перегрузки очень важна надежность изоляции, особенно если речь идет о потенциальном сбое или отказе силового каскада, отделенного усиленным изоляционным барьером. На рис. 1 показан один из наихудших сценариев, ког-

Таблица 1. Особенности нового и предыдущего поколения IC-драйверов EiceDRIVER 2EDi

Корпус	Название микросхемы	Гальваническая изоляция			Выходной каскад			Входы управления			Область применения
		Рабочее напряжение	Сертификаты	CMTI, В/нс	Выходной ток включения/выключения, А	Уровень UVLO (ном.), В	Порог UVLO, мкС	Каналы	Опции STP/DTC	DIS/EN	
	2EDS7165H	$V_{ISO} = 5700 \text{ B}_{RMS}$	* UL1577 Single protection * EN 62368-1 Reinforced isolation * GB4943.1 Reinforced	150	1/2	4	5	INA, INB	-	DIS	* ИП для телекоммуникационного оборудования, входные каскады HV DC/DC (в том числе LLC) с усиленной изоляцией * Солнечные микроприводы и оптимизаторы мощности * Бортовые зарядные устройства EV
	2EDS8165H					8					
	2EDS8265H					8					
	2EDS9265H					13					
	2EDR8259H	$V_{ISO} = 5700 \text{ B}_{RMS}$ $V_{IOSM} = 8000 \text{ B}_{pk}$ $V_{IOSM} = 6875 \text{ B}_{pk}$	* VDE 0884-11 * IEC 60747-17 Reinforced isolation * UL1577 Single protection * EN 62368-1 Reinforced isolation * GB4943.1 Reinforced	150	5/9	8	2	INA, INB	да	DIS	* Солнечные микроприводы и оптимизаторы мощности * Бортовые зарядные устройства EV
	2EDR7259X					4					
	2EDR8259X					8					
	2EDR9259X					15					
	2EDR8258X					8					
	2EDR9258X					15					
	2EDR6258X					12					
	2EDF7175F	$1500 \text{ B}_{DC}$	* functional	150	1/2	4	5	INA, INB	-	DIS	* ИП для телекоммуникационного оборудования (в том числе полумостовые ККМ, выпрямители Vienna) * Низковольтные приводы с проблемой «отсюда от земли» (LEV, садовые инструменты, вильчатые погрузчики)
	2EDF7275F					4					
	2EDF8275F					8					
	2EDF9275F					13					
	2EDB8259F	$V_{ISO} = 3000 \text{ B}_{RMS}$ $V_{IOSM} = 4242 \text{ B}_{pk}$ $V_{IOSM} = 6000 \text{ B}_{pk}$	* UL1577 Single protection * GB4943.1 Basic	150	5/9	8	2	INA, INB	да	DIS	* Неизолированные инвертирующие повышающе-понижающие каскады * Изолированные DC/DC-каскады * Низковольтные приводы с проблемой «отсюда от земли» (LEV, садовые инструменты, вильчатые погрузчики)
	2EDB7259Y					4					
	2EDB8259Y					8					
	2EDB9259Y					15					
	2EDF7275K	$1500 \text{ B}_{DC}$	* functional	150	5/9	4	5	INA, INB	-	DIS	* Изолированные DC/DC-каскады * Низковольтные приводы с проблемой «отсюда от земли» (LEV, садовые инструменты, вильчатые погрузчики)
	2EDF7235K					4					
	2EDB7259K	$V_{ISO} = 2500 \text{ B}_{RMS}$ $V_{IOSM} = 3535 \text{ B}_{pk}$ $V_{IOSM} = 6000 \text{ B}_{pk}$	* UL1577 Single protection * GB4943.1 Basic	150	5/9	4	2	INA, INB	да	DIS	* Низковольтные приводы с проблемой «отсюда от земли» (LEV, садовые инструменты, вильчатые погрузчики)
	2EDB8259K					8					
	2EDB7259E	$V_{ISO} = 2250 \text{ B}_{RMS}$ $V_{IOSM} = 3181 \text{ B}_{pk}$ $V_{IOSM} = 4000 \text{ B}_{pk}$	* UL1577 Single protection * GB4943.1 Basic	150	5/9	4	2	INA, INB	да	DIS	* Низковольтные приводы с проблемой «отсюда от земли» (LEV, садовые инструменты, вильчатые погрузчики)
	2EDB8259E					8					

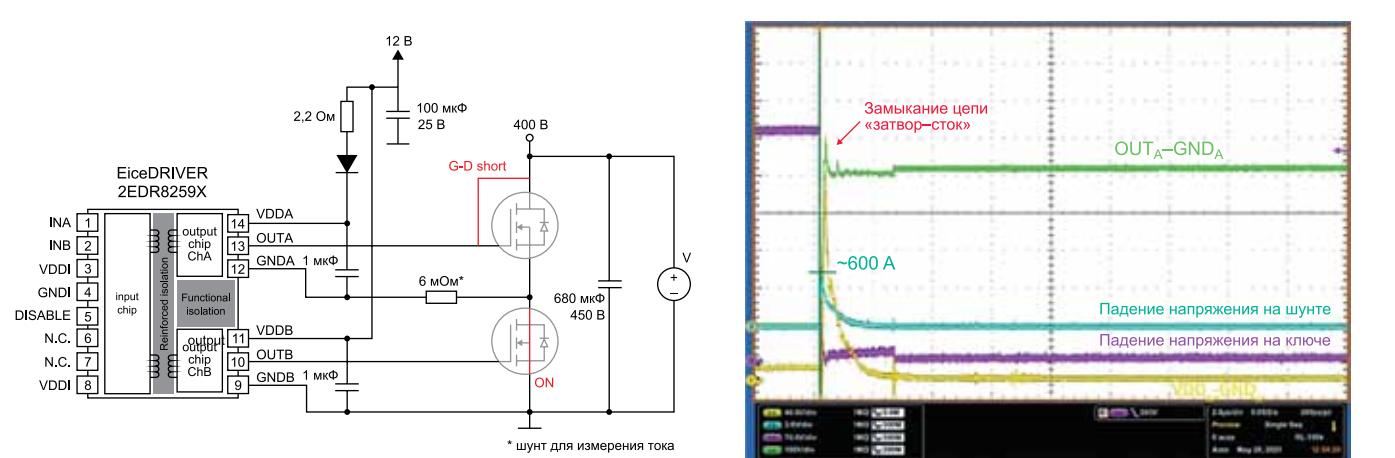


Рис. 1. Критическая перегрузка (EOS) силового каскада, которая может привести к пробою изолирующего барьера. Несмотря на высокую энергию, поступающую в драйвер (ток до 600 А протекает через выход OUTA до испарения соединительного проводника и разрыва корпуса), EiceDRIVER 2EDRx259H гарантирует целостность усиленной изоляции

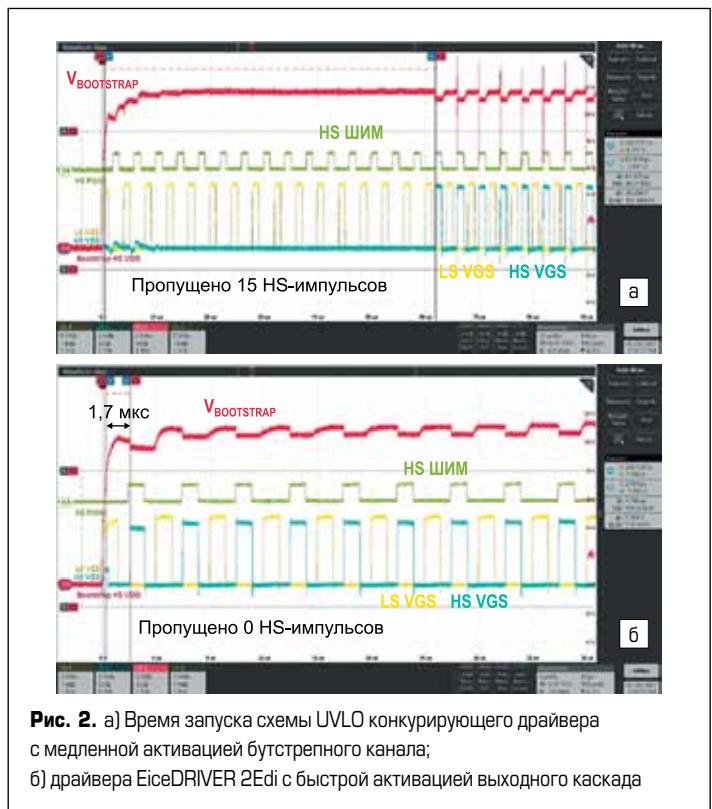
да изолированные драйверы EiceDRIVER 2EDRx259X используются в схеме LLC-конвертера и один силовой ключ выходит из строя, что сопровождается замыканием цепи «затвор–сток», в то время как другой ключ проводит ток.

Без защитного диода между выходом драйвера и его заземлением большое количество энергии передается от конденсатора питания (в данном примере 680 мкФ) непосредственно в драйвер, что приводит к электрическому повреждению выходного чипа в канале A (ChA) и разрушению прибора из-за обрыва соединительных проводников. Драйвер EiceDRIVER 2EDRx259X обеспечивает полную изоляцию

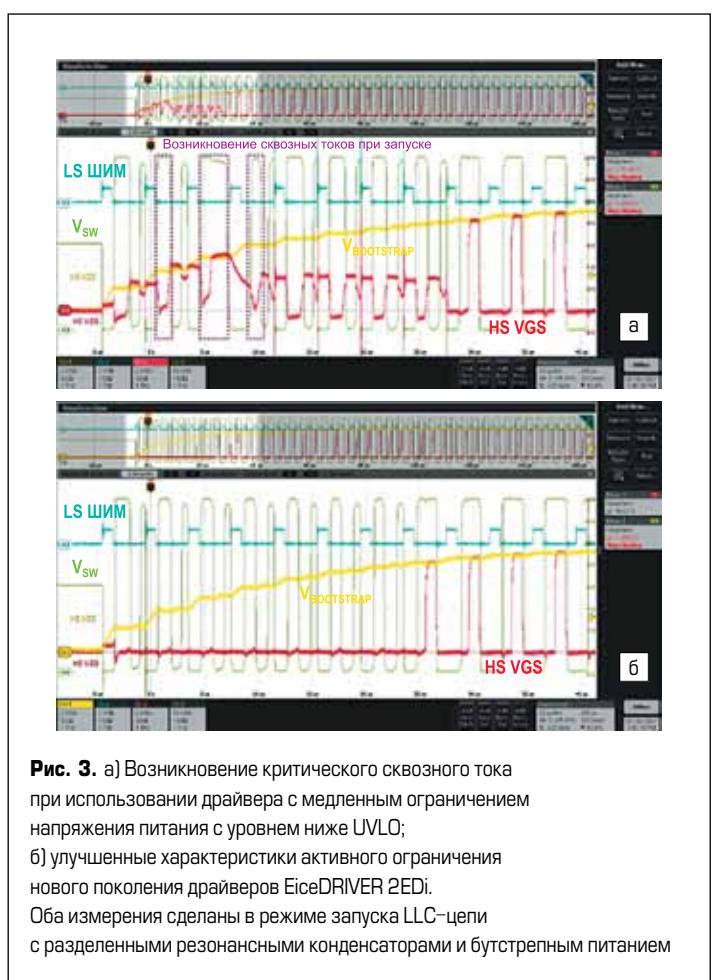
Таблица 2. Надежность изоляции в сценарии EOS выходного каскада после теста Hi-Pot приnomинальном напряжении  $V_{ISO}$

Прибор	Прохождение высоковольтного Hi-Pot теста* после воздействия EOS
2EDRx259X/H	Тест пройден
Конкурент 1	Тест пройден
Конкурент 2	Тест не пройден
Конкурент 3	Тест не пройден

Примечание. \*  $V_{ISO} = 5700 \text{ B}_{RMS}$  (60 с),  $V_{ISO} = 5000 \text{ B}_{RMS}$  для конкурентов 1, 2, как указано в спецификации.



**Рис. 2.** а) Время запуска схемы UVLO конкурирующего драйвера с медленной активацией бутстрепного канала;  
б) драйвера EiceDRIVER 2EDi с быстрой активацией выходного каскада



**Рис. 3.** а) Возникновение критического сквозного тока при использовании драйвера с медленным ограничением напряжения питания с уровнем ниже UVLO;  
б) улучшенные характеристики активного ограничения нового поколения драйверов EiceDRIVER 2EDi.  
Оба измерения сделаны в режиме запуска LLC-цепи с разделенными резонансными конденсаторами и бутстрепным питанием

даже в случае мощной электрической перегрузки благодаря надежной изоляции, встроенной в чип первичного каскада (input chip). Конкурирующие приборы 2 и 3, использующие технологию емкостной изоляции, проваливают тест Hi-Pot после электрической перегрузки. В таблице 2 приведены результаты испытаний Hi-Pot при номинальном напряжении  $V_{ISO}$  после воздействия EOS.

### Быстрый отклик UVLO

Для питания схемы управления MOSFET верхнего плеча часто применяется бутстрепная схема, что обусловлено ее простотой и низкой стоимостью. Однако это может создавать и различные проблемы, поскольку во время запуска системы бутстрепный источник и источник питания нижнего плеча неактивны из-за своих особенностей. Питание в канале верхнего уровня появляется только после некоторой задержки, определяемой параметрами бутстрепного конденсатора и резистора.

Многие IC-драйверы, представленные на рынке, имеют время запуска схемы UVLO порядка десятков мкс (рис. 2а), что означает пропуск нескольких импульсов в верхнем плече, в то время как MOSFET низкого уровня включается и выключается в нормальном режиме. Это может привести к негативным последствиям, в частности, создать дисбаланс в двух резонансных конденсаторах, присутствующих в топологии LLC. При неправильном управлении это создает серьезные проблемы с коммутацией, а также может стать причиной асимметрии напряжения на трансформаторе и привести к насыщению сердечника. Время запуска схемы UVLO у нового поколения EiceDRIVER 2EDi имеет стандартное значение менее 2 мкс, то есть активация верхнего канала обеспечивается менее чем за один импульс (рис. 2б).

### Быстрое активное ограничение для предотвращения пробоя

Еще одна потенциальная проблема, связанная с бутстрепной схемой, может возникнуть, когда шумы, наведенные на затворе MOSFET верхнего плеча, неэффективно подавляются драйвером, который все еще неактивен, поскольку напряжение бутстрепного питания ниже уровня UVLO.

Один из таких примеров — запуск схемы LLC с разделенными резонансными конденсаторами (рис. 3). Если в устройстве не предусмотрена специальная последовательность запуска, то MOSFET верхнего уровня будет выключен до тех пор, пока (после определенной задержки) бутстрепное питание не приблизится к порогу UVLO, что создает дисбаланс напряжения на резонансном конденсаторе и нежелательный сбой режима переключения (выделено зеленым цветом). Каждый отрицательный фронт  $dV/dt$  в точке коммутации будет заряжать затвор транзистора верхнего плеча (выделено пурпурным цветом) за счет эффекта Миллера.

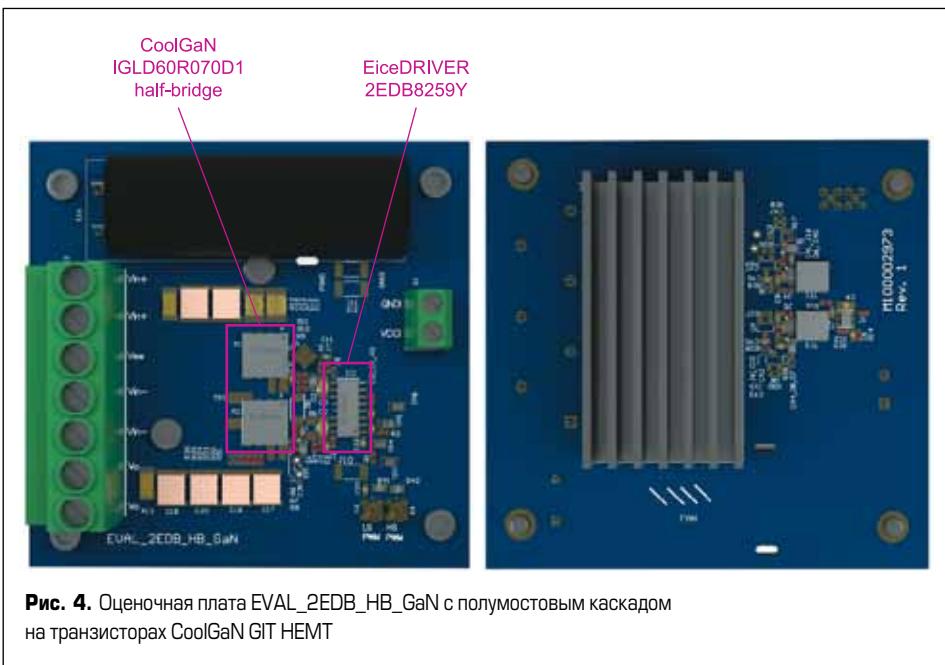
Новое поколение драйверов EiceDRIVER 2EDi содержит специальную схему активного ограничения для подавления выходных шумов, даже если канал неактивен (питание ниже UVLO), что позволяет избежать возникновения опасных сквозных токов, как отражают результаты измерений (рис. 3).

### Точный контроль временных характеристик и «мертвого времени» (DTC)

Новое поколение драйверов EiceDRIVER 2EDi предназначено для управления быстрыми ключами, в частности широкозонными приборами (WBG). Хорошее согласование задержки распространения сигналов и высокая точность задания «мертвого времени»  $T_{dt}$  (табл. 3) обеспечивают идеальную временную синхронизацию импульсов управления затворами (например, при диагональном контроле) и оптимизацию значения  $T_{dp}$ , что существенно повышает надежность и эффективность системы.

**Таблица 3.** Точные временные характеристики позволяют управлять широкозонными приборами (WBG)

Параметр	Значение
Разброс времени задержки включения от образца к образцу (макс.), нс	6
Разброс времени задержки выключения от образца к образцу (макс.), нс	8
Разброс времени задержки включения между каналами А и В, нс	-4...+4
Разброс времени задержки выключения между каналами А и В, нс	-5,5...+3
Разброс времени задержки от выключения к включению, нс	-5...+1
Искажение длительности импульса, нс	-5...+5,5



**Рис. 4.** Оценочная плата EVAL\_2EDB\_HB\_GaN с полумостовым каскадом на транзисторах CoolGaN GIT HEMT

Кроме того, важными факторами безопасности «второго уровня» являются настраиваемая защита от сквозного тока (STP) и контроль «мертвого времени» (DTC), встроенные в аппаратную часть IC-драйвера затвора. Оценочная плата EVAL\_2EDB\_HB\_GaN (рис. 4) содержит двухканальный изолированный драйвер EiceDRIVER 2EDB8259Y, управляющий дискретными транзисторами GaN-HEMT. Устройство позволяет проводить тестирование в различных режимах работы и с различными подходами к управлению затвором (однополярное или биполярное управление, изолированное или неизолированное бутстрепное питание).

Испытания, проведенные с помощью транзисторов GIT HEMT, демонстрируют надежную работу в мегагерцовом диапазоне частот при мощностях в несколько кВт [3]. Плата также содержит источник питания, настраиваемый для работы в биполярном или

униполярном режиме управления с различными уровнями напряжения, и опцию однопроцентного регулирования напряжения, что особенно важно при управлении GaN HEMT с затвором Шоттки (SG). Подробная информация об универсальной схеме управления затвором как для 650-В GIT, так и для SG GaN HEMTs дана в [4].

### Заключение

В новом поколении интегральных драйверов EiceDRIVER 2EDi сочетаются преимущества высоконадежной технологии изоляции с отличными электрическими характеристиками. Возможности компонентов семейства удовлетворяют жестким современным требованиям, обеспечивая высокую эффективность преобразования и надежную работу системы в широком диапазоне температур в течение длительного срока службы.

Линейка продуктов семейства EiceDRIVER 2EDi включает различные типы корпусов и уровни изоляции, что позволяет адаптировать изделие для различных топологий схем и режимов работы. Более подробная информация о новом поколении EiceDRIVER 2EDi представлена в специальном руководстве по применению [3] и на веб-сайте продукта.

### Литература

1. Infineon Technologies AG. Using the EiceDRIVER 2EDi product family of dual-channel functional and reinforced isolated MOSFET gate drivers. Application Note v4.0, March 2022. AN\_1805\_PL52\_1806\_095202. [www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/dual-channel-isolated-gate-driver-eicedriver-2edi/#!fileId=5546d46267354aa001675a431da84a41](http://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/dual-channel-isolated-gate-driver-eicedriver-2edi/#!fileId=5546d46267354aa001675a431da84a41)
2. Varajao D., Menditti Matrisciano C. Isolated gate driving solutions — Increasing power density and robustness with isolated gate driver ICs. Infineon Technologies AG, Application Note v1.1, AN\_1909\_PL52\_1010\_201256, June 2022. [www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/dual-channel-isolated-gate-driver-eicedriver-2edi/#!fileId=5546d462700c0ae60170a0c4af851028](http://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/dual-channel-isolated-gate-driver-eicedriver-2edi/#!fileId=5546d462700c0ae60170a0c4af851028)
3. Menditti Matrisciano C. Half-bridge evaluation board designed with CoolGaN GIT HEMTs and EiceDRIVER 2EDB8259Y. Infineon Technologies AG, Application Note AN\_2210\_PL21\_2211\_151906, November 2022. [www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/2edb8259y/#!fileId=8ac78c8c8412f8d3018450d16dcf4eb8](http://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/2edb8259y/#!fileId=8ac78c8c8412f8d3018450d16dcf4eb8)
4. Menditti Matrisciano C., Laneve A., Varajao D. Universal Isolated Gate Driving Platform for 650 V GaN HEMTs Half-Bridge with Dead-Time Control and Integrated Bias Supply. PCIM Europe 2023. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2023.

## Серия DC/DC-преобразователей RQB60W12 для железнодорожного транспорта от MEAN WELL

Компания MEAN WELL представляет новую серию источников питания для железнодорожного транспорта RQB60W12, которая является продолжением развития железнодорожных серий MEAN WELL мощностью 40 и 150 Вт в корпусе форм-фактора Quarter Bricks.

Устройства серии обеспечивают высокий КПД на уровне до 90% в широком диапазоне рабочих температур  $-40\dots+90^{\circ}\text{C}$  и могут удовлетворить потребности в преобразовании энергии во всех электронных модулях железнодорожного состава, таких как GSM- и LTE-ретрансляторы, модули управления поездом, системы видеонаблюдения, системы противопожарной безопасности, системы управления дверями, мониторы, внутреннее освещение и информационно-развлекательные системы.

Новая серия RQB60W12 обеспечивает следующие ключевые преимущества:

- сверхширокий входной диапазон напряжений 12:1: 14–160 В постоянного тока;
- полностью герметичный: ударопрочный, пыленепроницаемый и влагостойкий корпус форм-фактора Quarter Bricks ( $2,28 \times 1,45 \times 0,5''$ , ( $\text{Д} \times \text{Ш} \times \text{В}$ ):  $57,9 \times 36,8 \times 12,7$  мм с выводами промышленного стандарта;
- широкий диапазон рабочих температур:  $-40\dots+90^{\circ}\text{C}$ ;
- изоляция вход/выход: 2 кВ переменного тока или 3 кВ постоянного тока;
- функции защиты: короткое замыкание, перегрузка, перенапряжение, перегрев, защита от пониженного входного напряжения;



- дистанционное управление включением/выключением;
- выходное напряжение регулируется:  $\pm 10\%$ ;
- сертификаты соответствия: EN50155/EN50121-3-2, UL 62368-1, EAC, CE;
- гарантия: три года.

[www.eltech.spb.ru](http://www.eltech.spb.ru)



# Микросхемы серии IZ5014S

от ОАО «Интеграл»

**ОАО «Интеграл» представляет бескорпусные микросхемы серии IZ5014S, предназначенные для использования в миниатюрных кварцевых генераторах, действующих на основной гармонике резонатора. Максимальная рабочая частота для микросхем составляет 60 МГц.**

## Основные характеристики

- Напряжение питания,  $U_{DD}$ : 2,7–5,5 В.
- Частота кварцевых резонаторов,  $f_{OSC}$ : 4–60 МГц.
- Выходная частота  $f_O$  равна  $f_{OSC}, f_{OSC}/2, f_{OSC}/4, f_{OSC}/8, f_{OSC}/16$  и зависит от типономинала микросхемы серии IZ5014S.

Таблица 1. Типономиналы микросхем серии IZ5014S

Типономинал микросхемы	Рекомендуемая частота кварцевого резонатора $f_{OSC}$ , МГц		Встроенная емкость, пФ		Выходная частота $f_O$			
	$U_{DD} = 2,7\text{--}3,6$ В							
	$C_L = 15$ пФ	$C_L = 30$ пФ						
IZ5014S1					$f_{OSC}$			
IZ5014S2					$f_{OSC}/2$			
IZ5014S3	4–60	4–40	4–60	18	$f_{OSC}/4$			
IZ5014S4					$f_{OSC}/8$			
IZ5014S5					$f_{OSC}/16$			

**Примечание.** Рекомендуемая частота  $f_{OSC}$  – это значение при измерении кристаллов. Диапазон рабочих частот зависит от характеристик как самого кристалла, так и кварцевого резонатора, корпуса, условий монтажа.

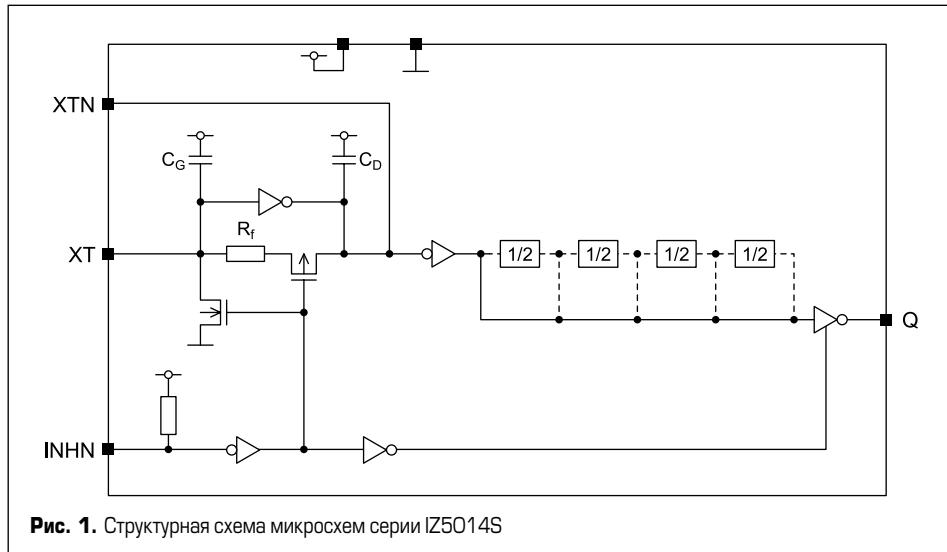


Рис. 1. Структурная схема микросхемы серии IZ5014S

- КМОП выходной сигнал.
- Диапазон рабочих температур:  $-40\text{...}+85$  °C.
- Встроенные емкости:  $C_G = 18$  пФ,  $C_D = 18$  пФ.
- Встроенный резистор обратной связи.
- Наличие режима ожидания: выключение генерации выходного сигнала с высокомоментным состоянием на выходе микросхемы.
- Низкое энергопотребление в режиме ожидания.

Типономиналы микросхем серии IZ5014S приведены в таблице 1.

## Структурная схема микросхем

Структурная схема микросхем серии IZ5014S приведена на рис. 1.

Назначение выводов (контактные площадки) микросхем серии IZ5014S приведено в таблице 2.

## Электрические параметры микросхем

Электрические параметры микросхем серии IZ5014S указаны в таблице 3.

Динамические параметры микросхем представлены в таблице 4.

Временные диаграммы работы микросхем серии IZ5014S приведены на рис. 2.

## Предельно допустимые и предельные электрические режимы эксплуатации микросхем

Значения предельно допустимых и предельных электрических режимов эксплуатации микросхем серии IZ5014S в диапазоне рабочих температур приведены в таблице 5.

## Режимы работы микросхем серии IZ5014S

### 1. Режим ожидания

При подаче на вывод INHN низкого логического уровня напряжения прекращается генерация и выход Q переводится в высокоимпедансное состояние. При подаче на вывод INHN высокого логического уровня напряжения генерация на выходе Q возобновляется после запуска генератора. Состояние микросхем серии Z5014S в режиме ожидания приведено в таблице 6.

### 2. Режим энергосбережения на выводе INHN

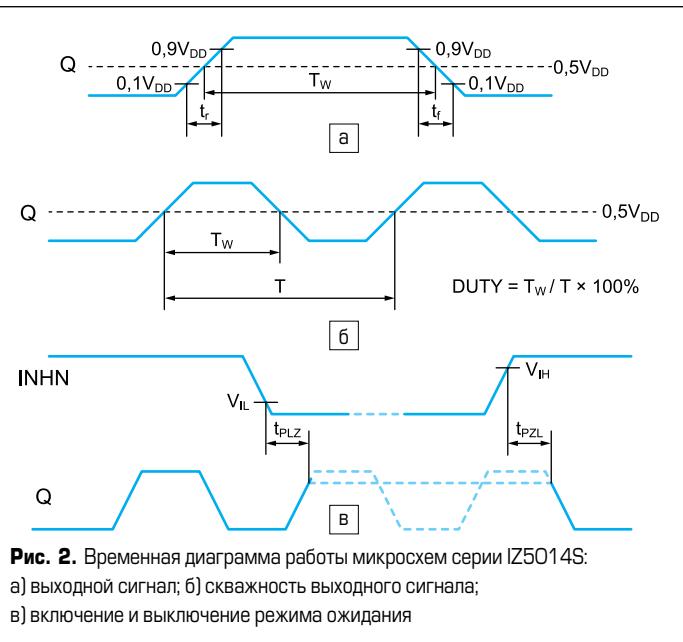
На входе INHN имеется встроенный подтягивающий к питанию резистор  $R_{UP}$ . Сопротивление резистора  $R_{UP}$  зависит от уровня входного сигнала: при низком входном уровне

Таблица 2. Назначение выводов микросхемы серии IZ5014S

Номер вывода	Обозначение	Назначение
01	INHN	Вход управления частотой
02	XT	Вход подключения кварцевого резонатора
03	XTN	Выход подключения кварцевого резонатора
04	VSS	Общий вывод
05	Q	Выход частоты
06	VDD	Выход напряжения питания

**Таблица 3.** Электрические параметры микросхем серии IZ5014S

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Режим измерения	Норма		Temperatura среды, °C
			не менее	не более	
Выходное напряжение низкого уровня, В	$U_{OL}$	$U_{DD} = 2,7 \text{ В}; I_{OL} = 4 \text{ мА}; U_{DD} = 4,5 \text{ В}; I_{OL} = 8 \text{ мА}$	—	0,4	$+25 \pm 10; +85; -40$
Выходное напряжение высокого уровня, В	$U_{OH}$	$U_{DD} = 2,7 \text{ В}; I_{OH} = 4 \text{ мА}; U_{DD} = 4,5 \text{ В}; I_{OH} = 8 \text{ мА}$	2,1	—	
Выходной ток в выключенном состоянии, мкА	$I_Z$	$U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; U_{DD} = 4,5; 5,5 \text{ В}; U_{INHN} = 0 \text{ В}; U_{OH} = U_{DD}; U_{OL} = 0 \text{ В}$	—	10	
Ток потребления, мА	$I_{DD}$	$U_{INHN} = U_{DD}; C_L = 15 \text{ пФ}; f_{OSC} = 60 \text{ МГц}; U_{DD} = 3,6 \text{ В}; U_{DD} = 5,5 \text{ В}$	—	34 52	
Ток потребления в режиме ожидания, мкА	$I_{ST}$	$U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; U_{DD} = 4,5; 5,5 \text{ В}; U_{INHN} = 0 \text{ В}$	—	5 10	
Сопротивление подтягивающего резистора на входе $I_{INHN}$ , МОм	$R_{UP}$	$U_{INHN} = 0 \text{ В}; U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; U_{DD} = 4,5; 5,5 \text{ В}$	2 1	18 9	
Сопротивление резистора обратной связи, кОм	$R_F$	$U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; U_{DD} = 4,5; 5,5 \text{ В}$	100	600	

**Рис. 2.** Временная диаграмма работы микросхем серий IZ5014S:

а) выходной сигнал; б) скважность выходного сигнала;

в) включение и выключение режима ожидания

**Таблица 4.** Динамические параметры микросхем серии IZ5014S

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Режим измерения	Норма		Temperatura среды, °C
			не менее	не более	
Время нарастания сигнала на выводе Q, нс	$t_r$	$U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; C_L = 15 \text{ пФ}; C_L = 30 \text{ пФ}$	—	6 10	$+25 \pm 10; +85; -40$
		$U_{DD} = 4,5; 5,5 \text{ В}; C_L = 15 \text{ пФ}; C_L = 30 \text{ пФ}$	—	5 6	
Время спада сигнала на выводе Q, нс	$t_f$	$U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; C_L = 15 \text{ пФ}; C_L = 30 \text{ пФ}$	—	6 10	$+25 \pm 10$
		$U_{DD} = 4,5; 5,5 \text{ В}; C_L = 15 \text{ пФ}; C_L = 30 \text{ пФ}$	—	5 6	
Коэффициент заполнения сигнала на выходе Q, %	Duty	$U_{DD} = 3,0 \text{ В}; C_L = 15 \text{ пФ}; f_{OSC} = 60 \text{ МГц}$	45	55	$+25 \pm 10$
		$U_{DD} = 3,0; 5,0 \text{ В}; C_L = 30 \text{ пФ}; f_{OSC} = 60 \text{ МГц}$	—	100	
Время включения режима ожидания, нс	$t_{PLZ}$	$U_{DD} = 3,0; 5,0 \text{ В}; C_L = 15 \text{ пФ}$	—	100	
Время выключения режима ожидания, нс	$t_{PZL}$	$U_{DD} = 3,0; 5,0 \text{ В}; C_L = 15 \text{ пФ}$	—	100	

**Примечание.** Значения параметров  $t_{PLZ}$  и  $t_{PZL}$  определяются относительно третьего состояния вывода Q.

**Таблица 5.** Предельно допустимые и предельные режимы эксплуатации

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Предельно допустимый режим		Предельный режим	
		не менее	не более	не менее	не более
Напряжение питания, В	$U_{DD}$	2,7	5,5	-0,5	7
Входное напряжение низкого уровня, В	$U_{IL}$	0	$0,3 \times U_{DD}$	-0,3	—
Входное напряжение высокого уровня, В	$U_{IH}$	$0,7 \times U_{DD}$	$U_{DD}$	—	$U_{DD} + 0,3$
Выходной ток, мА	$I_{OUT}$	—	8	—	12
Частота кварца в режиме, МГц:	$f_{osc}$				
$U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; C_L \leq 15 \text{ пФ};$		4	60	4	60
$U_{DD} = 2,7; 3,6 \text{ В}; C_L \leq 30 \text{ пФ};$		4	40	4	40
$U_{DD} = 4,5; 5,5 \text{ В}; C_L \leq 30 \text{ пФ}$		4	60	4	60

**Таблица 6.** Состояние микросхем серии Z5014S в режиме ожидания

Вход INHN	Выход Q	Состояние микросхемы
Высокий логический уровень или не используется	Частота $f_0$ из ряда $f_{osc}, f_{osc}/2, f_{osc}/4, f_{osc}/8, f_{osc}/16$ в зависимости от типономинала микросхемы	Работа
Низкий логический уровень	Высокоомное состояние	Останов

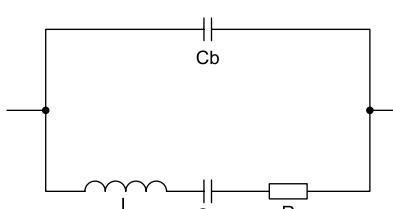
(состояние ожидания) сопротивление подтягивания становится большим для уменьшения тока потребления.

### Рекомендуемые параметры кварцевого резонатора

Эквивалентная схема кварцевого резонатора изображена на рис. 3. Микросхемы серии IZ5014S рекомендуется применять с кварцевыми резонаторами со значениями параметров, приведенными в таблице 7.

Адрес ОАО «ИНТЕГРАЛ» —  
управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ»:  
ул. Казинца И.П., д. 121 А, к. 327, г. Минск, 220108,  
Республика Беларусь

AKetska@integral.by, (+375 17 238-97-43), integral.by

**Таблица 7.** Рекомендуемые параметры кварцевых резонаторов

$f, \text{МГц}$	$R, \text{Ом}$	$L, \text{мГн}$	$C_a, \text{пФ}$	$C_b, \text{пФ}$
40	8,23	5,72	2,77	2,20
50	16,12	6,88	1,48	1,15

# Использование широкозонных полупроводников для снижения потерь в электроприводе

**Гильерме Буэно Мариани (Guilherme Bueno Mariani)\*** Моторные приводы с управлением методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) генерируют динамические потери при коммутации силовых ключей в инверторе, в то время как высокочастотные потери электромотора связаны с пульсациями тока. Это означает, что необходимо найти компромисс, обеспечивающий общую высокую эффективность на системном уровне. Ранее уже были проведены различные исследования, направленные на изучение связи потерь в двигателе с частотой переключения. Однако большинство из них применимо только к относительно низким частотам (до 20 кГц), используемым при управлении IGBT.

**Перевод: Иван Сергеев**

\* Infineon Technologies

Для исследования влияния повышения частоты переключения (до 50 кГц) на эффективность инвертора и двигателя за счет применения широкозонных (WBG) силовых приборов на основе карбida кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) компания Infineon использует сочетание моделирования и экспериментальной проверки. В статье подробно рассматриваются различные подходы и обсуждаются результаты соответствующих расчетов и тестов.

**Таблица.** Параметры синхронного двигателя с постоянными магнитами (PMSM)

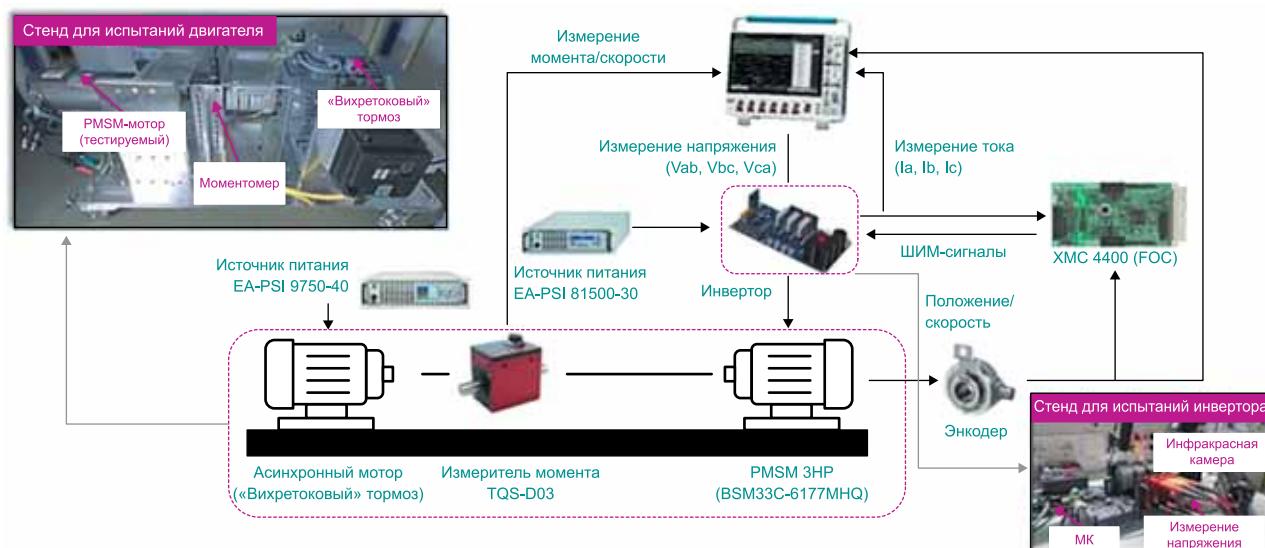
Параметр	BSM33C-6177MQ
Напряжение, В	320
Ток, А	12,5
Мощность, л.с.	3
Скорость, грм	1800
Индуктивность, мГн	5,2
Сопротивление, Ом	1

## Установка для тестирования и измерений

Тестовый инвертор состоит из трех полумостовых каскадов, размещенных на трех печатных платах. Преимущество такого подхода заключается в упрощении и ускорении оценки различных

полупроводниковых технологий. В данной работе проверялись силовые ключи с сопротивлением канала 55 мОм — усовершенствованные транзисторы CoolGaN 600 В (IG-T60R070D1) и CoolSiC 650 В в корпусе TOLL (IMT65R048M1H), управляемые от двухканальных драйверов ElieDRIVER 2EDF717F.

Напряжение питания верхнего и нижнего плеча драйвера, вырабатываемое изолированным источником питания, адаптируется для различных широкозонных технологий (SiC — 18 В и GaN — 10 В). Для точного управления силовыми ключами на плате инвертора привода установлены датчики Холла XENSIV TLI4971, измеряющие фазные токи. Полученные от них сигналы поступают на микроконтроллер XMC XMC4400, который также использует датчики положения для реализации векторного алгоритма управления FOC (Field Oriented Control).



**Рис. 1.** Испытательная установка

скоростью синхронного двигателя с постоянными магнитами (PMSM). Параметры синхронного двигателя с постоянными магнитами представлены в таблице.

Асинхронный двигатель работает как электромагнитный «вихревой токовый» тормоз, для изменения момента на валу которого на обмотки подается изменяющийся ток. Применение асинхронной машины в качестве тормоза обеспечивает плавный крутящий момент нагрузки, предотвращая заклинивание. Элементы испытательной установки, предназначенный для оценки влияния параметров WBG-ключей, показаны на рис. 1.

### Потери в инверторе

Потери в инверторе привода генерируются при преобразовании DC-напряжения шины питания в AC-сигнал управления двигателем. Они сочетают резистивные потери в различных узлах преобразователя, коммутационные потери в силовых электронных ключах и электромагнитные потери в пассивных компонентах. Уровень рассеиваемой при этом мощности зависит от конструкции и технических характеристик инвертора, и он напрямую связан с рабочей частотой  $F_{sw}$  используемых в нем транзисторов.

С увеличением частоты переключения растут динамические потери силовых ключей, поэтому выбор подходящего значения  $F_{sw}$  важен для оптимизации общей эффективности электропривода. В конечном счете необходим поиск компромисса между частотой коммутации, суммарной рассеиваемой мощностью и размером моточных изделий моторного привода. Выбор технологии силовых полупроводниковых приборов, направленный на снижение потерь инвертора, зависит от множества факторов, включая напряжение, ток, частоту, рабочий цикл, скорость изменения напряжения ( $dV/dt$ ) и сопротивление затвора ( $R_g$ ).

На рис. 2 показаны результаты моделирования потерь мощности (выполненного с применением ПО PLEC) для силовых ключей GaN и SiC с номинальным напряжением 600–650 В, работающих от DC-шины 320 В при выходном токе 8 А и разных значениях  $F_{sw}$ . Приборы SiC имеют небольшое преимущество перед GaN на низких частотах (5–10 кГц). Однако в диапазоне 20–50 кГц ключи на основе нитрида галлия генерируют значительно меньшие потери мощности по сравнению с карбидокремниевыми. Тем не менее оптимизация характеристик и общего КПД электропривода требует более глубокого анализа технологии и характеристик силовых транзисторов.

### Потери в двигателе

В данной работе основное внимание уделено высокочастотным потерям в двигателе. Разделение высокочастотной (ВЧ) и низкочастотной (НЧ) составляющей выполнено в ходе итеративного процесса с использованием последовательных фильтров нижних частот.

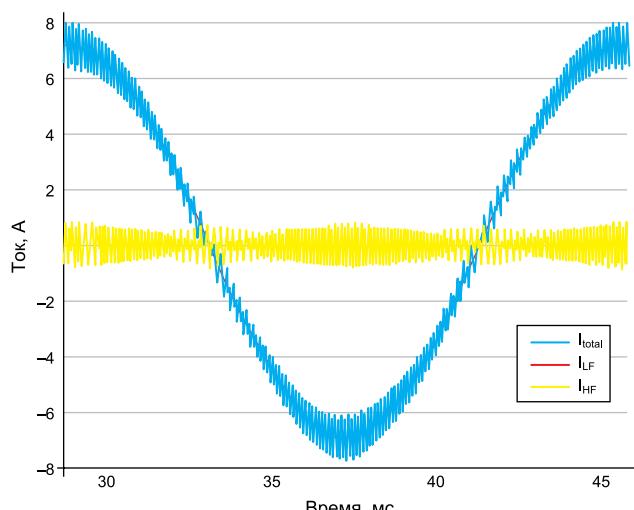


Рис. 3. Разделение ВЧ- и НЧ-токов

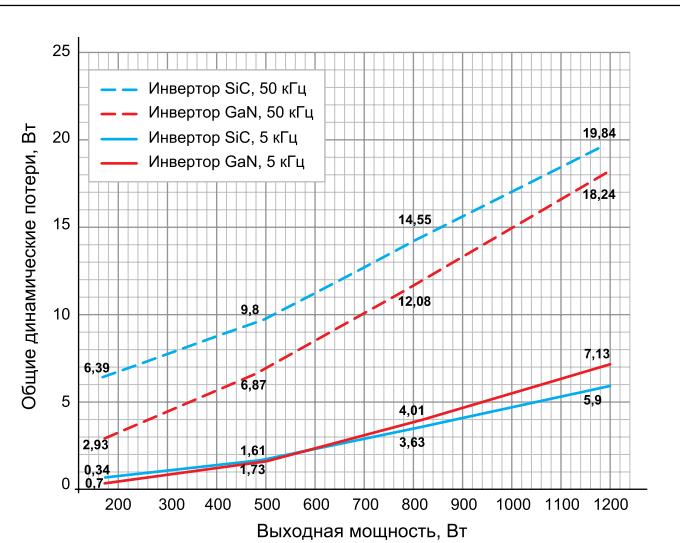


Рис. 2. Моделирование потерь инвертора (PLEC)  
для различных полупроводниковых технологий и частот коммутации

На рис. 3 показаны результаты измерений токов, проведенных методом разделения, для контроля напряжений предусмотрен аналогичный процесс.

На рис. 4 представлена ВЧ-компоненты фазного тока после соответствующей обработки сигнала. Как и ожидалось, уровень пульсаций тока снижается с увеличением частоты переключения, и это позволяет уменьшить потери энергии в двигателе.

### Потери в двигателе на высоких частотах

Высокочастотные потери мощности в электроприводе могут быть рассчитаны с использованием следующего уравнения:

$$\text{Lossess}_{HF} = (V_{ab_{HF}} I_{a_{HF}} + V_{bc_{HF}} I_{b_{HF}} + V_{ca_{HF}} I_{c_{HF}} + V_{ab_{HF}} I_{b_{HF}} + V_{bc_{HF}} I_{c_{HF}} + V_{cb_{HF}} I_{a_{HF}})/3.$$

ВЧ-составляющая потеря на различных частотах переключения для разных скоростей вращения показана на рис. 5, где:

$$|I| = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}.$$

Высокочастотные потери на скорости 900 об./мин и частоте 50 кГц пренебрежимо малы для отображения.

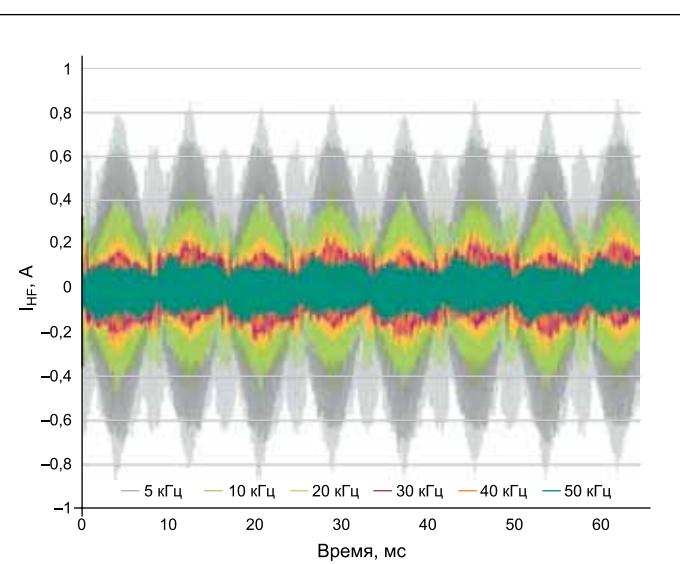


Рис. 4. ВЧ-составляющая тока

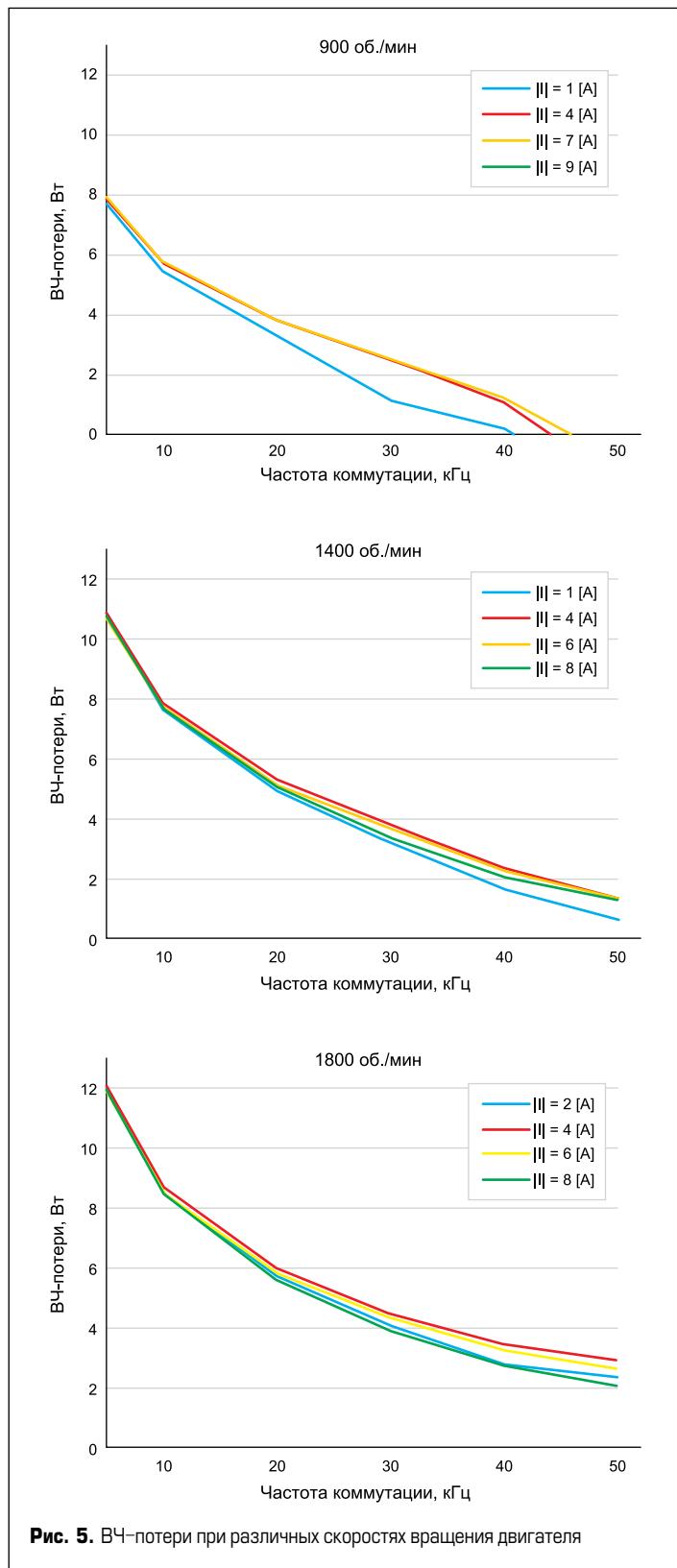


Рис. 5. ВЧ-потери при различных скоростях вращения двигателя

Полученные результаты демонстрируют явное влияние частоты коммутации на ВЧ-потери двигателя, при этом с ростом  $F_{sw}$  они заметно снижаются. Наибольшая мощность рассеивания наблюдается при 1800 об./мин и 5 кГц. В этой рабочей точке потери составляют приблизительно 12 Вт, в то время как при той же скорости вращения на частоте 50 кГц рассеивается всего 2 Вт, то есть на 10 Вт меньше.

Другим важным результатом анализа является то, что ВЧ-составляющая потерь зависит от частоты вращения двигателя, это можно объяснить увеличением вихревых токов в магнитах при более высоких скоростях. Потери в железе — еще одна компонента, которая меняется в зависимости от скорости вращения, причем гистерезис увеличивается с ее ростом, что также влияет на рассеяние мощности в двигателе.

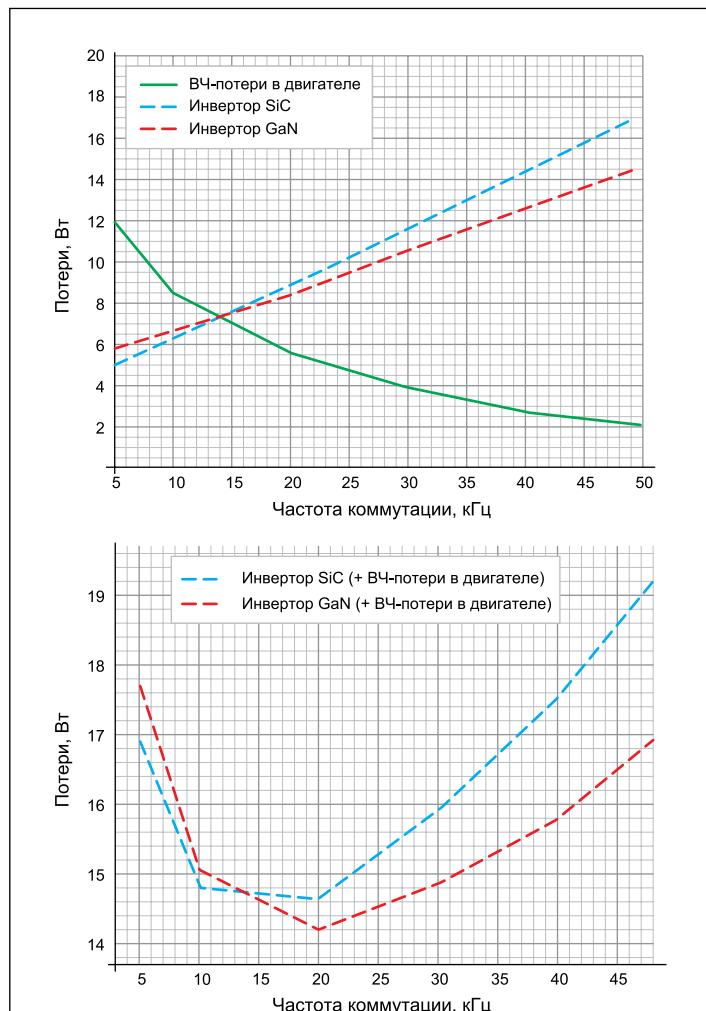


Рис. 6. Определение общих потерь в системе и оптимальная рабочая точка

### Общие потери в приводе

Параметры системы, такие как ток нагрузки, скорость вращения двигателя и температура, оказывают наибольшее влияние на общую эффективность работы электропривода. При минимальном уровне потерь энергии по отношению к выходной мощности обеспечивается оптимальная эффективность двигателя.

Анализ сочетания ВЧ-потерь двигателя и инвертора (рис. 6) показал, что оптимальная рабочая точка (соответствующая минимальному отношению потерь к выходной мощности) достигается при  $F_{sw} = 20$  кГц, номинальной частоте вращения 1800 об./мин и нагрузке 50% от номинальной (1,1 кВт).

Поддержание режимов работы привода в этой зоне очень важно для минимизации общих потерь привода. Рис. 6 подтверждает, что выбор частоты переключения должен быть сделан на системном уровне. Он предполагает анализ особенностей технологий компонентов и материалов, применяемых в инверторе и двигателе. Замена технологии может привести к смещению оптимальной частоты и изменению суммарного значения потерь на системном уровне.

### Заключение

Переход на более высокие частоты коммутации  $F_{sw}$  в инверторе электропривода за счет применения широкозонных силовых приборов обеспечивает повышение общей эффективности системы. При этом величина  $F_{sw}$  должна быть тщательно выбрана с учетом компромисса между потерями в инверторе и двигателе. Эксперименты показали, что ВЧ-потери мощности в моторе снижаются с увеличением  $F_{sw}$ .

Тем не менее необходим детальный анализ влияния частоты и скорости коммутации ( $dv/dt$ ,  $di/dt$ ) на срок службы подшипников и обмоток двигателя. Кроме того, влияние высоких значений  $F_{sw}$  на низкочастот-

ные потери также требует дальнейших исследований. При разработке новых двигателей следует учитывать потенциал WBG-приборов для удовлетворения будущих требований к эффективности. При этом они должны проектироваться с учетом проблем, связанных с повышением частоты переключения (износ подшипников, обмоток и т. д.).

### Литература

- Morya A. K. et al. Wide Bandgap Devices in AC Electric Drives: Opportunities and Challenges // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2019. Vol. 5. No. 1.
- Chang L., Alvi M., Lee W., Kim J., Jahns T. M. Efficiency Optimization of PWM-Induced Power Losses in Traction Drive Systems with IPM Machines Using Wide Bandgap-Based Inverters // IEEE Transactions on Industry Applications. 2022. Vol. 58. No. 5.
- Chang L., Lee W., Jahns T. M., Rahman K. Investigation and Prediction of High-Frequency Iron Loss in Lamination Steels Driven by Voltage-Source Inverters Using Wide-Bandgap Switches // IEEE Transactions on Industry Applications. 2021. Vol. 57. No. 4.
- Yamazaki K., Abe A. Loss Investigation of Interior Permanent-Magnet Motors Considering Carrier Harmonics and Magnet Eddy Currents // IEEE Transactions on Industry Applications. 2009. Vol. 45. No. 2.
- Voyer N., Bueno Mariani G., Besri A., Quemener V., Okamoto Y., Satake A. High-Frequency Modelling of Permanent Magnet Synchronous Machine. 8<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2018.
- Dahaman I., Zhu Z. Q., Howe D. Eddy-Current Loss in the Rotor Magnets of Permanent-Magnet Brushless Machines Having a Fractional Number of Slots Per Pole // IEEE Transactions on Magnetics. 2005. Vol. 41. No. 9.
- Zhou F. Z., Shen J. X., Fei W. Z. Influence on Rotor Eddy — Current Loss in High-Speed PM BLDC Motors. Proceedings of the 41<sup>st</sup> International Universities Power Engineering Conference, Newcastle upon Tyne, UK, 2006.
- Stentjes P. G., Thul S., Herold A., Hameyer T. K. Soft magnetic material degradation due to manufacturing process: A comparison of measurements and numerical simulations. 17<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.

**ЛИГРА**

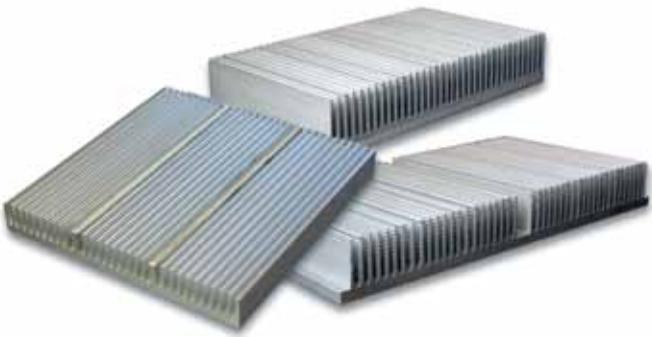
Производство



198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Шефцова, 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)

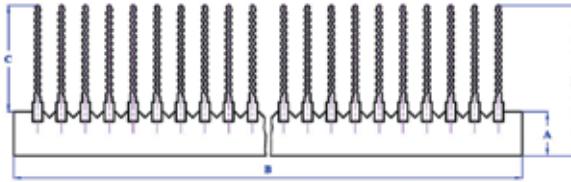
### Новинка — сварные радиаторы

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



### Новинка — охладители О57

по вашим размерам



реклама

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,  
K50-81, 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, НЭ

# Управление бесколлекторными двигателями постоянного тока

**Бесколлекторные двигатели постоянного тока (BLDC) широко распространены в бытовой технике, промышленном оборудовании и автомобилестроении.** Они являются хорошей альтернативой коллекторным машинам благодаря более высокой надежности и простоте обслуживания, однако для их применения требуется достаточно сложная электроника. В статье исследуются различные способы и алгоритмы управления BLDC, а также методы измерения рабочих режимов. Представлены интегральные схемы управления, предлагаемые ведущими производителями, и доступные ресурсы для разработки и изготовления прототипов.

**Марк Патрик  
(Mark Patrick)\***

**Перевод:**  
**Евгений Карташев**

## Применение бесколлекторных двигателей

За последнее десятилетие чрезвычайно выросла популярность бесколлекторных DC-двигателей. Они, вероятно, получили даже большее признание, чем Wi-Fi-устройства, и вы удивитесь, узнав, сколько таких моторов находится в вашем доме, офисе или автомобиле. По оценкам Allied Market Research, к 2030 году мировой рынок BLDC достигнет \$72,2 млрд (для сравнения: \$33,2 млрд в 2020 году, рис. 1). В исследовательском отчете «Рынок бесколлекторных DC-двигателей до 2030 года» прогнозируется среднегодовой рост на 10,3% во всех диапазонах мощностей, причем наиболее значительные показатели наблюдаются в сегменте 750–3000 Вт.

Моторы BLDC находят самое разнообразное применение, включая батарейный электроинструмент, бытовые пылесосы, радиоуправляемые БПЛА и электромобили. В промышленности они используются

во многих системах, от конвейерных лент до производственных роботов.

Бесколлекторные двигатели обрели немалую популярность благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам. Они обладают хорошей энергоэффективностью (до 92%), что по крайней мере на 10–15% больше, чем у коллекторных машин такого же размера. Кроме того, BLDC-мотор может работать на более высоких скоростях из-за отсутствия трения со стороны щеток. Отсутствие коллектора и щеток позволяет уменьшить размеры, уровень акустических шумов и значительно улучшить характеристики EMI. Эти факторы делают BLDC-двигатель оптимальным элементом трансмиссии электромобиля, где высокий крутящий момент и скорость имеют критическое значение.

Однако преимущества бесколлекторных DC-моторов необходимо привести в соответствие с их более высокой стоимостью и сложностью управления. На рис. 2 сравниваются различные популяр-

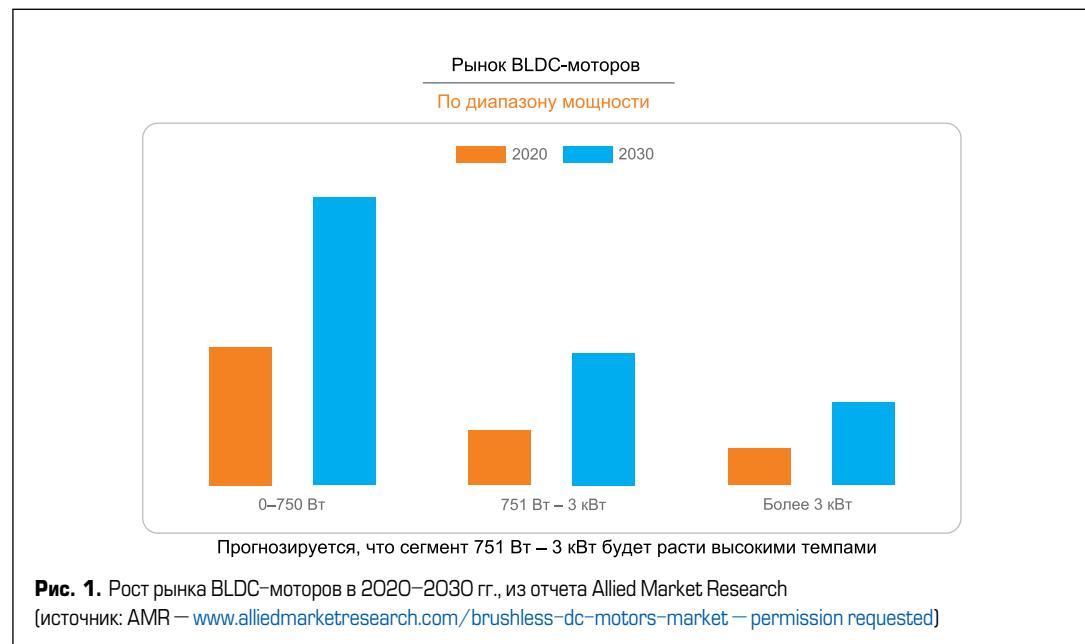




Рис. 2. Популярные типы DC-двигателей, иллюстрирующие ключевые преимущества и недостатки (источник: Qorvo)

ные типы электрических машин, отмечены их плюсы и минусы. Несмотря на незначительные различия в принципе работы и конструкции обмоток статора, BLDC аналогичны синхронным двигателям с постоянными магнитами (PMSM).

### Как работает бесколлекторный DC-мотор?

Прежде чем рассмотреть особенности работы BLDC или PMSM, кратко объясним некоторые основные термины:

- **Обмотки:** витки обмотки (медный провод) размещаются либо на статоре, либо на роторе. Они функционируют как электромагниты, генерируя магнитное поле в соответствии с направлением протекания тока. Три обмотки BLDC на рис. 2 могут быть подключены последовательно (однофазный двигатель) или по отдельности (трехфазный BLDC).
- **Ротор:** вращающаяся часть мотора. В коллекторном двигателе обмотки ротора получают энергию посредством щеток. В бесколлекторном двигателе обмотки находятся на статоре, а постоянные магниты окружают ротор. Между ротором и статором имеется небольшой воздушный зазор.
- **Статор:** невращающаяся часть двигателя. На рис. 2 показаны магнитные полюса статора коллекторного двигателя. Можно сравнить с BLDC, где статор содержит невращающиеся обмотки.
- **Коммутация:** способ изменения направления тока в обмотке для получения вращающегося поля.
- **Противо-ЭДС:** обратная ЭДС (электродвижущая сила) — это электрическая энергия, наводимая в обмотке при ее прохождении через магнитное поле. В случае BLDC противо-ЭДС создается постоянными магнитами ротора. Она может использоваться

для определения его положения относительно обмоток статора и, следовательно, для управления процессом коммутации.

Разница между PMSM и BLDC заключается, прежде всего, в форме их статорных обмоток и, следовательно, в характеристиках создаваемого сигнала противо-ЭДС (рис. 3).

### Алгоритмы управления мотором и датчики

Для вращения BLDC- или PMSM-машины необходима коммутация тока с помощью управляющих сигналов, подаваемых на обмотки статора. Интегральные контроллеры электропривода, обычно называемые драйверами, создают сигналы, число и форма которых определяются типом двигателя и количеством фаз. Как показано на рис. 3, для управления BLDC нужен управляющий сигнал трапециoidalной формы, а для векторного управления (FOC) PMSM — синусоидальный. В трехфазном двигателе PMSM контроллер

формирует три синусоидальных сигнала, смещенных по фазе на 120°, BLDC также может приводиться в действие с использованием синусоидальных сигналов.

Независимо от того, применяется FOC или трапециoidalный метод контроля, для эффективного управления необходимо точно знать, где находится ротор относительно обмоток статора. Это обеспечивает необходимую обратную связь в электроприводе, регулирующим частоту вращения двигателя и его крутящий момент. Информация о положении ротора определяет последовательность, временную диаграмму и частоту управляющих сигналов.

Существует два метода определения положения ротора: с использованием сенсоров или без них.

1. **Сенсорный метод:** датчики Холла, расположенные рядом с каждой обмоткой статора (маленькие синие квадраты на рис. 2), обнаруживают изменения полярности магнитного поля (N-S, S-N) при вращении ротора. Для трехфазного двигателя нужно три датчика.

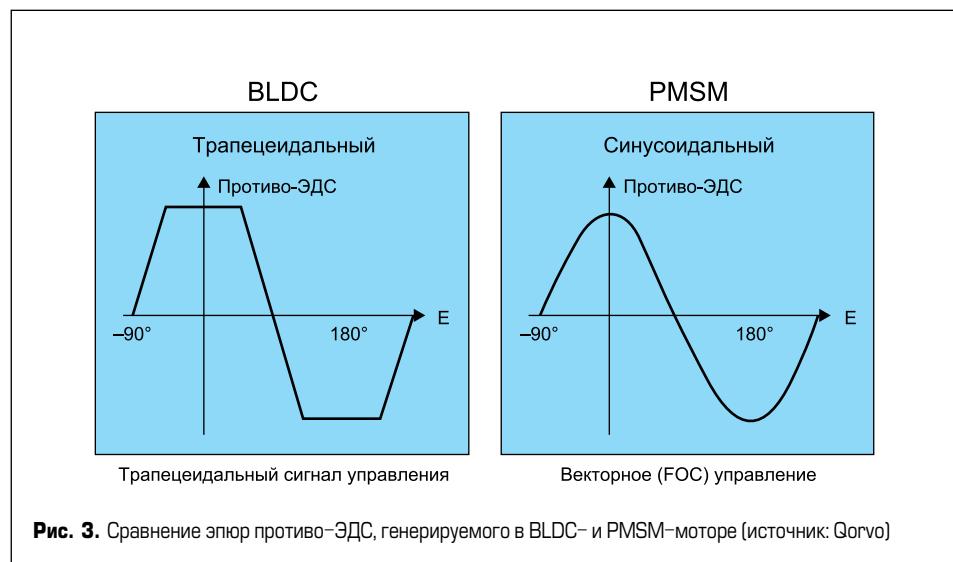
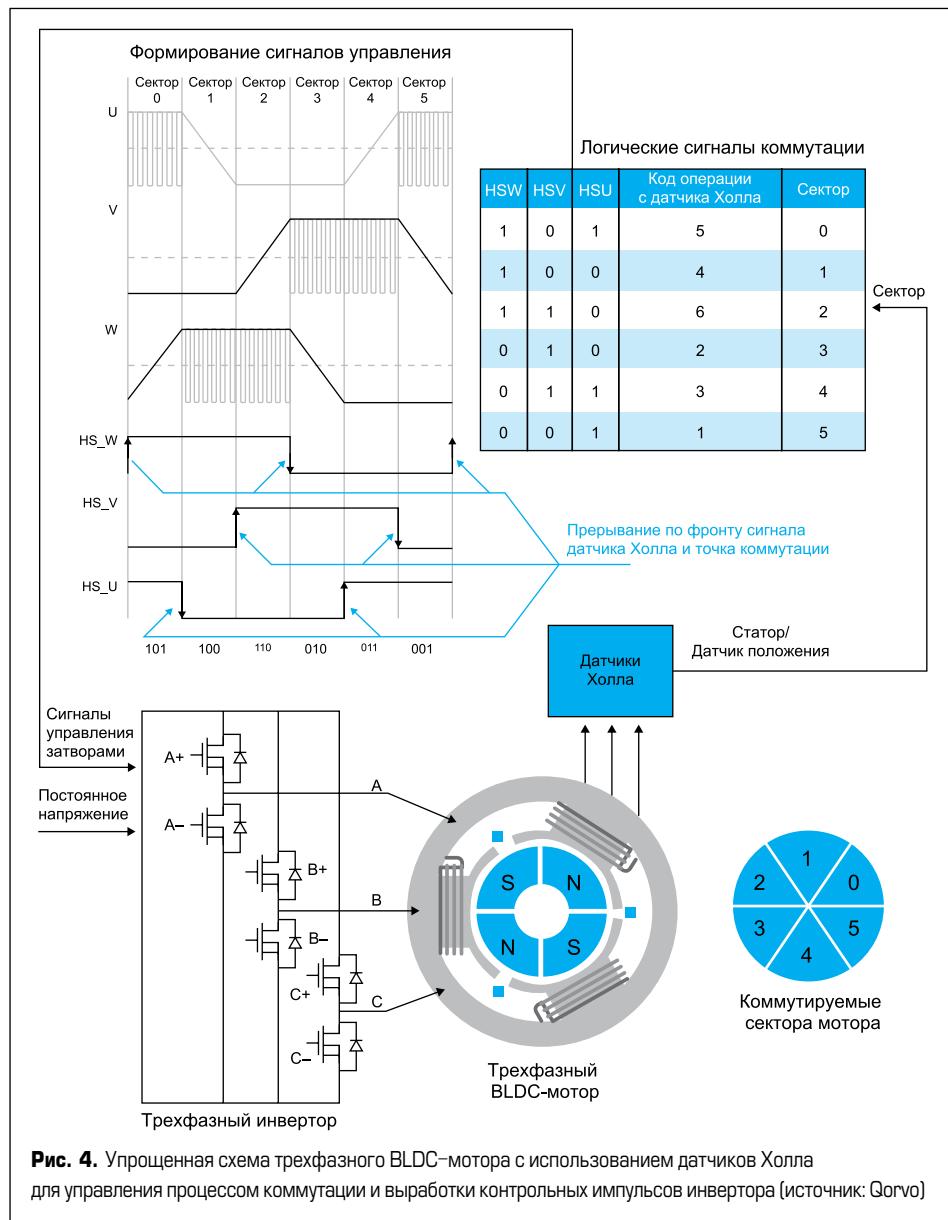


Рис. 3. Сравнение эпюр противо-ЭДС, генерируемого в BLDC- и PMSM-моторе (источник: Qorvo)



**2. Бессенсорный метод:** для определения положения ротора используется сигнал противо-ЭДС.

У каждого метода есть свои плюсы и минусы. Установка датчиков Холла повышает стоимость привода и увеличивает время сборки. Однако применение двигателей BLDC/PMSM с сенсорами обеспечивает большой крутящий момент, плавное вращение и высокую эффективность. Контроллер привода PMSM, как правило, более сложный, и использование алгоритма FOC невозможно без датчиков.

Бессенсорный подход распространен в BLDC-приводах, что обеспечивает их более привлекательную стоимость, но предъявляет высокие требования к алгоритмам определения положения ротора по сигналу противо-ЭДС, индуцируемому в обмотках статора. Один из наиболее сложных аспектов управления бессенсорным BLDC-двигателем связан с его запуском. При отсутствии движения сигнал противо-ЭДС не формируется, поэтому положение ротора следует определить другим способом. Обычно на каждую фазную обмотку подаются высокочастотные управляющие сигналы, и нужен алгоритм, вычисляющий положение соответствующим образом.

На рис. 4 показана упрощенная схема привода трехфазного BLDC-двигателя с использованием датчиков Холла — HSW, HSWW и HSU. Такие сенсоры, по сути, представляют собой цифровые коммутаторы, индицирующие полярность магнитного поля, при этом  $N = 1$ , а  $S = 0$ . Выходы датчиков объединяются для получения трехбитного цифрового логического «кода операции», указывающего положение ротора и направление его вращения. Эта информация необходима для формирования последовательности сигналов управления транзисторами трехфазного силового инвертора. В маломощных приложениях с BLDC сенсоры, управляющий контроллер и транзисторы инвертора обычно объединяются в единой интегральной схеме (Motor Control IC) привода. В системах высокой мощности эту функцию реализуют отдельные блоки: IC контроллера формирует сигнал, который поступает на драйвер затворов, управляющий силовыми MOSFET-транзисторами с теплоотводом, обеспечивающими необходимый ток нагрузки.

Для управления частотой вращения двигателя используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), изменяющая параметры рабочего цикла — соотношение длительности импульсов включения/выключения. Этот метод управления также позволяет ограничивать пусковой ток при запуске двигателя.

### IC-контроллеры BLDC-моторов и ресурсы разработки

На рис. 5 представлена функциональная схема привода маломощного бессенсорного трехфазного BLDC-мотора DRV10963. Интегральная схема, содержащая три полумостовых каскада MOSFET, способна управлять двигателями вентиляторов с напряжением/током до 5 В/0,5 А, используемых для охлажде-

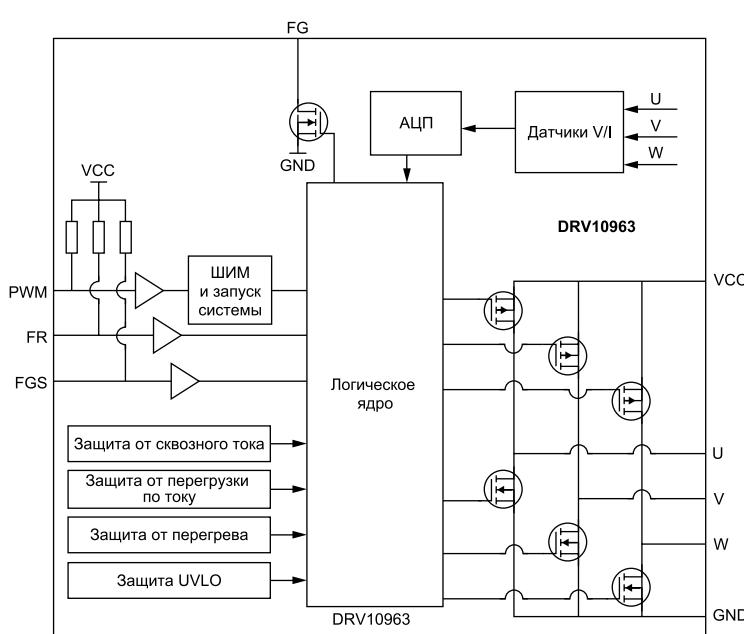
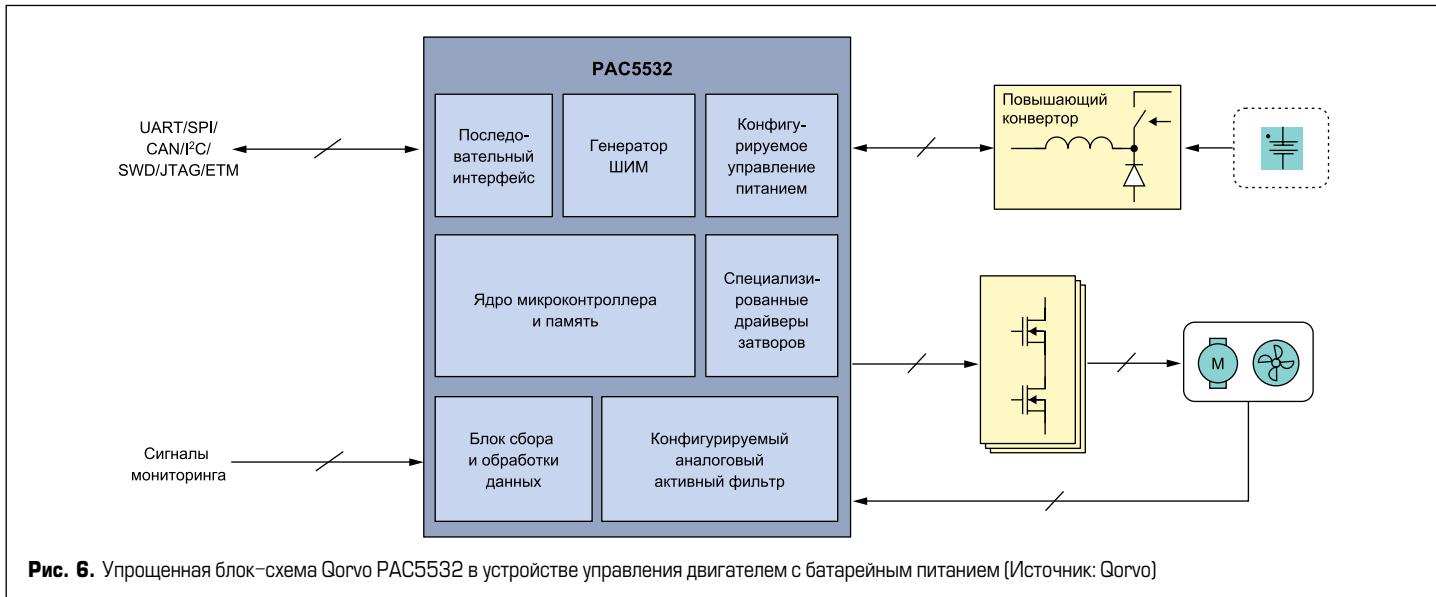


Рис. 5. Функциональная схема привода трехфазного бессенсорного привода BLDC-мотора DRV10963 V (источник: TI)



**Рис. 6.** Упрощенная блок-схема Qorvo PAC5532 в устройстве управления двигателем с батарейным питанием (Источник: Qorvo)

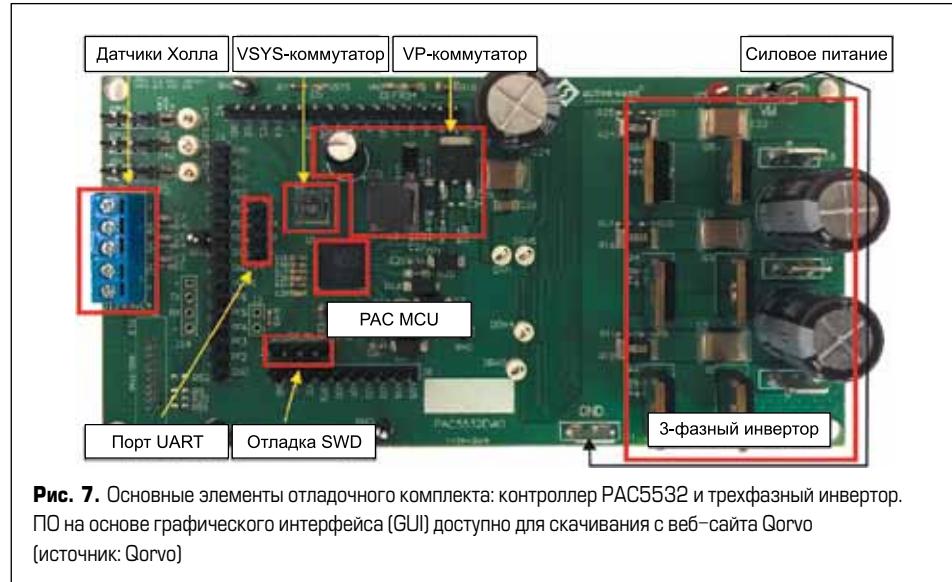
ния ноутбуков и высокопроизводительных процессоров. Привод DRV10963 имеет защиту от короткого замыкания и перегрузки по току, для этого ток и напряжение на каждом MOSFET-транзисторе контролируется с помощью мультиплексированного АЦП. Вход PWM (ШИМ) управляет работой привода для достижения требуемой частоты вращения двигателя. Вход FR позволяет изменять направление вращения при запуске, а выход FG предоставляет информацию о скорости вращения.

Компания Microchip предлагает большую линейку однокристальных контроллеров BLDC и драйверов затворов. Примером может служить MCP8063 — трехфазный бессенсорный привод бесколлекторного двигателя, предназначенного для управления вентиляторами охлаждения систем автоэлектроники.

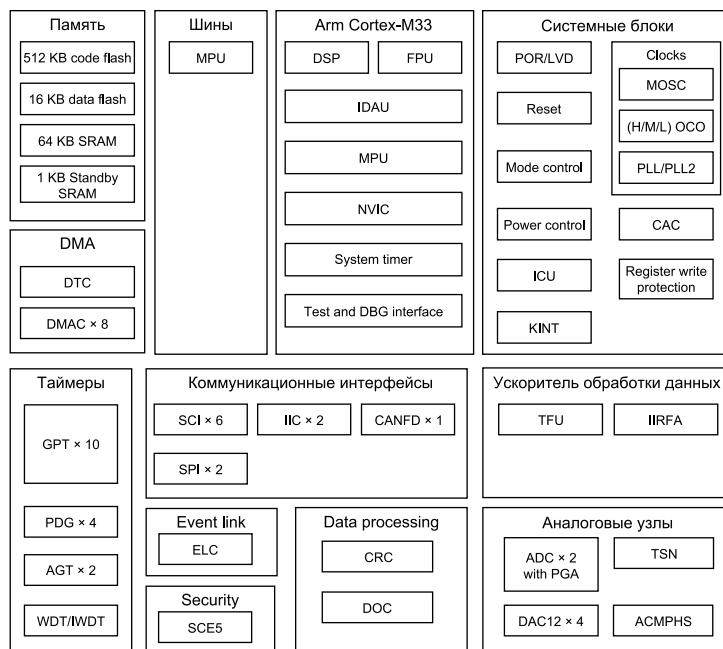
Контроллер Qorvo PAC5532 подходит для широкого спектра устройств управления скользящими бытовыми, промышленными и автомобильными электродвигателями, включая электроинструменты с батарейным питанием, электровелосипеды и легкие гибридные электромобили. Интегральная схема, предназначенная для применения в системах с питанием 48–120 В DC, содержит 32-разрядное ядро Arm Cortex-M4F с рабочей частотой 150 МГц, контроллер обеспечивает полные настраиваемые функции управления приводом и питанием (рис. 6, 7).

#### Дополнение к PAC5532 — отладочный комплект Qorvo PAC5532EVK1

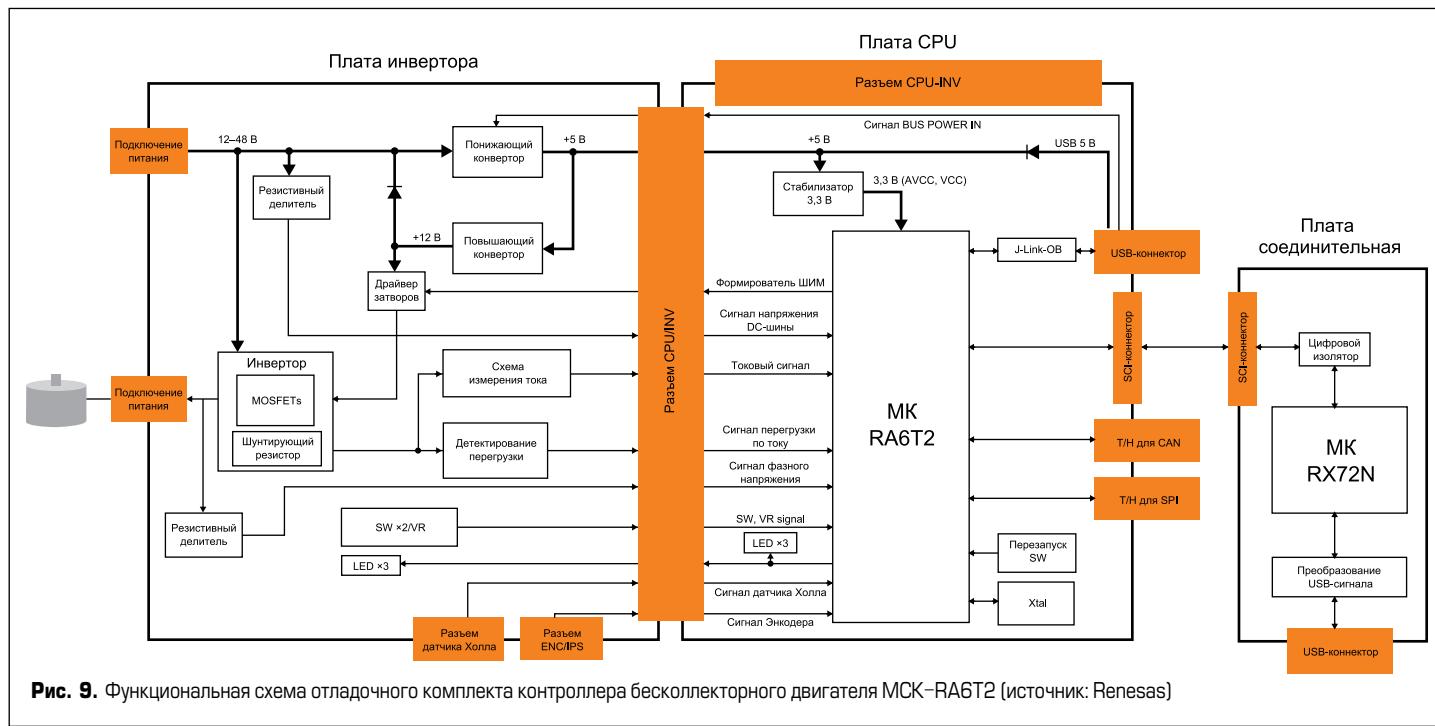
Еще одна реализация интегрального привода — семейство высокопроизводительных IC Renesas RA6T2. Основанная на ядре микроконтроллера Arm Cortex-M33 с частотой 240 МГц, микросхема включает аппаратный ускоритель для осуществления сложных алгоритмов управления двигателем и выполнения защищенных криптографических функций. Устройство содержит полный набор аналоговых функциональных узлов: 12-разрядный



**Рис. 7.** Основные элементы отладочного комплекта: контроллер PAC5532 и трехфазный инвертор. ПО на основе графического интерфейса (GUI) доступно для скачивания с веб-сайта Qorvo (источник: Qorvo)



**Рис. 8.** Функциональная схема IC моторного контроллера Renesas RA6T2 (источник: Renesas)



АЦП, 12-разрядный ЦАП, программируемые усилители и высокоскоростные компараторы (рис. 8).

Отладочный набор Renesas MCK-RA6T2 — это удобный и практичный инструмент для создания прототипа привода бесколлекторного мотора. В комплект, состоящий из трех плат — инвертора, микроконтроллера и коннектора, также входит небольшой BLDC-двигатель и соединительные кабели. Функциональная схема MCK-RA6T2 представлена на рис. 9.

### Начало работы с контроллерами BLDC

В статье рассмотрены принципы работы бесколлекторных двигателей, объяснена причина их растущей популярности, описаны примеры реализации. Применение отладочных комплектов, разработанных ведущими мировыми производителями, — это удобное и эффективное средство проектирования приводов на основе BLDC/PMSM.

## Серия надежных зарядных устройств с встроенным NFC-модулем от MEAN WELL

Компания MEAN WELL представляет серию надежных зарядных устройств NPB-450-NFC — интеллектуальных зарядных устройств (ЗУ) мощностью 450 Вт, оснащенных модулем NFC (Near-Field Communication) для беспроводного подключения к мобильным решениям, с предустановленным программным обеспечением управления ЗУ.

NPB-450-NFC — это модернизированная серия, созданная на базе ЗУ серии NPB-450, с сохранением большинства функций предшественника. Основное отличие заключается в более простом и быстром методе настройки параметров зарядки. С помощью ПО/приложения MEAN WELL на смартфоне или планшете пользователи могут удобно регулировать параметры зарядки в режиме близкого поля, независимо от того, подключено NPB-450-NFC к сети переменного тока или нет. Модель ЗУ NPB-450-NFC устраняет необходимость в приобретении дополнительного программатора SBP-001 и исключает использование каких-либо коммуникационных кабелей, что значительно повышает удобство эксплуатации и снижает затраты. Кроме того, NPB-450-NFC прошло сертификацию по информационному классу безопасности IEC/EN/UL62368-1, что обе-



спечивает безопасное использование и делает его высокоэффективным и универсальным интеллектуальным ЗУ.

NPB-450-NFC подходит для зарядки таких устройств, как мобильные роботы-погрузчики, газонокосилки, электрические велосипеды, скутеры и многое другое.

Устройства серии NPB-450-NFC обеспечивают следующие ключевые преимущества:

- Автоматическое определение и установка сверхширокого диапазона напряжений заряда АКБ:
  - 10,5–21 В постоянного тока;
  - 21–42 В постоянного тока;
  - 42–80 В постоянного тока;
  - 54–100 В постоянного тока.

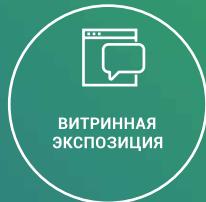
- Встроенный коммуникационный интерфейс NFC позволяет быстро настроить параметры двухступенчатой/трехступенчатой зарядки.
- Встроенный коммуникационный интерфейс CAN Bus для удаленной настройки кривых зарядки и контроля состояния ЗУ.
- Четыре предустановленных кривых зарядки можно точно настроить с помощью DIP переключателя на панели ЗУ;
- Зарядный ток можно регулировать в диапазоне 50–100% с помощью подстрочного резистора на панели ЗУ, но только в режиме интеллектуального определения напряжения.
- Автоматическое снижение мощности заряда при перегреве ЗУ.
- Малошумный вентилятор для регулирования температуры ЗУ.
- Внешняя температурная компенсация для предотвращения быстрого разряда батареи;
- Множественная интеллектуальная защита: короткое замыкание, перенапряжение, перегрев, низкий уровень заряда батареи, преполовуска.
- Подходит для свинцово-кислотных и литиевых АКБ.
- Гарантия: три года.

[www.eltech.spb.ru](http://www.eltech.spb.ru)

# ELECTRONICA ПРЕМИЯ

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

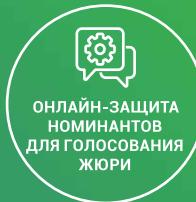
## ПРЕИМУЩЕСТВА УЧАСТИЯ



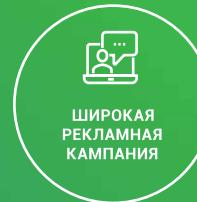
ВИТРИННАЯ  
ЭКСПОЗИЦИЯ



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 УЧРЕДЖДЕНИЯ

### ЛОКАЛИЗАЦИЯ

#### НОМИНАЦИЯ:

- ЗА РАЗВИТИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

В РАМКАХ

 EXPO  
ELECTRONICA

2024

ПОДАЙТЕ  
ЗАЯВКУ

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

 ОРГАНИЗATOR  
ORGANISER

# Тяговый электропривод высокоскоростного поезда

**В статье анализируются технические решения по конструкции высокоскоростных поездов на основе электропривода, в котором используются тяговые электродвигатели (ТЭД) с постоянными магнитами. Сравнивается энергоэффективность ТЭД с коллекторными и асинхронными двигателями. Исследуется влияние на характеристики ТЭД материалов и свойств изоляции и проводится выбор системы изоляции ТЭД.**

**Роберт Шульга\***,  
**К. Т. Н.**

**П**роблема высокоскоростного движения на ж/д транспорте с некоторым запозданием относительно зарубежных стран начала реализовываться в России и потребовала анализа технических решений по конструкции высокоскоростных поездов с использованием электроприводов с тяговыми электродвигателями на постоянных магнитах.

В статье анализируются указанные технические решения, а также исследуется влияние на характеристики ТЭД материалов и свойств изоляции с целью выбора системы изоляции ТЭД. В [1–6] приведены стандарты и характеристики ТЭД, в [7, 8] исследованы преобразователи частоты и материалы, а [9–12] посвящены вопросам выбора изоляции ТЭД.

## Технические решения по конструкции высокоскоростных поездов

Технические решения по конструкции высокоскоростных поездов (ВСП) зависят от их назначения.

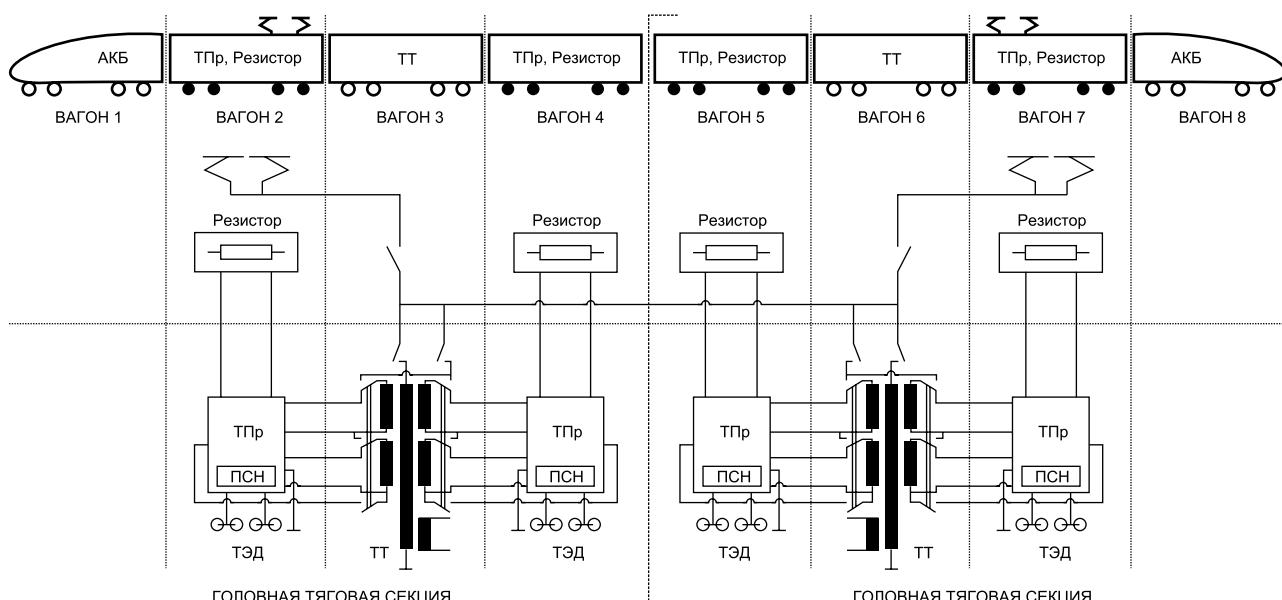
Для определения скорости поездов в эксплуатации используются следующие факторы:

- профиль и состояние пути, причем высокоскоростная магистраль (BCM) требует специализированных путей;
- категория состава (пассажирский, грузовой, скоростной);
- масса и длина поезда;
- погодные условия и температура воздуха.

Эксплуатационная скорость поездов устанавливается по приказу начальника дороги и не должна быть превышена.

Конструкционная скорость грузовых поездов не превышает 120 км/ч, а пассажирских поездов 160–250 км/ч. Скорость выше 250 км/ч достигается при движении по специализированным путям, а выше 200 км/ч по модернизируемым существующим путям. За рубежом (Япония, Европа, Китай) ВСП двигаются со скоростями, достигающими 350–400 км/ч. В России ВСП типа «Сапсан» имеет конструкционную скорость

\* ВЭИ — филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»



**Рис. 1.** Структура ВСП в составе 8 вагонов.

Обозначения: ТПр — тяговый преобразователь; ПСН — преобразователь собственных нужд; ТТ — тяговый трансформатор; резистор — тормозной резистор; АКБ — бортовая аккумуляторная батарея; ТЭД — тяговый электродвигатель с воздушным охлаждением

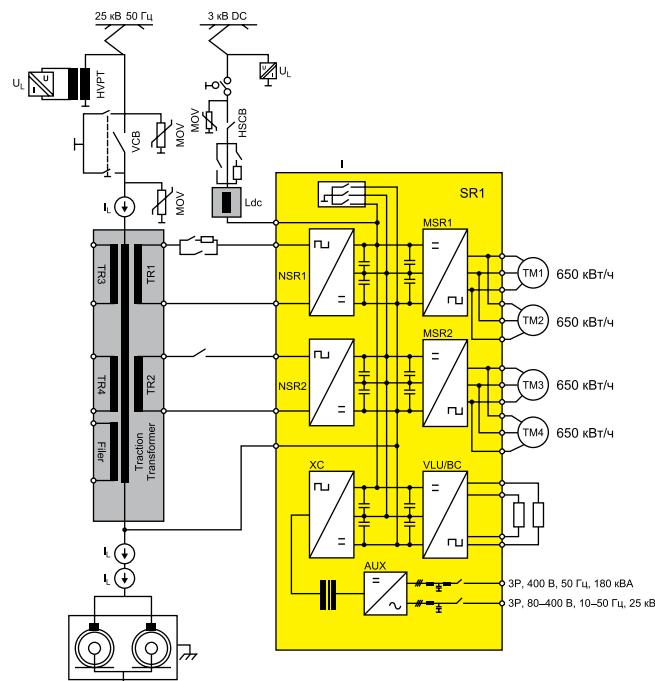


Рис. 2. Тяговая система и параметры основных компонентов

**Главный трансформатор**

- Номинальная мощность 5250 кВА
- Пиковая мощность 7350 кВА
- Использование вторичных обмоток в качестве реактора сетевого фильтра на постоянном токе
- Жидкое охлаждение
- Подкузовное расположение
- Масса с системой охлаждения 5500 кг

**Тяговый преобразователь**

- Интегрированный ПСН 200 кВА
- Питание 4 асинхронных тяговых двигателей моторного вагона
- Потележечное управление
- Тормозной чоппер 2МВт
- Жидкостное охлаждение
- Подкузовное расположение
- Масса с системой охлаждения 4000 кг

**Тяговый двигатель**

- Номинальная мощность 650 кВт
- Макс. мощность 680 кВт (360 км/ч)
- Пиковая мощность 725 кВт (400 км/ч)
- Номинальное напряжение 2340 В
- Номинальный ток 150 А
- Принудительное воздушное охлаждение
- Интегрированный датчик скорости
- Масса 720 кг

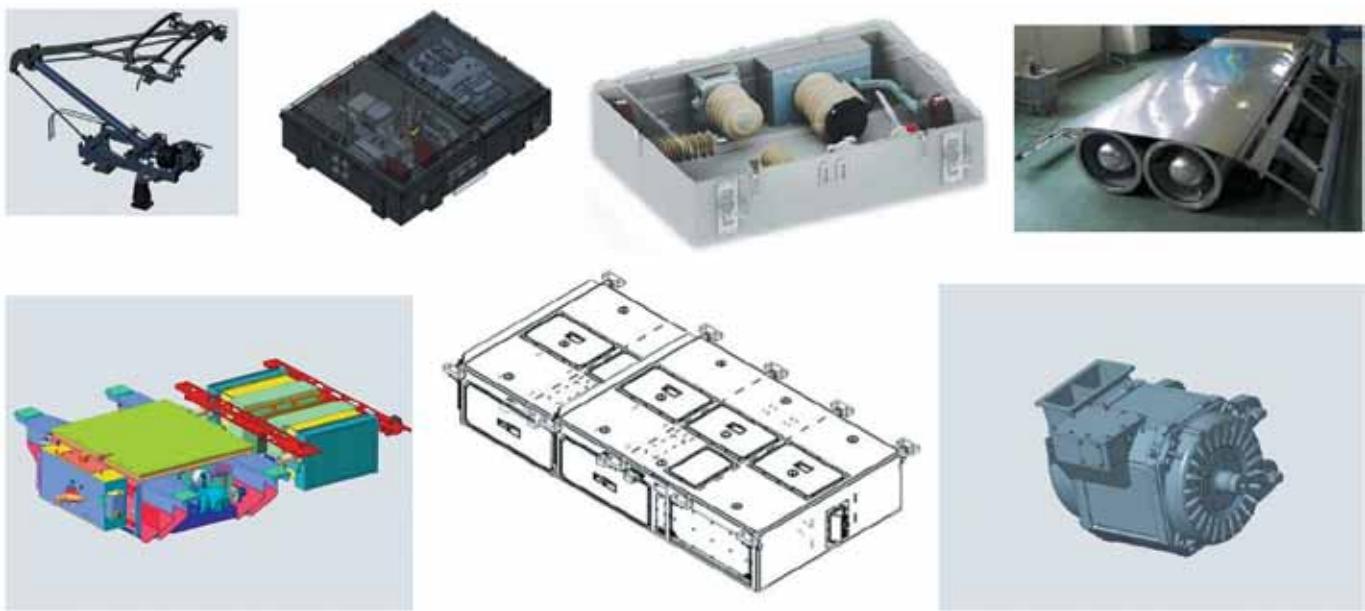


Рис. 3. Состав поставки тягового электропривода ВСП

300 км/ч, которая ограничена до 250 км/ч; воздухозаборники для ТЭД с воздушным охлаждением выведены на крышу поезда.

Следует иметь в виду, что стоимость и эксплуатация ВСП и ВСМ весьма дороги. Стоимость одного поезда ВСП с 350 сиденьями по европейским нормам стоит € 20–25 млн, а годовое обслуживание € 1 млн. Стоимость 1 км ВСМ составляет € 20–25 млн, а годовое обслуживание € 80 тыс. В результате окупаемость ВСП и ВСМ зависит от пассажиропотока и в России целесообразна лишь на магистралях с интенсивным движением, таких как Москва — Санкт-Петербург или Москва — Казань.

Структура ВСП в составе восьми вагонов приведена на рис. 1.

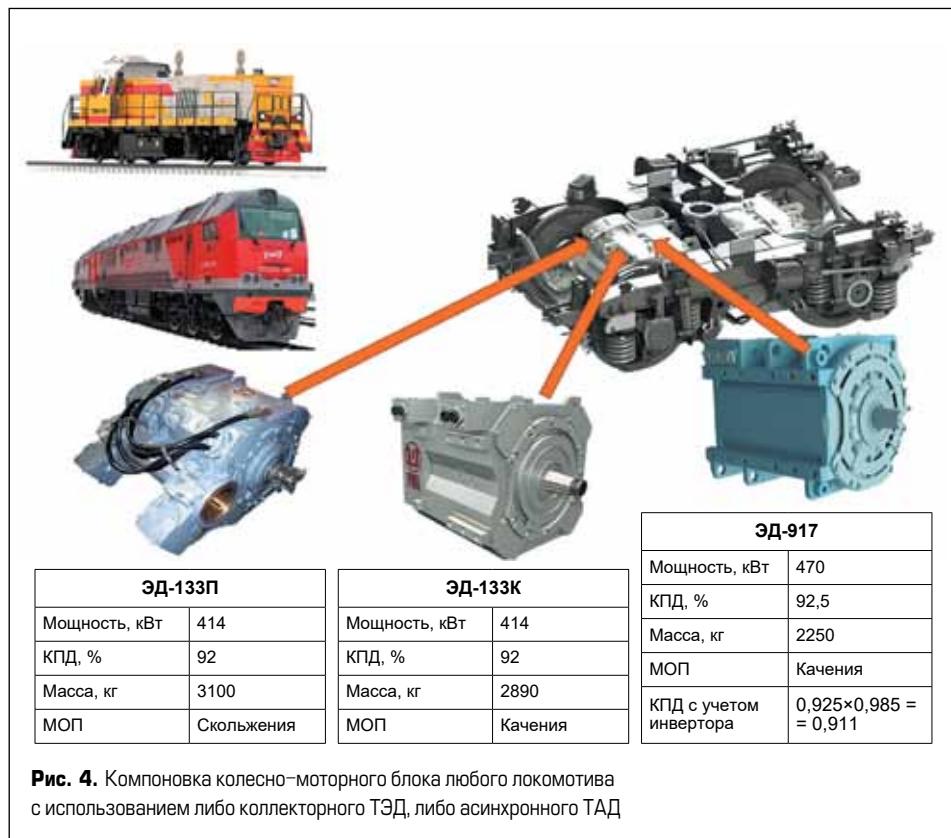
Тяговая система образована соединением главного трансформатора, тягового преобразователя и тягового двигателя. На рис. 2 представлена тяговая система и параметры основных компонентов.

На рис. 3 приведен состав поставки тягового электропривода ВСП, который включает весь объем оборудования тяговой системы, приведенный на рис. 1 и 2, начиная от токосъемника и заканчивая тяговым электродвигателем.

Основным элементом и движителем поезда является колесно-моторный блок, в состав которого входит ТЭД. На рис. 4 показана компоновка колесно-моторного блока любого локомотива с использованием либо коллекторного ТЭД, либо асинхронного ТАД. Коллекторный

ТЭД постоянного тока типа ЭД-133 имеет на 40% большую массу и пока широко используется на транспорте. Асинхронный ТАД типа АД-817 изображен справа на рис. 4, имеет меньшие габариты и массу и становится основным движителем ВСП с использованием тягового преобразователя.

Тяговый асинхронный двигатель (ТАД) становится наиболее предпочтительным на транспорте и заменяет коллекторные двигатели из-за простоты, надежности, меньшей стоимости. Возможности повышения энергоэффективности ТАД иллюстрируются на рис. 5 за счет снижения требуемого момента, повышения скорости вращения ротора и снижения максимального тока, а также вы-

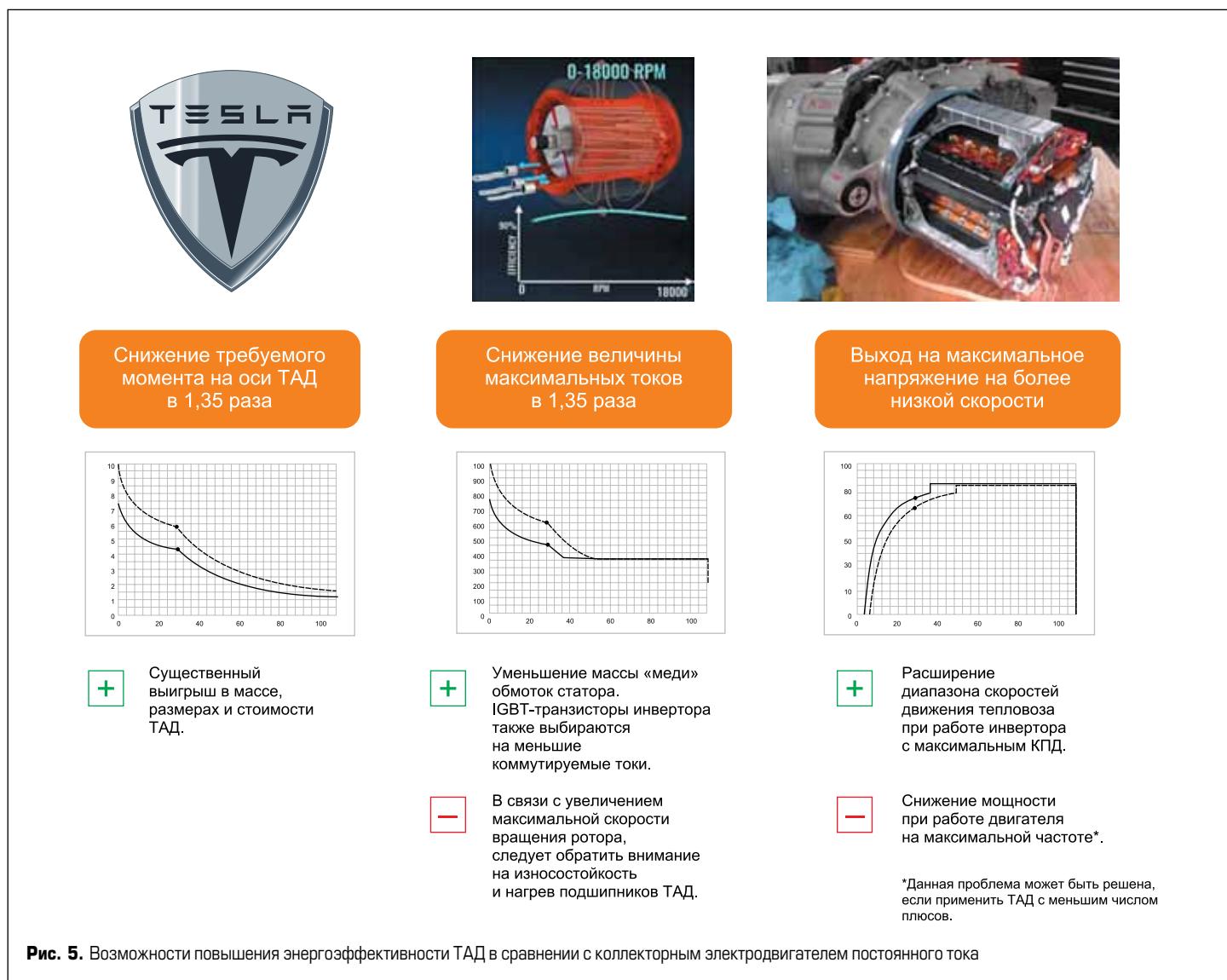


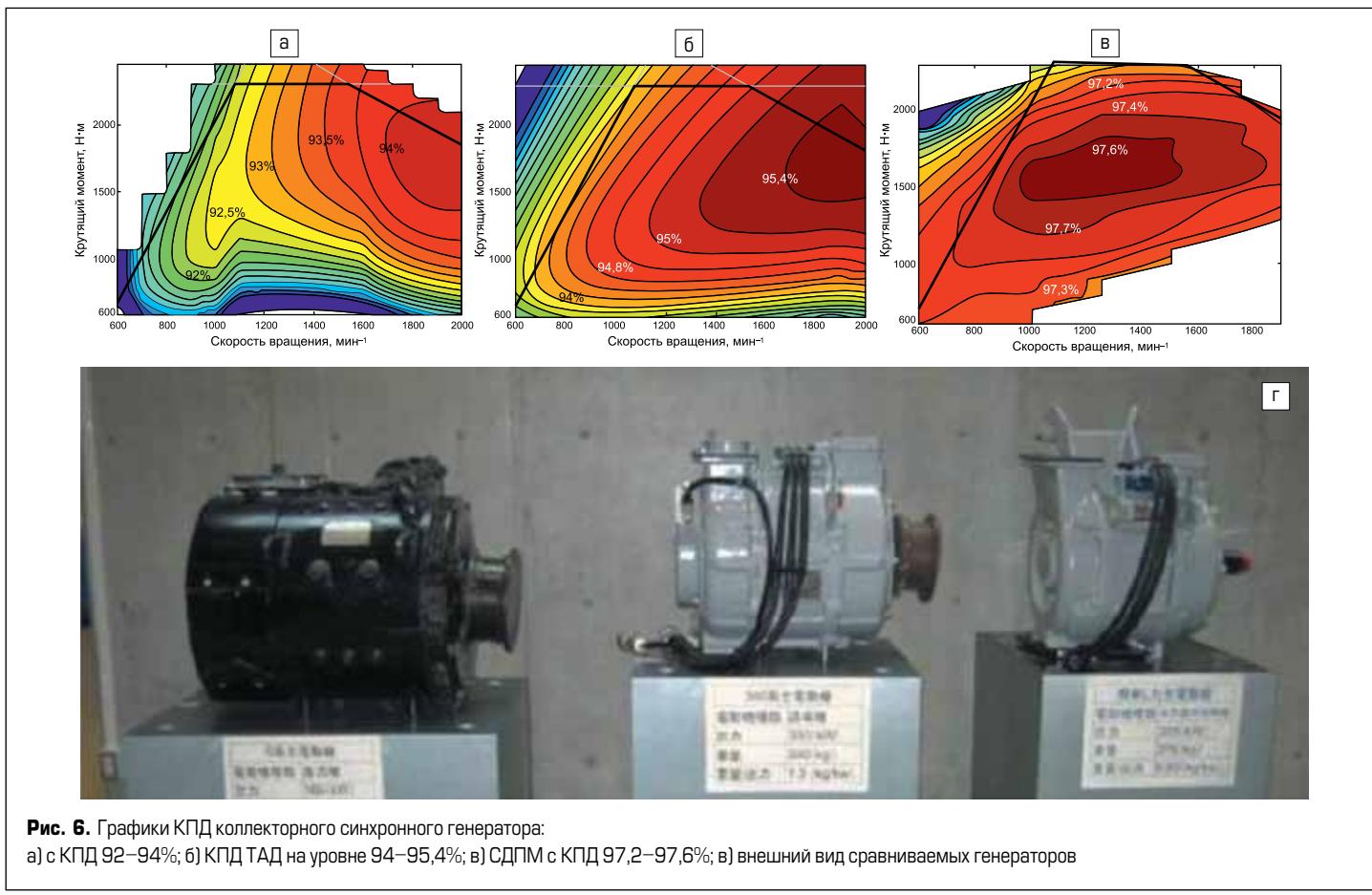
хода на максимальное напряжение при более низкой скорости. Последнее преимущество позволяет расширить диапазон скоростей движения. На рис. 5 проиллюстрированы возможности повышения энергоэффективности ТАД в сравнении с коллекторным электродвигателем постоянного тока.

Еще большие преимущества в смысле энергоэффективности обеспечивает применение тягового синхронного двигателя и генератора на постоянных магнитах (СДПМ). На рис. 6 приведены графики КПД коллекторного синхронного генератора с КПД 92–94%, в середине КПД ТАД на уровне 94–95,4% и справа СДПМ с КПД 97,2–97,6%. Внизу на рис. 6 представлены фото сравниваемых генераторов, которые подтверждают преимущества СДПМ в части массогабаритных показателей.

Следует иметь в виду, что КПД зависит от режима и скорости вращения ТЭД. На верхних графиках (рис. 6) черным цветом отмечено изменение КПД в зависимости от скорости вращения ТЭД.

Энергоэффективность ТЭД и момент вращения колес изменяются с изменением скорости, причем по мере набора скорости эти показатели снижаются. Зависимости момента вращения на колесе ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ ) от скорости враще-





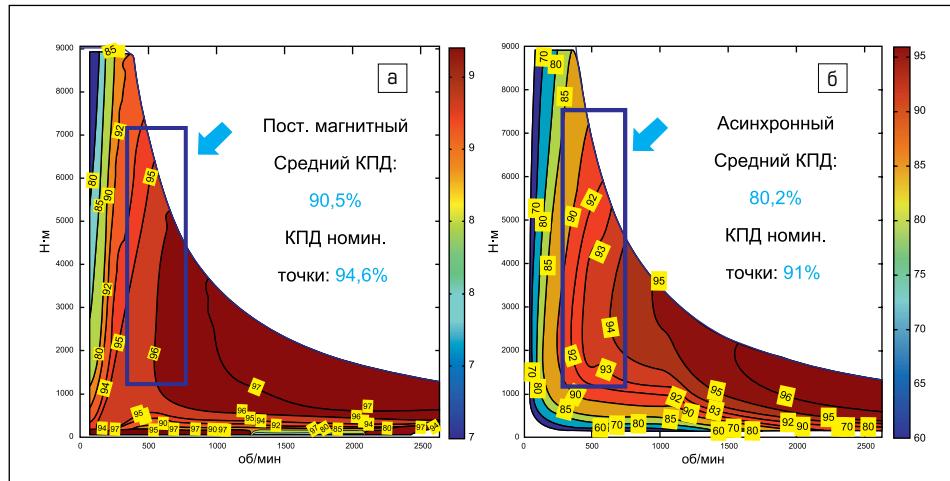
**Рис. 6.** Графики КПД коллекторного синхронного генератора:  
а) с КПД 92–94%; б) КПД ТАД на уровне 94–95,4%; в) СДПМ с КПД 97,2–97,6%; г) внешний вид сравниваемых генераторов

ния ТЭД (об./мин) приведены на графиках рис. 7. График слева соответствует СДПМ и показывает, что средний КПД в области номинальных оборотов до 1000 об/мин составляет 90,5%, а для ТАД средний КПД составляет 80,2%, что на 10% ниже, чем для СДПМ.

### Влияние на характеристики ТЭД материалов и свойств изоляции

Основные стандарты в части ТЭД приведены в [9]. В [2, 9] нормируются температуры наиболее нагруженных точек ТЭД ограниченным классом Н — +135 °C, в то время как современные виды ТЭД требуют использования класса С (+200 °C), особенно для быстроходных ТЭД. Температура подшипников скольжения ограничена +80 °C, а подшипников качения +100 °C, температура масла ограничена +65 °C. Рабочая температура в классах А, Е, В ограничена +135 °C. Испытательное напряжение для крупных ТЭД мощностью свыше 1000 кВт составляет  $2U_{\text{ном}} + 1000$  В напряжением до 3,3 кВ, в диапазоне напряжений 3,3–6,6 кВ составляет  $2,5U_{\text{ном}}$ , в диапазоне 6,6–17 кВ достигает  $2U_{\text{ном}} + 3000$  В, а свыше 17 кВ согласуется с заказчиком.

В соответствии с [2] испытания обмоток ТЭД выполняются в такой последовательности: измерение сопротивления, испытания повышенной частотой, при перегрузке, испытания электрической прочности при рабочем напряжении, испытания синхронной машины на стойкость к КЗ. Испытания на нагрев проводят на окончательной стадии. ТЭД, кроме того, перед сдачей в эксплуатацию на месте



**Рис. 7.** Зависимости момента вращения на колесе (Н · м) от скорости вращения (об/мин):  
а) для СДПМ; б) для ТАД

установки подвергают испытанию на нагрев при температуре +80 °C в течение 1 мин.

### Материалы ТЭД

Требования к материалам для ТЭД: электрическая прочность, нагревостойкость, теплопроводность, малая гигроскопичность, длительное старение. Наиболее популярные материалы: слюда, стекловолокно, бумага, компаунды, смолы, лаки.

Для ТЭД высокого напряжения предпочтительно использование слюды и изделий из нее (миканит, микалента, микафолий). Формовочный миканит имеет электрическую прочность  $E_{\text{пп}} = 15–40$  кВ/мм, гибкий миканит

$E_{\text{пп}} = 15–30$  кВ/мм, микалента  $E_{\text{пп}} = 14–20$  кВ/мм, микафолий  $E_{\text{пп}} = 13–16$  кВ/мм.

Виды ТЭД определяются более сложным сочетанием, нежели в другом электрооборудовании: витковая изоляция в виде параллельных проводов одного витка обмотки, межвитковая изоляция между витками обмотки, изоляция между слоями обмотки, междуфазная изоляция обмоток и, наконец, главная изоляция (она же пазовая изоляция обмотки относительно корпуса ТЭД).

Витковая изоляция относительно невелика (на уровне прочности напряжения до 600 В), обеспечивается изоляцией провода, а в мощных ТЭД дополнительно прокладкой миканита.

Мощность ТЭД ограничена степенью нагревостойкости материала изоляции, а также системой охлаждения ТЭД. Существуют [2] следующие классы материалов изоляции ТЭД: А — органические материалы, пропитанные маслами, плюс эмали и лаки; В — слюда, asbestos в виде неорганических материалов плюс органические связывающие вещества; BC и CB — промежуточные классы; C — слюда, фарфор, стекло, кварц, то есть неорганические материалы без связывающих веществ. Допустимые температуры классов: А — +105 °C, В — +120 °C, BC — +135 °C, CB — выше +135 °C, класс C не устанавливает предела. Предельная температура определяется добавкой средней температуры окружающей среды, равной +35 °C (по ГОСТу: +40 °C).

### Воздействия на ТЭД

ТЭД должен выдерживать воздействие напряжения промышленной частоты (неограничено долго), а также внутренние и атмосферные перенапряжения. Специфика ТЭД определяется трудными условиями эксплуатации частей обмотки в пазах статора и на выходе обмотки из паза статора. Предельные перенапряжения  $E_{\text{пп}}$  возникают в твердой изоляции и в воздушном зазоре, в изолационных каналах и выходе обмотки из паза при учете короны и скользящих разрядах.  $E_{\text{пп}}$  определяется суммой  $U_{\text{ном}}$  и  $U_{\text{имп}}$ , а также воздействием  $U_{\text{вЧ}}$  при отсутствии фильтра ВЧ от преобразователя частоты (ПЧ).

ТЭД подвергается воздействию электрического поля и теплового поля, которое возникает от тока обмотки, вихревых токов и гистерезиса магнитопровода, а также дополнительных токов ВЧ от ПЧ. Электрическая прочность ТЭД определяется прочностью материала изоляции, совершенством конструкции, которая не должна допустить ионизации, ускоряющей старение материала ТЭД.

Электрическая прочность материала зависит от амплитуды, формы импульсов и числа их воздействий. Место разряда проходит по извилистому пути, превышающему толщину изоляции. В результате прочность изоляции может самовосстанавливаться после разряда, однако запас изоляции может снижаться после воздействия определенного числа импульсов. Импульсная прочность твердой изоляции выше по сравнению с прочностью на промышленной частоте, что учитывается коэффициентом импульса. Увеличение длительности коммутационного импульса снижает прочность изоляции в сравнении с воздействием грозового разряда. Повышение температуры изоляции снижает импульсную прочность ТЭД.

Новые материалы, например применение постоянных магнитов в ТЭД наряду с повышением энергоэффективности и перегрузочной способности, имеют ряд негативных факторов: наличие магнитного поля с плотностью энергии до 280 кДж/м<sup>3</sup> ухудшает самочувствие персонала и требует защиты от внешних факторов. Более высокая стоимость и сложность конструкции также ограничивают применение таких ТЭД, имеющих предел по мощности порядка 1–5 МВт.

### Увлажнение и нагрев ТЭД

Увлажнение изоляции происходит только в холодном состоянии, когда ТЭД не работает. При работе ТЭД его изоляция практически не увлажняется, особенно при наличии замкнутой системы вентиляции.

Нагрев ТЭД существенно влияет как на электрическую прочность изоляции, так и на увеличение потерь, что снижает энергоэффективность в части КПД. Потери в ТЭД определяются наряду с зависимостью удельного сопротивления обмотки, а также зависимостью от  $\tg \delta$  изоляции, в первую очередь главной (пазовой), которая формируется сочетанием компаунда и изоляции проводов обмотки.

С ростом температуры изоляции  $\tg \delta$  начинает резко расти, а при остывании снижается. Если воздействующее напряжение превышает  $U_{\text{ном}}$  и одновременно происходит повышение температуры изоляции, то необратимо увеличивается  $\tg \delta$ , приводя к неизбежному старению изоляции. Выбор значения  $\tg \delta$  на уровне, не превышающем 30%, обеспечивает приемлемые показатели КПД и качества ТЭД на протяжении всего срока эксплуатации. Этот же показатель при мониторинге может определять остаточный ресурс на протяжении срока эксплуатации, позволяя сформировать цифровой двойник ТЭД.

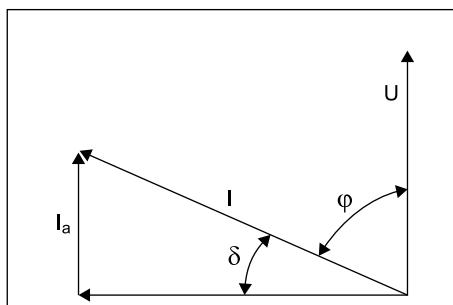
### Свойства диэлектриков

Свойства диэлектриков зависят от их типа, способа изготовления и технологии укладки, что и отражено в [9].

При переменном напряжении в изоляции ТЭД протекает ток, опережающий по фазе приложенное напряжение на угол  $\phi$  (рис. 8), меньший 90° эл. на небольшой угол  $\delta$ , обусловленный наличием активного сопротивления.

Отношение активной составляющей тока  $I_a$  к емкостной составляющей  $I_c$  называется тангенсом угла диэлектрических потерь и выражается в процентах:

$$\tg \delta = (I_a/I_c) \times 100\%.$$



**Рис. 8.** Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями:  
U — напряжение на диэлектрике;  
I — полный ток через диэлектрик;  
 $I_a, I_c$  — соответственно активная и емкостная составляющие полного тока;  
 $\phi$  — угол фазового сдвига между приложенным напряжением и полным током;  $\delta$  — угол между полным током и его емкостной составляющей

В идеальном диэлектрике без потерь угол  $\delta = 0$  и, соответственно,  $\tg \delta = 0$ . Увлажнение и другие дефекты изоляции вызывают увеличение активной составляющей тока диэлектрических потерь и  $\tg \delta$ . Поскольку при этом активная составляющая растет значительно быстрее, чем емкостная, показатель  $\tg \delta$  отражает изменение состояния изоляции и потери в ней. При малом объеме изоляции удается обнаружить развитые местные и сосредоточенные дефекты.

### Диэлектрические потери

Диэлектрические потери являются частью энергии электрического поля, которая расходуется в диэлектрике в виде тепла. Нагрев диэлектрика в постоянном поле зависит от объемного и поверхностного сопротивления и определяется зависимостью:

$$P_{\text{уд}} = E^2/\rho,$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $P_{\text{уд}}$  — удельные потери, Вт/м<sup>3</sup>.

В переменном электрическом поле диэлектрические потери связаны в основном с явлениями поляризации. Электронная и ионная поляризации обеспечивают поглощение электроэнергии поля на частотах инфракрасного и ультрафиолетового диапазона, когда частота электронов и ионов совпадает с частотой поля. Потери на переменном напряжении определяются более сложными зависимостями, нежели на постоянном токе. Обычно диэлектрические потери, определяемые  $\tg \delta$ , относят к потерям на переменном напряжении.

На основании диаграммы рис. 8 полные диэлектрические потери равны:

$$P = UI_c \tg \delta, \\ I_c = U\omega C, \\ P = U^2\omega C \tg \delta,$$

где  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота, рад/с;  $f$  — частота, Гц;  $C$  — емкость, Ф.

Протекание сквозного тока через диэлектрик по диаграмме рис. 8 приводит к зависимости:

$$\tg \delta = I_a/I_c = 1/R\omega C,$$

так что  $\tg \delta$  обратно пропорционален частоте и растет с увеличением температуры [9].

Зависимость  $\tg \delta$  от напряжения имеет нелинейный характер, зависит от процесса ионизации диэлектрика и приводит к росту  $\tg \delta$  с последующим спадом.

Зависимость  $\tg \delta$  от влажности проявляется для гигроскопичных диэлектриков и приводит к росту  $\tg \delta$  с увеличением влажности из-за роста активной составляющей тока, вызывающей нагрев диэлектрика.

### Электрическая прочность изоляции

Электрическая прочность изоляции определяется минимальным напряжением пробоя  $U_{\text{пп}}$ , которое приводит к образованию прово-

дящего канала и называется пробивным напряжением. Отношение импульсного пробивного напряжения к его статическому значению больше единицы и называется коэффициентом импульса. Зависимость  $U_{\text{пр}}$  от времени приложения импульса именуется кривой жизни электрической изоляции. Снижение  $U_{\text{пр}}$  во времени обусловлено старением изоляции под действием тепла и электрического поля.

Электрическая прочность изоляции — это напряженность электрического поля  $E_{\text{пр}}$  при пробое изоляции в однородном электрическом поле, которая равна

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/d,$$

где  $E_{\text{пр}}$  — напряженность электрического поля, В/м;  $U_{\text{пр}}$  — пробивное напряжение, В;  $d$  — толщина диэлектрика, м.

Обычно соотношение электрической прочности измеряется либо в МВ/м, либо в кВ/мм, причем 1 МВ/м = 1 кВ/мм.

### Электрический и тепловой пробой

Электрический пробой связан с разрушением диэлектрика из-за ударной ионизации электронами или разрыва связей между атомами или молекулами. Пробой происходит за время  $10^{-5} \dots 10^{-8}$  с.

Пробивное напряжение воздуха составляет 3 кВ/мм, жидкого диэлектрика — 100 кВ/мм, твердых диэлектриков 100–1000 кВ/мм.

Наряду с электрическим пробоем возможен тепловой пробой, когда выделяемое тепло в диэлектрике  $Q_1$  становится больше отводимой теплоты  $Q_2$ . Выделяемое количество тепла определяется выражением:

$$Q_1 = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

где  $U$  — напряжение, приложенное к диэлектрику;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота;  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс диэлектрических потерь.

Отводимое количество тепла равно:

$$Q_2 = 2\sigma S(T - T_0),$$

где  $S$  — площадь электрода;  $\sigma$  — коэффициент теплоотвода в окружающую среду;  $T$  и  $T_0$  — температуры диэлектрика и окружающей среды.

Тепловой пробой происходит там, где хуже всего теплоотдача, и возникает при  $E_{\text{пр}}$  около 10 кВ/мм в интервале времени  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  с. При тепловом пробое  $E_{\text{пр}}$  снижается с ростом температуры, длительностью выдержки под напряжением, увеличением толщины диэлектрика.

В твердых диэлектриках может дополнительно развиваться ионизационный пробой, например в полимерах с газовыми порами, в которых под действием ионизации возникают частичные разряды, изменяющие химический состав и механическую прочность диэлектрика.

Электромеханический пробой происходит в хрупких диэлектриках из-за развития

микротрещин в газовых включениях под действием местных перегревов и приводит к механическому разрушению полимера при высоком напряжении и уменьшению толщины диэлектрика из-за притяжения электродов под действием высокого напряжения.

### Выбор системы изоляции

Статорные обмотки высоковольтных ТЭД изготавливаются с применением термореактивной изоляции — это либо предварительно пропитанные (в отечественной практике), либо непропитанные (за рубежом) слюдосодержащие ленты (далее — ленты). Последние пропитываются термореактивным эпоксидным компаундом горячего отверждения, причем используется способ вакуумноагнетательной пропитки. Такая система изоляции называется «монолит», а за рубежом — VPI. Основой изоляции служит слюдяная бумага и стеклотканевая подложка, а иногда и вторая подложка в виде полимерной пленки. Перечисленные компоненты пропитываются раствором термореактивной смолы [10].

Для получения качественной главной (пазовой) изоляции используют горячее прессование

вание при давлении 20–40 атм и температуре +80 °C.

Особенностью перспективных лент ЗАО «Диэлектрик» марок ЛСп-Н-ТПл является большой (больше года) срок жизни благодаря использованию компаунда марки КП-303, который отличается высокой технологичностью и практическим отсутствием реакции полимеризации. Правильное соблюдение технологии «монолит» позволяет существенно повысить длительную электрическую прочность изоляции, увеличив ее в сотни раз. Кратковременная электрическая прочность достигает 50–55 кВ/мм [11, 12].

Выбор системы изоляции происходит на основе сравнительных характеристик, определяющих надежность работы системы изоляции в условиях повышения температур до +200 °C и скачков напряжения до 10 кВ.

На рис. 9 представлен график зависимости тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  от температуры (°C) на различных пропитывающих составах при испытательном напряжении 1 кВ. Из графика следует, что только компаунд КП-303Н обеспечивает  $\operatorname{tg} \delta$  менее 30% и минимальные потери в диапазоне до +200 °C [11].

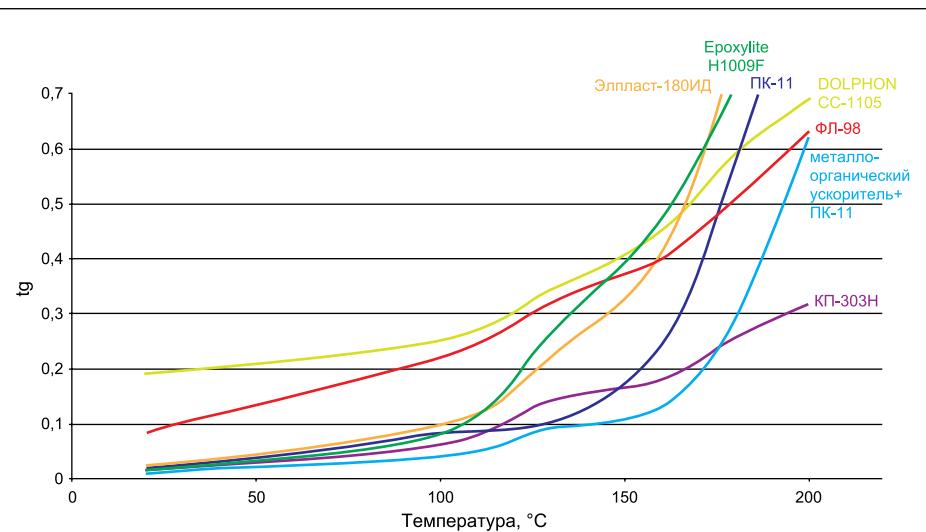


Рис. 9. График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  от температуры, °C [11]

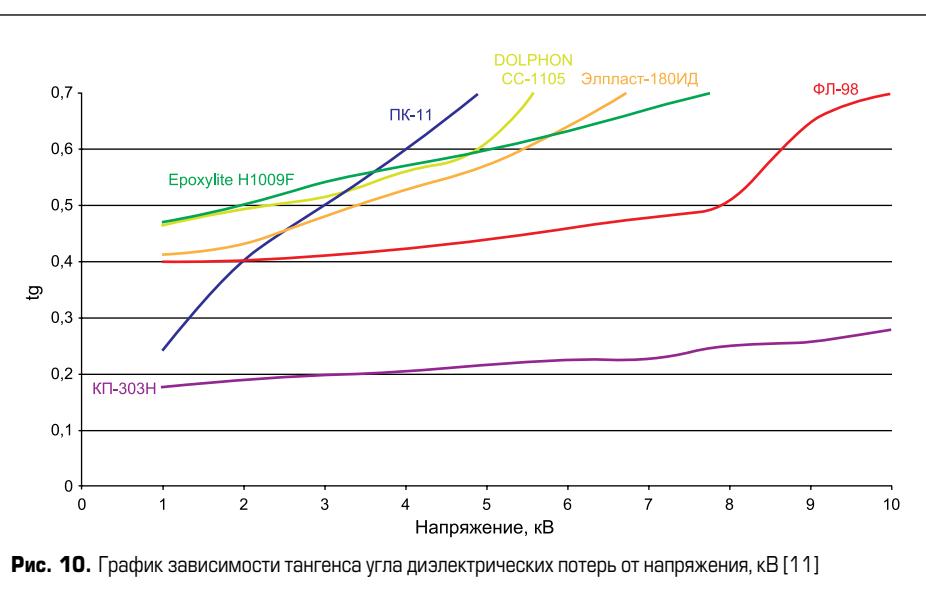
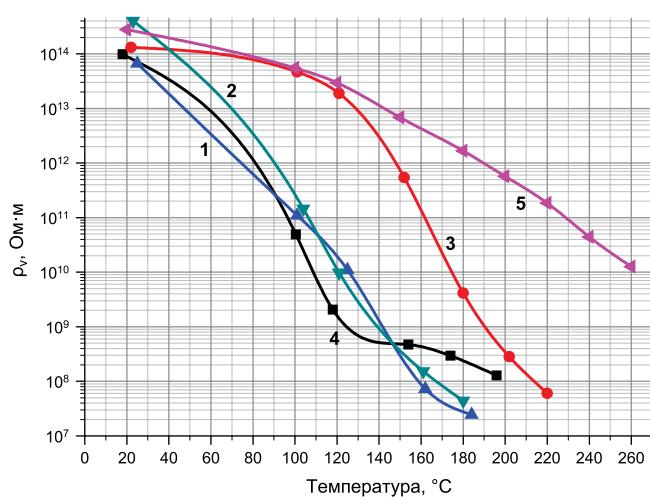


Рис. 10. График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения, кВ [11]



**Рис. 11.** Зависимость удельного сопротивления электроизоляционных компаундов от температуры ТЭД:  
1, 2 — класс В; 4 — класс Е; 3 — класс F; 5 — класс Н

На рис. 10 изображен график зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения (кВ) для различных пропитывающих составов при температуре +160 °C. Значение tg δ менее 30%, что обеспечивает минимальные потери в указанном температурном диапазоне при напряжении до 10 кВ [11].

Анализ критериев надежности системы изоляции класса нагревостойкости Н (+180 °C) и скачков напряжения до 10 кВ показал преимущества применения ленты ЛСп-Н-ТПл и компаунда КП-303Н по сравнению с другими компонентами. Тангенс диэлектрических потерь не превышает 30%, уровень сопротивления изоляции не менее 10<sup>11</sup> Ом, электрическая прочность не ниже 20 кВ/мм.

Указанная система изоляции прошла апробацию на ТЭД для РЖД, обеспечивает высокую надежность и гарантированный пробег до 2–4 млн км.

На рис. 11 приведена зависимость удельного сопротивления электроизоляционных компаундов от температуры ТЭД, где 1, 2 — класс В; 4 — класс Е; 3 — класс F; 5 — класс Н. Стоимость исходных сырьевых компонентов, необходимых для создания высокотемпературостойких и теплопроводных электроизоляционных компаундов, в 2–3 раза превышает стоимость выпускаемых сегодня отечественных электроизоляционных компаундов и составляет 3–5 тыс. руб. за 1 кг против 1–1,5 тыс. руб. за производимые в настоящее время материалы.

В то же время стоимость импортных высокотемпературостойких материалов составляет 3–5 тыс. рублей (50–100 \$/кг). Экономическая эффективность применения новых материалов достигается общим уменьшением материоемкости электрооборудования. Снижение массы электрогенератора мощностью 10 МВт на 30% означает уменьшение металлоемкости на 5 т и позволяет сэкономить 400 тыс. руб. (80 тыс. руб. за 1 т металла). Это полностью компенсирует увеличение стоимости электроизоляционных материалов, доля которых составляет 5–7% от массы электрооборудования (200–800 кг), что компенсирует увеличение стоимости изоляции на 2 тыс. руб. При снижении мощности ТЭД, но увеличении их тиража меньшая компенсация стоимости улучшенной изоляции также дает значительный экономический эффект.

## Литература

- Шульга Р. Н. Стандарт PROFINET для железнодорожного транспорта // Оперативное управление в электроэнергетике. 2023. № 3.
- Шульга Р. Н., Лабутин А. А., Кириакин А. А. Разработка, испытания и применение электрических машин. В 2 ч. Ч 1. Разработка и испытания электрических машин. Учебн. пос. М.: МЭИ, 2022.
- Шульга Р. Н. Двигатели постоянного тока для тягового электропривода // Оперативное управление в электроэнергетике. 2023. № 1.
- Шульга Р. Н. Динамика синхронных электродвигателей с постоянными магнитами // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2023. № 1.
- Шульга Р. Н., Корсаков С. С., Ильин К. А. Магнитные системы электромашин с постоянными магнитами // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2023. № 1.
- Шульга Р. Н. Современный электропривод с синхронным реактивным двигателем // Силовая электроника. 2023. № 1.
- Шульга Р. Н., Добкин И. Д. Энергетические и динамические показатели модульных DC/DC-конвертеров // Силовая электроника. 2022. № 3.
- Шульга Р. Н., Лабутин А. А. Новые материалы и технологии электрических машин // Промышленная энергетика. 2021. № 4.
- Изоляция электрических машин. [www.rza.org.ru](http://www.rza.org.ru)
- Окнин Н. С. Высоковольтная изоляция электрических машин. Научно-практический семинар по теме «Электроизоляционные материалы, их свойства, назначение и особенности применения», Хотьково, 10–11.06.2010.
- Прохоров В. В. Грамотно выбранные технологии производства и ремонта ТЭД локомотивов — залог их надежной и долговечной работы. Научно-практический семинар по теме «Электроизоляционные материалы, их свойства, назначение и особенности применения». Хотьково, 10–11.06.2010.
- Каталог продукции ЗАО «Диэлектрик». [www.dielektrik.ru](http://www.dielektrik.ru)

## Новые серии DC/DC-преобразователей SI06W8 и DI06W8 от MEAN WELL

Компания MEAN WELL представляет новые 8-Вт серии источников питания — одноканальную SI06W8 и двухканальную DI06W8, логически продолжающие 1×1" серии мощностью 6 Вт (SKMW06, DCKM06), 10 Вт (SKM10, DCKM10), 15 Вт (SKMW15, DCKM15), 20 Вт (SKMW20, DCKM20), 30 Вт (SKMW30, DCKM30).

В отличие от предшественников, которые поддерживали 4:1 диапазон входных напряжений, серии SI06W8 и DI06W8 поддерживают сверхширокий диапазон входных напряжений 8:1 (9–75 В постоянного тока). Диапазон рабочих температур составляет −40...+90 °C. Изоляция вход/выход рассчитана 3000 В постоянного тока и соответствует требованиям стандарта EN55032 по классу A электромагнитных помех.

Серии SI06W8, DI06W8 в корпусах форм-фактора 1×1" без внешних компонентов имеют внутреннюю

заливку силиконовым гелем, что не только помогает отводить тепло и продлевает срок службы, но и обеспечивает пыле- и влагонепроницаемость и антивibrationные свойства. Эти особенности делают преобразователи пригодными для установки в электрических панелях, телекоммуникационном оборудовании, системах промышленной автоматизации, архитектуре распределенного электроснабжения и системах оборудования для транспорта. Новые серии SI06W8, DI06W8 обеспечивают следующие ключевые преимущества:

- форм-фактор: 1×1";
- широкий диапазон входного напряжения 8:1: 9–75 В постоянного тока;
- свободная конвекция воздуха, диапазон рабочих температур: −40...+90 °C;
- защита: короткое замыкание, перегрузка, перенапряжение, входное пониженное напряжение;



- соответствие требованиям стандарта EN55032 по защите от электромагнитных помех класса A без использования внешних компонентов;
- нет требований к минимальной нагрузке;
- сертификаты: EAC, CE, UKCA;
- размеры (Д×Ш×В): 25,4×25,4×10,2 мм;
- гарантия: три года.

[www.eltech.spb.ru](http://www.eltech.spb.ru)

# Понижение пульсации выходного тока

## мостового резонансного DC/DC-преобразователя

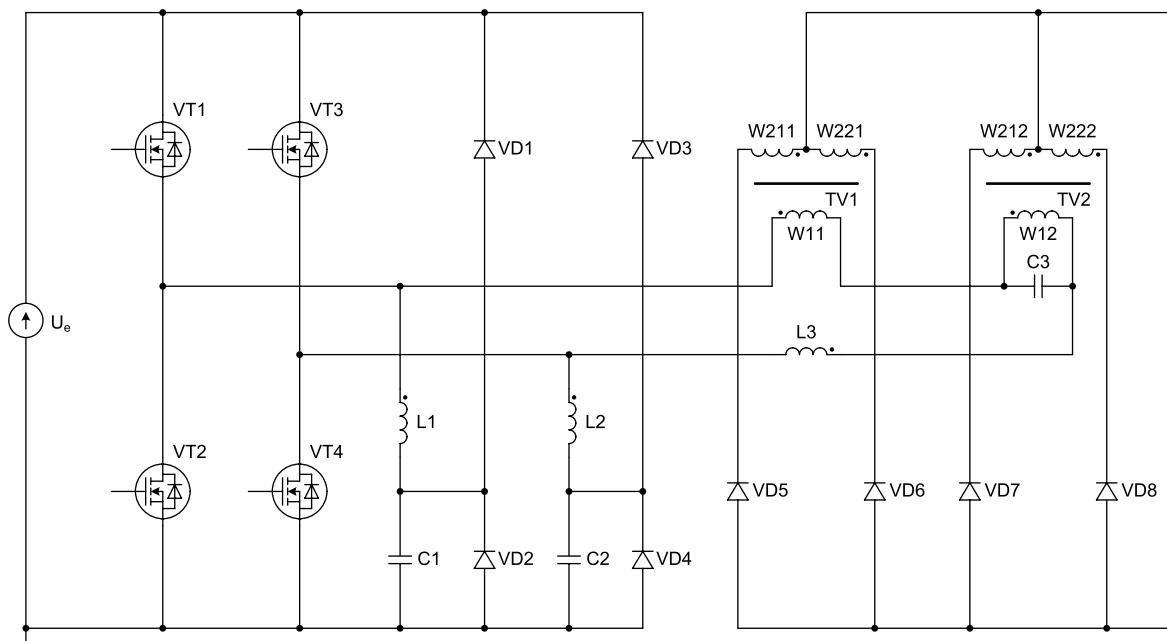
**Рассмотрены пути снижения пульсации постоянного тока выходной цепи мостового резонансного DC/DC-преобразователя.**

**Борис Глебов**

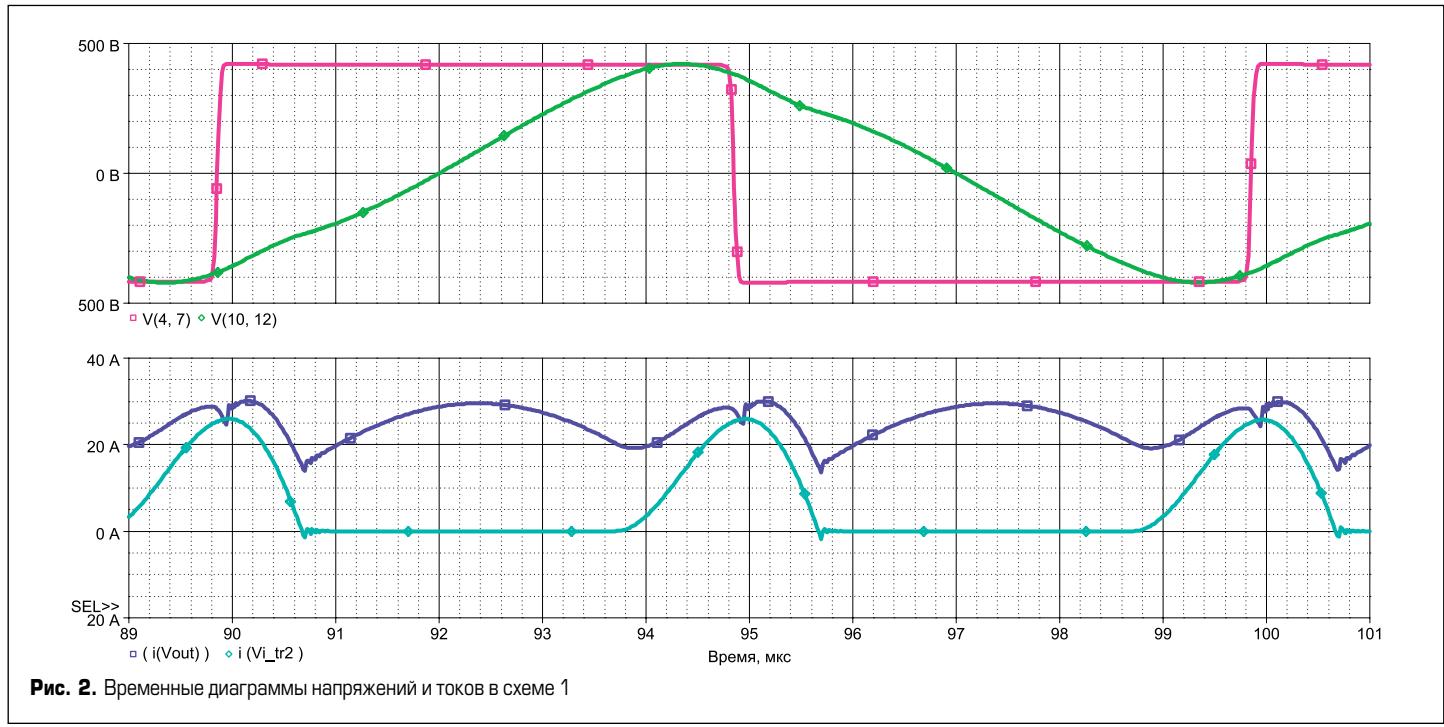
Важнейшая задача, решаемая при разработке DC/DC-преобразователей,— снижение массы и габаритов элементов его силовой схемы. В мостовом резонансном преобразователе такая задача решается использованием цепи ограничения (и, кроме того, снижения) амплитуды знакопеременного напряжения на конденсаторе резонансной LC-цепи [1]. В этой схеме силовые транзисторы, образующие мостовую цепь, управляются микроконтроллером UC 3875 [2]. Он обеспечивает фазовый принцип коммутации транзисторов, стабилизацию выходного напряжения преобразователя ( $U_{out}$ ), а также плавный характер его регулировочной характеристики, то есть зависимости от параметра управления  $D$  выходной мощности преобразователя ( $P_{out}$ ) в пределах ее изменения от нуля до максимума.

Недостаток схемы, рассмотренной в [1], состоит в повышенной пульсации постоянного тока в ее выходной цепи для режима, который приближается к максимуму выходной мощности устройства. Выходной ток в таком режиме близок по форме к выпрямленной синусоиде [1].

Для уменьшения пульсации выходного тока следует применить цепь, предложенную в [3]. Представленная там схема DC/DC-преобразователя изображена на рис. 1 и подобна той, что была рассмотрена в [1]. Отличие состоит лишь в том, что вторичная обмотка в дополнительном трансформаторе TV2, которая выполнена в такой же конструкции, как в основном трансформаторе TV1 (в виде двухфазной обмотки), через вентильные элементы выпрямителя (диоды VD7 и VD8) подключена к выходной цепи DC/DC-преобразователя.



**Рис. 1.** Силовая схема мостового резонансного DC/DC-преобразователя



По первичной обмотке W11 основного трансформатора TV1 протекает такой же ток, как по резонансной LC-цепи. На границах нечетных и четных тактов работы схемы этот ток снижается практически до нуля, а напряжение на конденсаторе C3 резонансной LC-цепи, наоборот, приближается к максимальному значению. Параллельно C3 подключена первичная обмотка W12 дополнительного трансформатора TV2. Следовательно, напряжение на ней, а также на вторичной обмотке (W212, W222) трансформатора TV2 достигает значений, близких к максимуму, что вызывает отпирание вентильного элемента (VD7 или VD8) выпрямителя, подключенного к ней. Это означает, что ток во вторичной обмотке трансформатора TV2 добавляется к току во вторичной обмотке (W211, W221) трансформатора TV1 именно в те моменты времени, когда ток в последней обмотке оказывается близким к нулю. В результате нижняя и верхняя границы тока в выходной цепи DC/DC-преобразователя «приподнимаются», что способствует снижению его пульсации.

При работе схемы в первичную обмотку силового трансформатора TV1 передается напряжение  $U_{W11}$  с его вторичной обмотки. Чем меньше величина  $U_{W11}$ , тем больше амплитуда тока в резонансной LC-цепи и, соответственно, большая амплитуда тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора TV2. Изменяя коэффициент трансформации TV1, можно управлять величиной  $U_{W11}$  и таким образом влиять на границы выходного тока.

На рис. 2 представлены временные диаграммы напряжений и токов для режима максимума выходной мощности преобразователя, то есть при  $D \rightarrow 1$ . На этом рисунке красным цветом обозначено напряжение на выходе транзисторной мостовой цепи, зеленым — напряжение на конденсаторе C3 резонансной LC-цепи, синим — ток в выходной цепи преобразователя, голубым — ток, поставляемый в выходную цепь трансформатором TV2.

Диаграммы на рис. 2 построены на основе моделирования [4–6] силовой схемы мостового резонансного DC/DC-преобразователя, изображенной на рис. 1. Моделирование проводилось многократно: каждый новый вариант отличался от предыдущего числом витков первичной обмотки трансформатора TV1, то есть коэффициентом трансформации его вторичной обмотки. При этом изменялась временная диаграмма тока выходной цепи преобразователя. На рис. 2 диаграммы изображены для оптимального варианта схемы, который характеризуется наименьшей пульсацией тока выходной цепи.

В оптимальном варианте принято:

- Напряжение питания:  $U_e = 420$  В.
- Выходное напряжение:  $U_{out} = 120$  В.
- Транзисторы мостовой цепи — типа IRFPS38N60L (600 В, 38 А, 0,12 Ом).
- Две цепи snubber содержат дроссель L1 (L2), конденсатор C1 (C2), а также диоды VD1, VD2 (VD3, VD4). Дроссель с числом витков 57 выполнен на сердечнике RM8-N87,  $A_L = 250$  нФ [5]. Данные дросселя:  $L_{w1} = L_{w2} = 520$  мГн,  $R_{w1} = R_{w2} = 1,014$  Ом. Конденсаторы C1, C2 емкостью 7,5 нФ.
- Модель кремниевого диода: .model SilD D ( $R_s = 5$  мОм,  $C_{jo} = 0,3$  нФ,  $T_t = 28$  нс,  $I_s = 1$  нА) [4].
- Сердечники всех магнитных элементов из магнитного материала N87 (EPCOS) [5].
- Силовой трансформатор TV1 выполнен на сердечнике типоразмера PQ 35/35. Параметры трансформатора: W11 = 27; W221 = 9; W222 = 9;  $L_{w11} = 0,00328$  Гн;  $R_{w11} = 0,0215$  Ом;  $R_{w221} = 0,00704$  Ом;  $R_{w222} = 0,00801$  Ом.
- Трансформатор TV2 и дроссель L3 содержат сердечники одинакового типоразмера PQ 26/25. Параметры трансформатора TV2: W12 = 10; W212 = 10; W222 = 10;  $L_{w12} = 450$  мГн;  $R_{w12} = 0,02877$  Ом;  $R_{w221} = 0,02498$  Ом;  $R_{w222} = 0,02835$  Ом.
- Параметры элементов резонансной LC-цепи. Дроссель L3 ( $L_{res}$ ): толщина немагнитного зазора — 1,28 мм;  $wL3 = 13$ ,

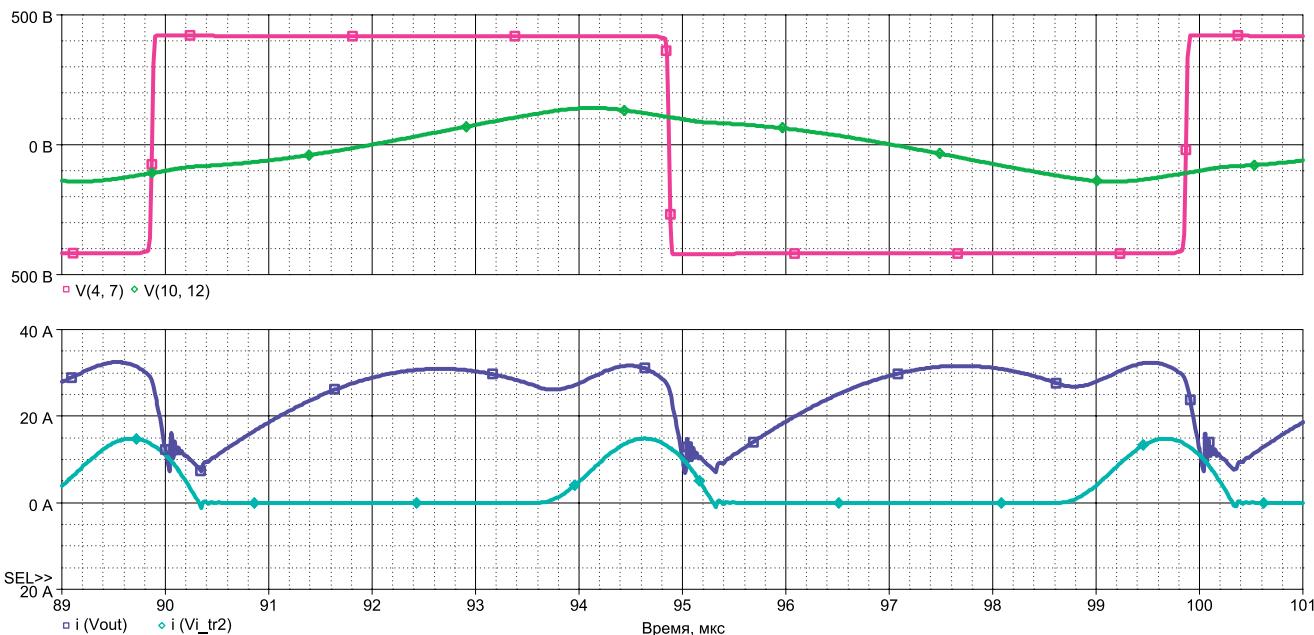


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений и токов в схеме 2

$L_3 = 17,9 \text{ мкГн}$ ,  $R_{wL3} = 0,0816 \text{ Ом}$ .  
Конденсатор  $C_3 (C_{res}) = 141,6 \text{ нФ}$ .

Сравнение схем 1 и 2 может быть проведено на основе анализа рис. 2 и 3, а также рис. 4 и 5, на которых изображены регулировочные и энергетические характеристики этих схем, построенные по результатам моделирования.

Анализ показывает, что схемы 1 и 2 подобны по регулировочным характеристикам. Что касается уменьшения габаритов магнитных элементов в схеме 2 по отношению к схеме 1, то это влечет за собой возрастание пульсации выходного тока в схеме 2. Однако энергетическая эффективность схемы 2 несколько выше в широком диапазоне изменения выходной мощности.

При окончательном выборе варианта схемы на основе ее моделирования приходится решать, что более целесообразно: минимизировать пульсацию тока в выходной цепи преобразователя или обеспечить его более высокую энергетическую эффективность. При проведении моделирования имеет смысл расширить число магнитных материалов, а также видов и типоразмеров сердечников, используемых в магнитных элементах схем.

### Литература

- Глебов Б. А. Способ улучшения свойств мостового резонансного DC/DC-преобразователя // Силовая электроника. 2023. № 2.
- Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. Справочник. 2-е изд., испр. и доп. М.: Додэка – XXI, 2001.
- Глебов Б. А., Жигачев В. А. Патент на изобретение РФ № 2592148. Резонансный мостовой преобразователь напряжения. Госреестр изобретений РФ, 7 июля 2016 г.
- Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2. М.: СОЛОН-Р, 2001.

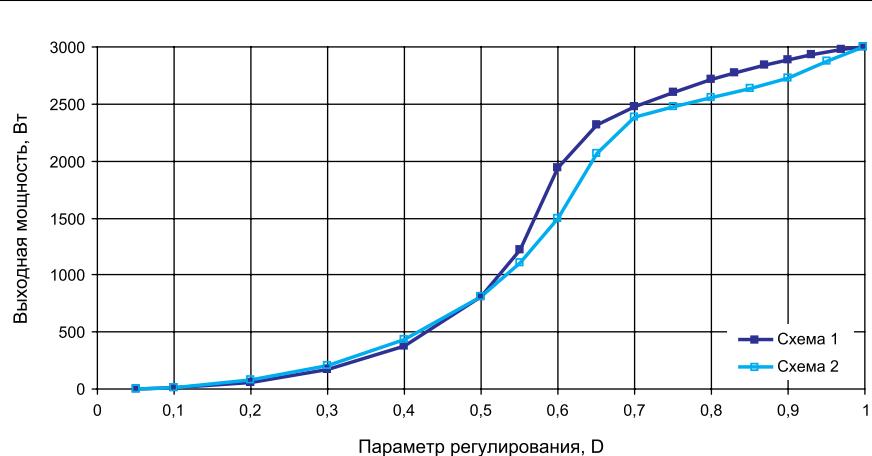


Рис. 4. Регулировочные характеристики схем 1 и 2

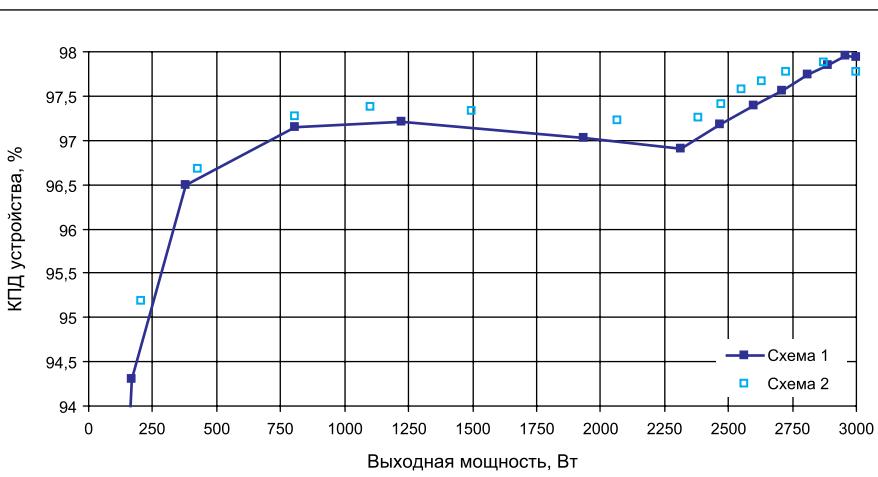


Рис. 5. Зависимости КПД схем 1 и 2 от величины выходной мощности

- Ferrites and Accessories. EPCOS Data Book 2013.— EPCOS AG A Member of TDK-EPC Corporation.
- Глебов Б. А. Процессы перемагничивания ферромагнетиков и их моделирование. Учебн. пос. М.: МЭИ, 2015.

# Двунаправленные преобразователи для устройств быстрой зарядки электромобилей: оптимизация габаритов, мощности и цены

**Разрабатываемые в настоящее время станции быстрой зарядки электромобилей (EV) постоянным током должны соответствовать более строгим требованиям, чем те, что определены в действующих сегодня спецификациях. Повышенные требования обусловлены двумя рыночными факторами: во-первых, необходимостью обеспечить ускоренную зарядку аккумуляторов большой емкости, используемых в новейших EV. Во-вторых, новые зарядные станции должны поддерживать двунаправленный поток энергии — это нужно для реализации концепций V2G (транспортное средство–сеть) и V2B (транспортное средство–здание). Данные концепции позволяют наилучшим образом сбалансировать энергосистему, поскольку дают возможность получать больше энергии из таких «нестабильных» источников, как ветер и солнце.**

**Риккардо Коллурा  
(Riccardo Collura)**

**Перевод: Иван Сергеев**

Производители зарядных устройств улучшают гибкость быстрых зарядных DC-станций за счет использования модульных конструктивных блоков: несколько таких блоков могут быть включены параллельно для увеличения выходной мощности до 300 кВт. Это означает, что при их размещении в корпусе зарядного устройства ключевой проблемой становится увеличение плотности мощности и повышение эффективности отвода тепла.

В ответ на эти вызовы производители зарядных устройств обратили внимание на карбидокремниевые ключи (SiC), которые коммутируются гораздо быстрее, чем аналогичные кремниевые MOSFET или IGBT. Модули SiC имеют значительно меньшие динамические потери: это позволяет снизить габариты магнитных компонентов и, как следствие, повысить плотность мощности устройства. Применение карбидокремниевых ключей также во многом решает проблему отвода тепла благодаря их более высокой эффективности и расширенному температурному диапазону по сравнению с кремниевыми приборами, что сокращает размеры радиатора при одновременном снижении тепловой нагрузки на компоненты системы.

На сегодня только небольшое число изготовителей полупроводниковых приборов обладает техническими возможностями и производственными мощностями для серийных поставок SiC-транзисторов для зарядных устройств. Лидерами рынка являются Infineon, OnSemi и STMicroelectronics, и разработчики зарядных станций для EV обращаются к этим компаниям за предоставлением отладочных комплектов, с помощью которых они смогут оценить производительность SiC-ключей и их пригодность для решения своих задач.

Отладочные комплекты обеспечивают реализацию некоторых наиболее распространенных топологий двунаправленных быстрых зарядных устройств, содержащих каскады ККМ и DC/DC-конвертера. Понимание преимуществ и недостатков этих схем помогает разработчикам определить, какая из них наилучшим образом соответствует требованиям конкретной системы. Для начала рассмотрим выбор топологии активного выпрямителя ККМ (AFE PFC) зарядного устройства EV.

## Каскад AFE PFC зарядной станции постоянного тока

Входной AC/DC-каскад, как правило, преобразует трехфазное напряжение 380–415 В AC в стабилизированное DC-напряжение около 800 В. Все топологии схем, рассмотренные в настоящей статье, предназначены для двунаправленных систем, поэтому преобразование осуществляется и в обратном направлении — от DC- к AC-сигналу.

Карбидокремниевые приборы оптимальны для построения полумостовых двунаправленных преобразователей. Обычно такие схемы работают в режиме повторяющейся жесткой коммутации, причем длительное время обратного восстановления тельного кремниевого диода повышает рассеиваемую мощность и ухудшает эффективность преобразования. Это увеличивает тепловую нагрузку и снижает надежность системы. Таким образом, двунаправленный конвертер требует низкого или даже нулевого времени обратного восстановления, что можно отнести к особенностям SiC-MOSFET-транзисторов (рис. 1).

Для построения трехфазного активного выпрямителя ККМ двунаправленного зарядного устройства постоянного тока используются три топологии схем:

- двухуровневый инвертор;
- трехуровневый инвертор с фиксированной нейтралью (NPC)/активный NPC (ANPC);
- трехуровневый инвертор NPC Т-типа.

### Двухуровневая топология ККМ

Повышающий выпрямитель на основе двухуровневого трехфазного инвертора — это очень простая схема, управление которой не представляет сложности (рис. 2). Она обеспечивает двунаправленный поток энергии и позволяет достичь высокого коэффициента мощности при разумном КПД. По сравнению с 3L-топологией такая схема имеет меньшее количество компонентов, ее проще развести на печатной плате.

В то же время для реализации двухуровневого трехфазного инвертора требуется ключи с высокой блокирующей способностью. Например, при напряжении 800 В DC нужен SiC MOSFET с рабочим напряжением 1200 В. Дополнительным недостатком этой топологии является большая индуктивность фильтра, необходимого для снижения уровня гармонических искажений (THD) во входном токе. Трехуровневые (3L) топологии не требуют большой индуктивности фильтра, но обеспечивают меньшую плотность мощности.

Еще один важный фактор — высокое пиковое напряжение, сокращающее срок службы полупроводниковых приборов и пассивных компонентов. И наконец, характеристики ЕМI у двухуровневого преобразователя существенно хуже, чем у многоуровневых топологий ККМ, описанных далее.

### Трехуровневый ККМ NPC/ANPC

В трехуровневой схеме NPC/ANPC к каждому ключу прикладывается только половина напряжения DC-шины (рис. 3), поэтому можно использовать MOSFET-транзисторы с меньшим номинальным напряжением, уровень перенапряжения на них также значительно ниже. Данная топология легко масштабируется и реализуется с помощью SiC-, GaN- и Si-ключей в зависимости от требований по мощности, стоимости и эффективности.

При напряжении питания 800 В в трехуровневом инверторе могут использоваться MOSFET-транзисторы с рабочим напряжением 600 В. Такие ключи имеют меньший уровень динамических потерь по сравнению с 1200-В MOSFET и способны работать на более высоких частотах переключения.

Инвертор 3L NPC отличается малым уровнем пульсаций выходного тока, также у него на 50% меньше переходное напряжение на выходе. Это снижает требования к фильтрам и изоляции и позволяет использовать индуктор меньшего размера. Если для получения нужного значения THD выбирают меньшую индуктивность, то достигается более высо-

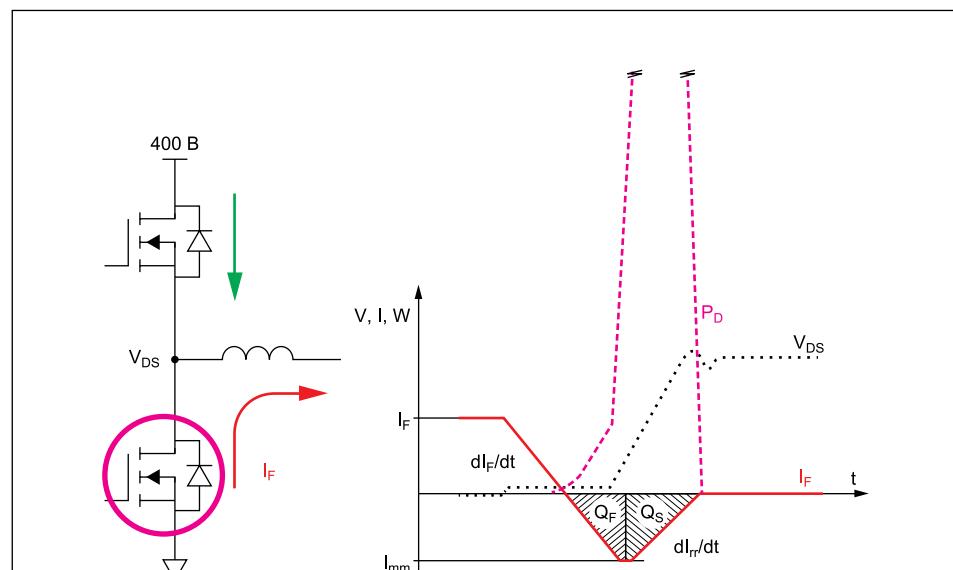


Рис. 1. Малое время обратного восстановления тельного диода очень важно в двунаправленных преобразователях с полумостовым каскадом, работающим в режиме жесткой коммутации

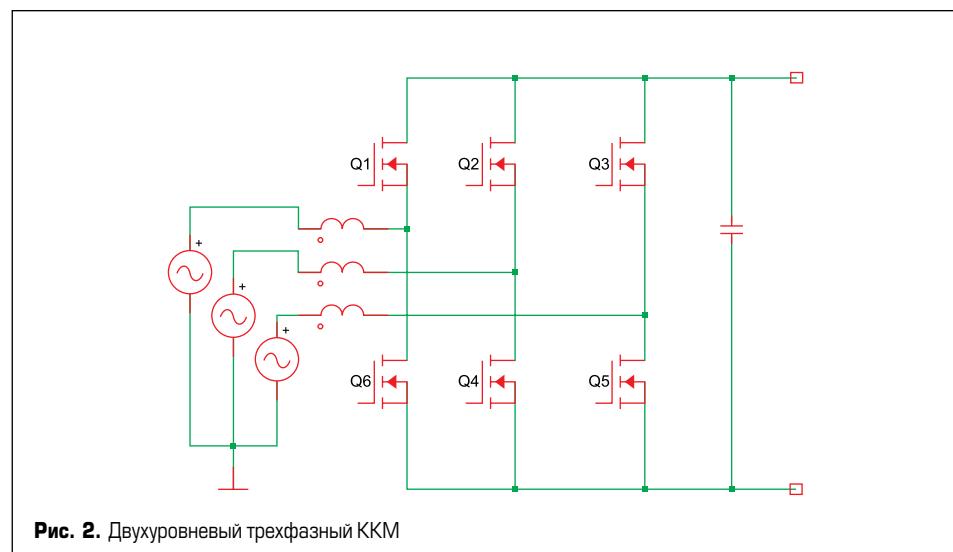


Рис. 2. Двухуровневый трехфазный ККМ

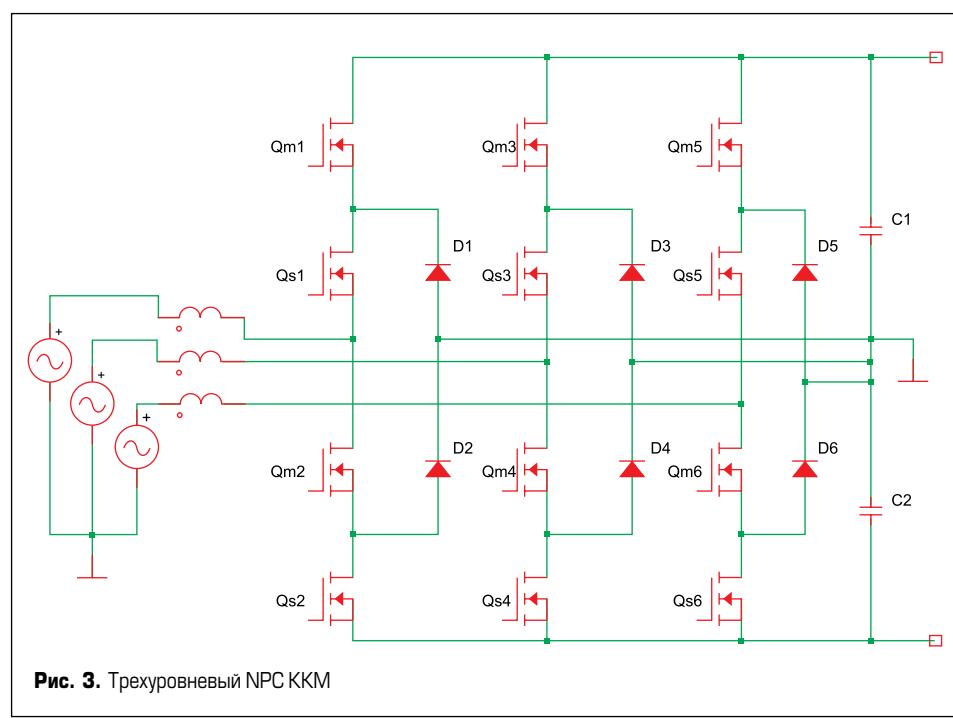


Рис. 3. Трехуровневый NPC ККМ

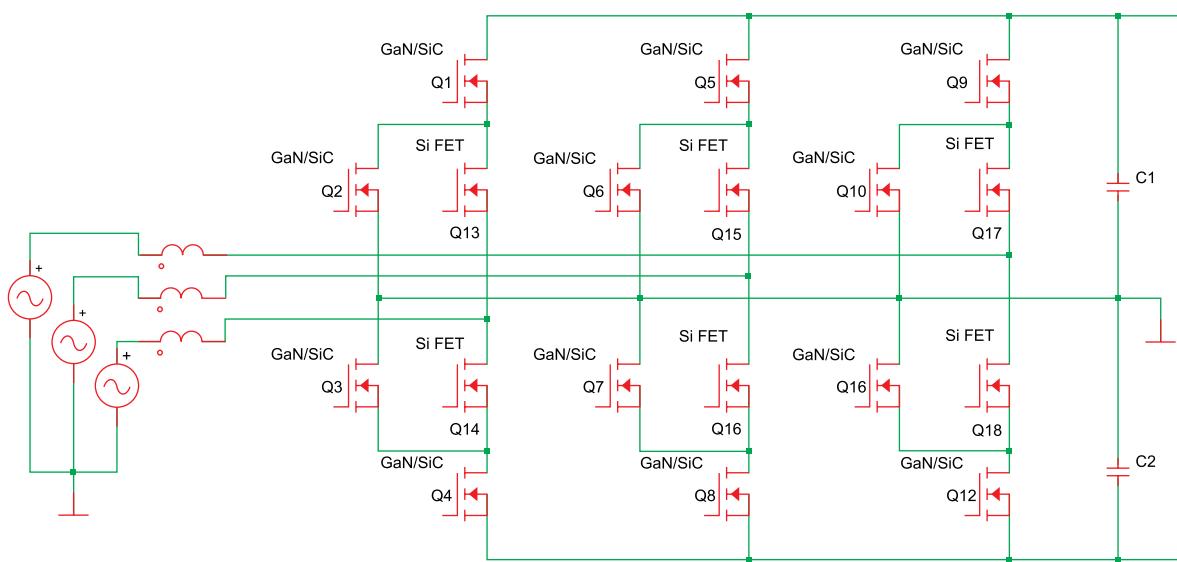


Рис. 4. Трехуровневый ANPC KKM

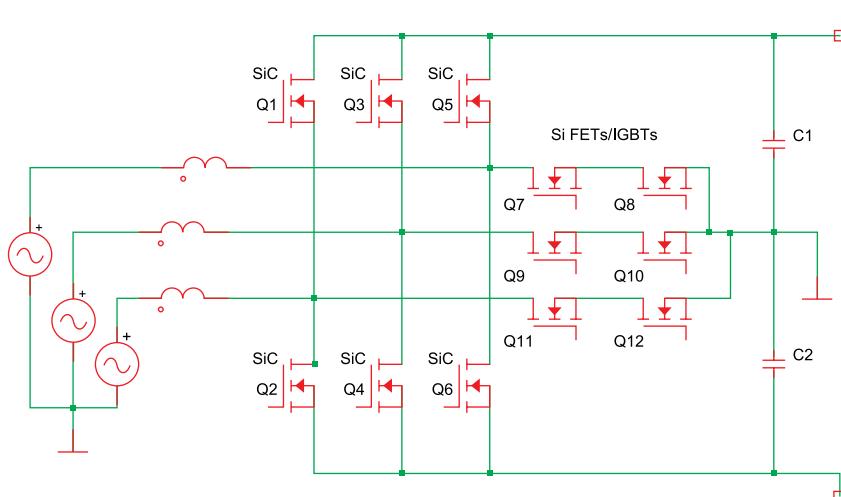


Рис. 5. Трехуровневый NPC KKM Т-типа

кая плотность мощности изделия. Благодаря ступенчатой форме выходного напряжения многоуровневого преобразователя минимизируется воздействие  $dv/dt$ -фронтов на полупроводниковые приборы и улучшаются характеристики ЕМI.

В отличие от двухуровневого ККМ, топология NPC имеет меньшие динамические потери и более высокую эффективность на частотах выше 50 кГц. Однако для ее реализации требуется больше транзисторов, и каждый ключ должен иметь отдельный драйвер, соответственно, 3L NPC-инвертор сложнее и дороже.

Кроме того, в данной топологии активными ключами являются как транзисторы, так и диоды, и возникающее в результате несимметричное распределение потерь в силовом каскаде затрудняет отвод тепла. Некоторые разработчики предпочитают использовать схему с более симметричным распределением потерь, для этого диоды в схеме NPC заменяются транзисторами, что формирует преобразователь ANPC (рис. 4).

В обеих топологиях (NPC и ANPC) MOSFET работают при пониженном напряжении, что позволяет применять высокоеэффективные арсенид-галлиевые (GaN) приборы для повышения эффективности и плотности мощности.

### Трехуровневый ККМ NPC Т-типа

В трехуровневых преобразователях ККМ NPC Т-типа обычная двухуровневая топология конвертера напряжения (VSC) дополнена активным двунаправленным ключом, соединенным со средней точкой DC-шины (рис. 5). При напряжении  $V_{DC} = 800$  В IGBT/FWD 1200 В обычно работают в верхнем и нижнем плече каждой фазы. В конфигурации NPC Т-типа двунаправленный ключ, соединенный со средней точкой, должен блокировать только половину напряжения. Это означает, что его функцию могут выполнять низковольтные приборы — например, два IGBT с антипараллельными диодами на 600 В.

Благодаря этому «средний» ключ генерирует очень низкие потери переключения и приемлемые потери проводимости. В отличие от 3L NPC, в топологии NPC Т-типа нет последовательно соединенных приборов, которые должны блокировать полное напряжение DC-шины.

В схеме NPC обычно исключаются коммутационные процессы, генерируемые при переходе с положительного на отрицательное DC-напряжение и наоборот, поскольку они могут привести к неравномерному распределению сигнала при одновременном отключении обоих последовательно соединенных транзисторов. Подобный нежелательный эффект отсутствует в топологии Т-типа, поэтому здесь нет необходимости соблюдать определенную последовательность коммутации, предотвращающую такие процессы, или обеспечивать балансировку переходного напряжения на последовательно соединенных IGBT.

Дополнительным преимуществом использования одиночных 1200-В приборов для блокировки полного напряжения DC-шины является снижение потерь проводимости. Всякий раз, когда выход подключен к положительному или отрицательному сигналу, прямое падение напряжения наблюдается только на одном ключе; а в схеме NPC два прибора подсоединены последовательно. Это существенно снижает статические потери, что делает топологию Т-типа более эффективной в низкочастотных приложениях.

В целом, потери проводимости здесь значительно меньше, чем в топологии NPC, однако динамические потери достаточно высоки из-за приборов, блокирующих полное напряжение DC-шины. Таким образом, конвертер NPC Т-типа предпочтителен для преобразователей с частотой до 50 кГц, в то время как схема NPC лучше работает на частотах свыше 50 кГц.

В таблице 1 дано сравнение на системном уровне преимуществ и недостатков трех топологий каскадов ККМ, описанных выше.

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики топологий ККМ

	2L ККМ	3L NPC ККМ	3L ANPC ККМ	3L NPC-T ККМ
Плотность мощности	Низкая	Выше	Выше	Максимальная
Эффективность	Низкая	Очень большая на высоких частотах	Максимальная	Высокая
Потери проводимости	Низкие	Высокие	Высокие	Средние
Потери переключения	Высокие	Низкие	Низкие	Средние
Пик перенапряжения	Высокий	Низкий	Минимальный	Низкий (большая блокирующая способность)
Стоимость	Низкая	Высокая	Максимальная	Средняя
Сложность управления	Низкая	Средняя	Средняя	Средняя
Входной индуктор	Большой	Маленький	Маленький	Маленький
Кол-во активных ключей	6	12	18	12
Кол-во SiC-диодов	0	6	0	0

### DC/DC-конвертер зарядного устройства

Каскад DC/DC-конвертора с гальванической развязкой преобразует входное напряжение 800 В (DC) в регулируемое выходное напряжение постоянного тока для зарядки аккумулятора электромобиля (минуя бортовое зарядное устройство автомобиля, используемое только при подключении к АС-цепи).

Двунаправленный DC/DC-конвертер может быть реализован по одной из двух схем:

- двойной активный мост;
- двойной активный мост в режиме CLLC.

### Топология «двойной активный мост»

Двойной активный мостовой преобразователь (DAB) состоит из двух однофазных Н-мостов с активными ключами как в первичном, так и во вторичном каскаде, соединенных через высокочастотный трансформатор (рис. 6). Из-за естественного запаздывания тока в одном из мостов ток разряжает выходную емкость ключей только одного моста за один рабочий цикл. Когда емкости приборов во вторичном каскаде разряжены, в первичном каскаде некоторые из них обеспечивают коммутацию с нулевым напряжением (режим ZVS). Нерассеивающие емкостные снаббера могут использоваться для уменьшения потерь при отключении.

Основные преимущества данной топологии:

- способность к двунаправленной передаче энергии, которая достигается за счет регулирования фазового угла между двумя Н-мостами;
- модульность, позволяющая масштабировать устройство для увеличения мощности.

При использовании метода модуляции с однофазным сдвигом топология DAB оказывается очень простой в управлении. Однако при расширенной модуляции с двойным или тройным фазовым сдвигом устройство управления становится гораздо сложнее. Такая схема с однофазной модуляцией сдвига может применяться для покрытия широкого диапазона напряжений аккумулятора, но циркулирующие в трансформаторе токи при этом достаточно велики, что значительно снижает КПД.

С применением усовершенствованных схем, таких как модуляция с трехфазным сдвигом,

преобразователь теоретически может реализовать режим коммутации с нулевым напряжением (ZVS) во всем рабочем диапазоне. В этой топологии наблюдается большое соотношение выходной мощности устройства к номинальной мощности трансформатора в кВ·А. Выходная емкость, необходимая для подавления пульсирующих токов, оказывается достаточно малой.

В целом, такой конвертер оптимален для систем, в которых плотность мощности, стоимость, вес, а также требования к изоляции и надежности являются критическими факторами, благодаря целому ряду особенностей:

- относительно небольшое количество компонентов;
- мягкий режим коммутации;

- низкая стоимость;
- высокая эффективность.

Следует отметить, что преобразователю DAB часто требуется дополнительный индуктор для поддержания режима коммутации ZVS: это увеличивает габариты и снижает плотность мощности устройства.

### Топология DAB в режиме CLLC

Дополнительное преимущество режима CLLC в отличие от классического LLC состоит в том, что использование активных ключей во вторичном каскаде реализует двунаправленную передачу энергии (рис. 7). Такой конвертер может работать в режиме коммутации с нулевым напряжением (ZVS) и нулевым током (ZCS), обеспечивая высокую эффективность, которая сохраняется в широком диапазоне изменения напряжения аккумулятора. Однако при фиксированном значении  $V_{DC}$  эта топология имеет очень ограниченные возможности.

Наличие конденсаторов как в первичном, так и во вторичном каскаде исключает риск насыщения сердечника трансформатора. Преобразователь DAB в режиме CLLC на самом деле лучше всего подходит для построения бортовых AC/DC зарядных устройств. Его можно применять при обычных мощностях встроенных зарядников (до 15 кВт), однако масштабирование до более высоких уровней мощности за счет параллельного соединения

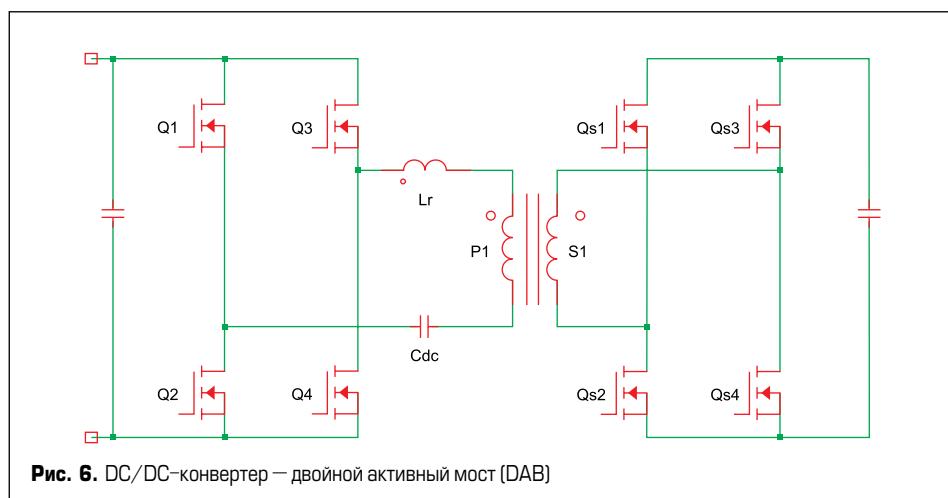


Рис. 6. DC/DC-конвертер — двойной активный мост (DAB)

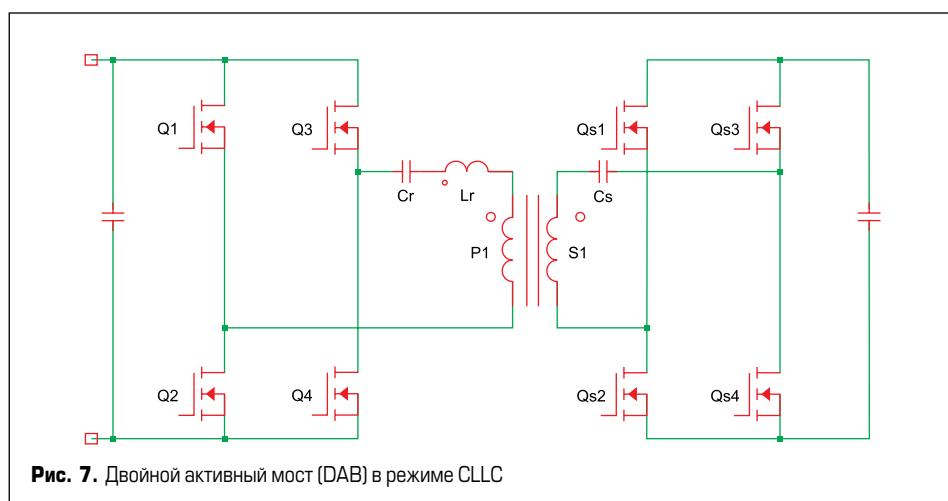
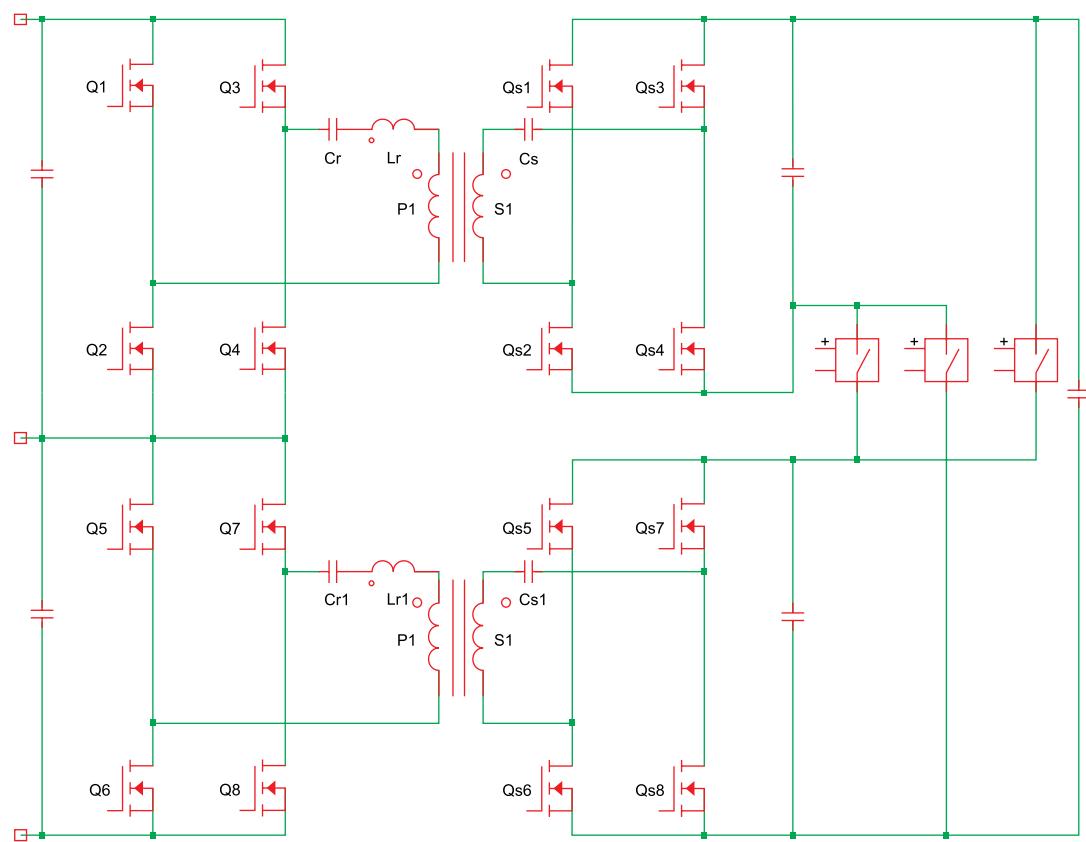
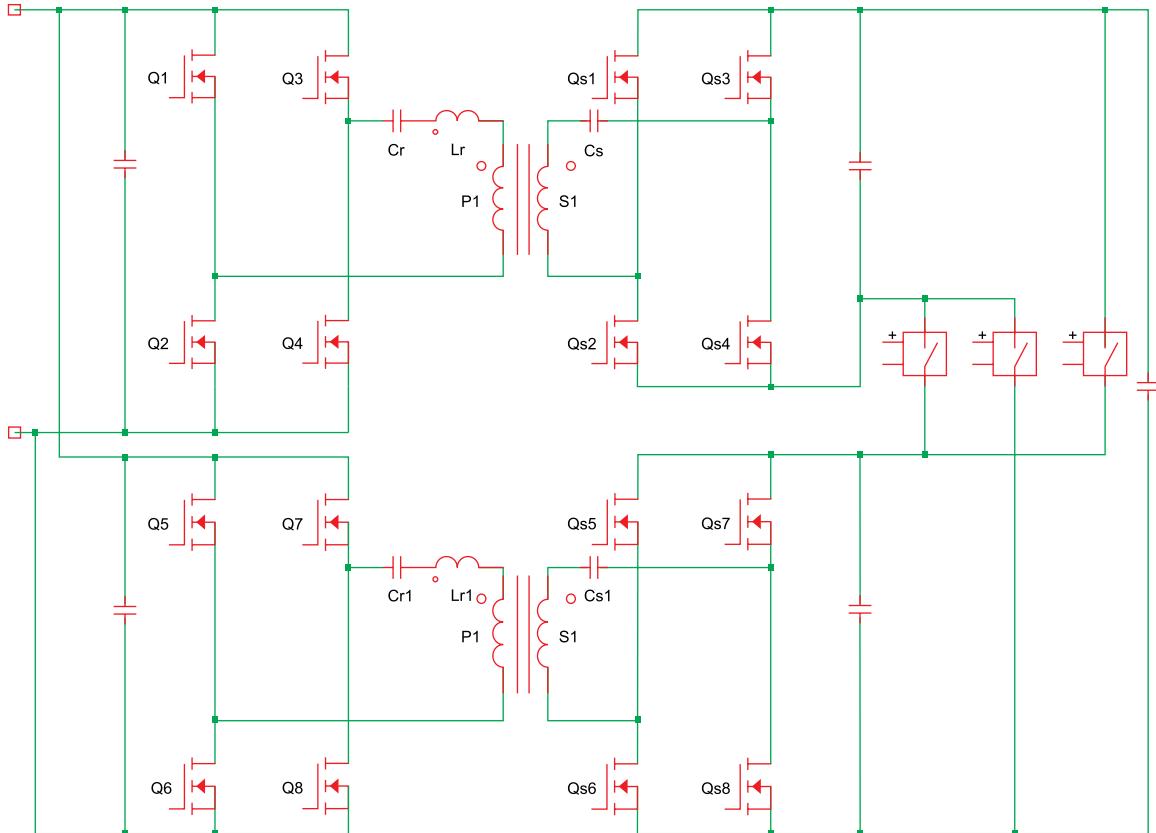


Рис. 7. Двойной активный мост (DAB) в режиме CLLC



**Рис. 8.** Двойной активный мост (DAB) в режиме CLLC с последовательным входом



**Рис. 9.** Двойной активный мост (DAB) в режиме CLLC с параллельным входом

**Таблица 2.** Основные характеристики двух топологий DC/DC-конвертеров

	DAB	DAB в режиме CLLC
Пиковый уровень перенапряжения	Низкий	Высокий
Частота коммутации	Высокая	Очень высокая
Управление	ШИМ (простое)	Частотное (средняя сложность)
Широкий диапазон напряжений батареи, фиксированное напряжение DC-шины	Да (с пониженной эффективностью)	Ограниченный диапазон
Входной RMS-ток	Низкий	Высокий
Потери проводимости	Низкие	Средние
Потери включения	ZVS	ZVS
Потери выключения	Высокие (прибор выключается при пиковом токе индуктора)	Низкие (выключение входного каскада определяется током намагничивания индуктора, выключение выходного каскада в режиме ZCS)
Общие потери	Средние	Низкие
КПД	Высокий	Очень высокий
Параллельное соединение модулей	Простое	Сложное
Количество активных ключей	8	8

представляет известную сложность, поскольку для этого требуется очень симметричная конструкция батареи и точная синхронизация параллельных блоков.

Топологии DAB и DAB CLLC обычно используются в изолированных DC/DC-преобразователях с напряжением 800 В. Коэффициент преобразования напряжения контролируется подключением терминалов конвертера, что влияет на выбор номинального напряжения ключей: высоковольтный преобразователь может быть подключен последовательно или параллельно к одному терминалу, в то время как другой остается подсоединененным параллельно. То есть существует четыре возможные конфигурации соединений данной схемы.

Два примера топологии DAB в режиме CLLC показаны на рис. 8 (конфигурация с последовательным входом) и рис. 9 (конфигурация с параллельным входом). Устройство с напряжением питания 800 В имеет широкий диапазон изменения выходного напряжения: 200 В – 1 кВ.

Преимуществом схемы DAB CLLC с последовательным входом является узкий диапазон резонансных частот при широком диапазоне выходных напряжений. Таким образом, можно снизить потери пере-

ключения и использовать силовые ключи на 650 В. Но здесь требуется более сложное управление напряжением конденсатора, включенного последовательного с DC-шиной. Кроме того, для достижения нужной эффективности понадобятся приборы с меньшим сопротивлением открытого канала, чем в одиночном Н-мосте, использующем ключи на 1200 В.

Преимущество конвертера DAB CLLC с параллельным входом состоит в том, что при заданной эффективности в схеме могут использоваться приборы с более высоким сопротивлением канала, при этом схема управления у него проще. Для поддержания широкого диапазона выходных напряжений требуется широкий диапазон резонансных частот.

Основные преимущества и недостатки двух топологий DC/DC-конвертеров приведены в таблице 2.

### Отладочные комплекты ускоряют внедрение новых систем зарядных устройств постоянного тока

Ведущие производители SiC MOSFET предоставляют отладочные комплекты, которые частично или полностью служат основой для разработки мощных зарядных станций постоянного тока. В двунаправленном каскаде KKM STMicroelectronics STDES-PFCBIDIR мощностью 15 кВт реализована топология NPC T-типа (рис. 10). Устройство с цифровым управлением преобразует напряжение 400 В AC или 800 В DC с эффективностью до 99%. Пассивные компоненты преобразователя оптимизированы по габаритам и стоимости, что обеспечивает высокую плотность мощности и хорошие экономические показатели.



**Рис. 11.** Отладочный комплект DC/DC-конвертера STDES-PFCBIDIR мощностью 25 кВт



**Рис. 10.** Отладочный комплект каскада KKM STDES-PFCBIDIR разработан для обеспечения высокой эффективности и плотности мощности



**Рис. 12.** Отладочный комплект REF-DAB11KIZSICSY с выходной мощностью 11 кВт

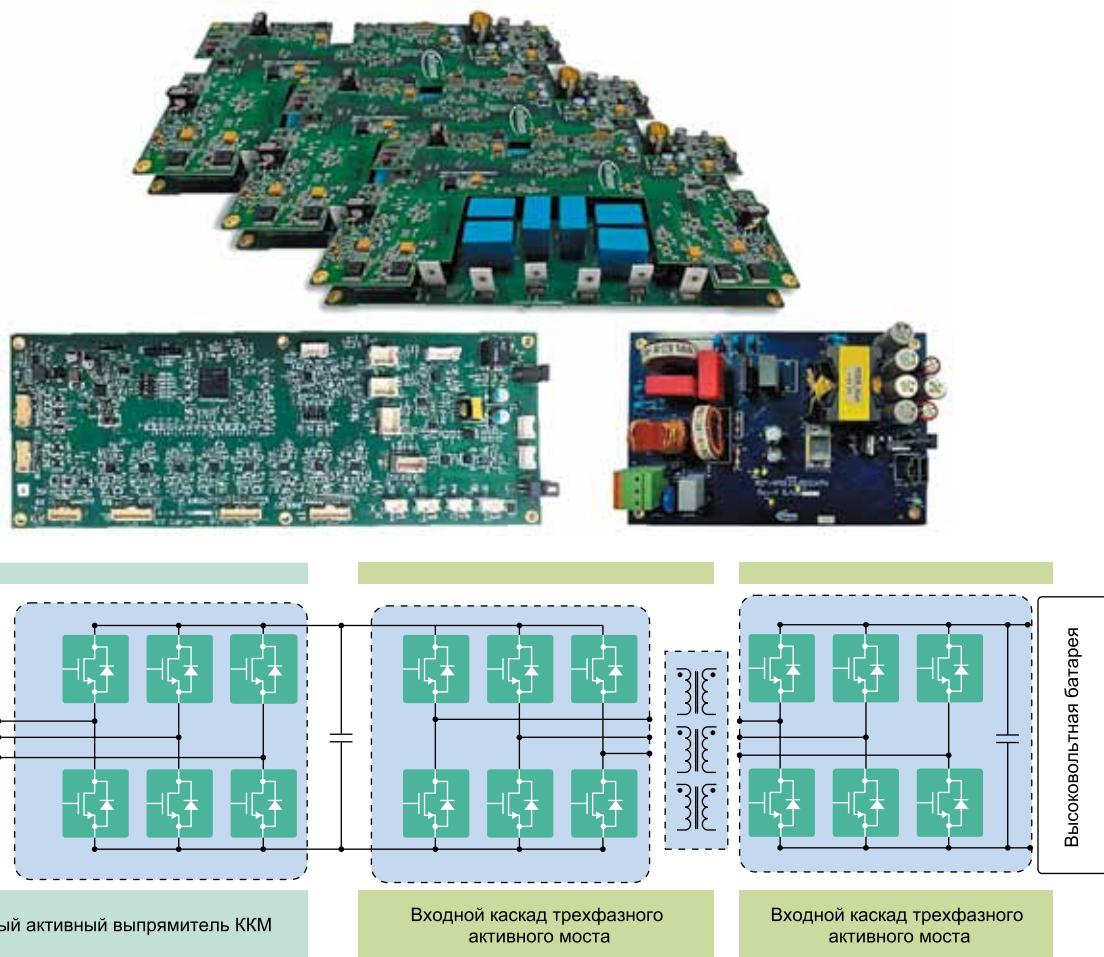


Рис. 13. Отладочный комплект REF-EV50KW2SICKIT реализует полную схему быстрого DC/DC зарядного устройства

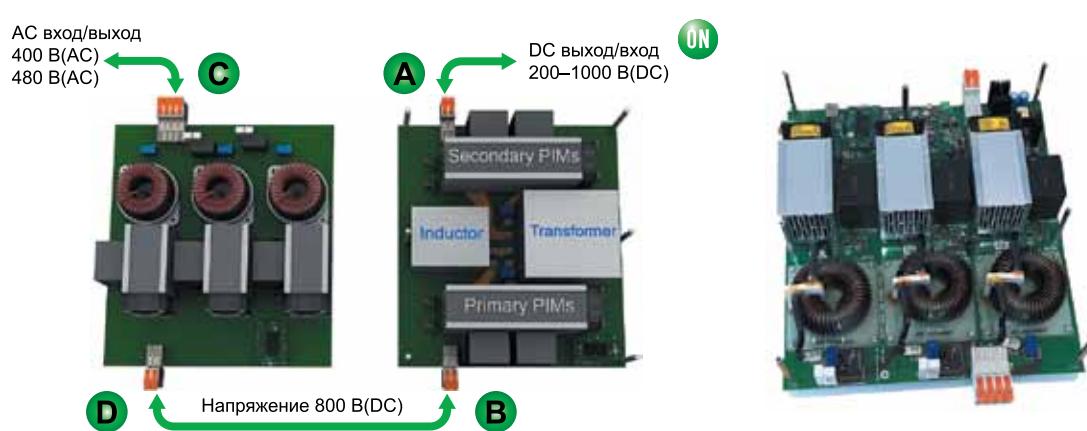


Рис. 14. Отладочный комплект SEC-25KW-SiC-PIM-GEVK ONSEMI – DC/DC зарядное устройство мощностью 25 кВт

Совместное применение каскадов KKM и DC/DC (STDES-PFCBIDIR и STDES-DABBIDIR) мощностью 25 кВт обеспечивает комплексное решение для двунаправленного зарядного устройства EV. В схеме STDES-PFCBIDIR реализована топология конвертора DAB, созданного с применением SiC MOSFET в корпусе ICE PACK 2 (рис. 11), работающего на частоте 100 кГц. Цифровое управление осуществляется с помощью микроконтроллера STM32G474RE. Управление плавным переключением выполняется методом аддитивной модуляции, учитывающим изменения нагрузки и напряжения.

Комплект Infineon REF-DAB11K1ZSICSYS представляет собой двунаправленный DC/DC-конвертер, выполненный по схеме DAB в режиме CLLC (рис. 12). Он обеспечивает мощность до 11 кВт при входном

напряжении 800 В, КПД составляет более 97%. Устройство, созданное с применением транзисторов CoolSiC MOSFET IMZ120R030M1H, управляемых драйвером 1EDC20I12AH, отличается высокой плотностью мощности и надежностью.

Законченный прототип зарядного устройства постоянного тока REF-EV50KW2SICKIT разработан компанией Infineon в 2023 году. Устройство мощностью 50 кВт предназначено для использования в качестве единичного блока в многоуровневых зарядных станциях (рис. 13). Преобразователь обеспечивает коэффициент мощности более 0,95 и КПД до 96%. Размер печатных плат позволяет устанавливать их в 19" стойку 4U. Также доступна плата управления и программное обеспечение с графическим интерфейсом (GUI).

Еще одно аналогичное изделие разработано компанией ONSEMI — SEC-25KW-SIC-PIM-GEVK представляет собой зарядный блок мощностью 25 кВт, в котором реализованы двухуровневые топологии ККМ и DAB (рис. 14).

Комплект SEC-25KW-SIC-PIM-GEVK включает несколько полумостовых SiC-модулей NXH010P120MNF1 с номинальным напряжением 1200 В. Они отличаются очень низким сопротивлением открытого канала (10 мОм) и малой паразитной индуктивностью, что существенно снижает статические и динамические потери. Для управления устройством предусмотрена универсальная плата контроллера на базе ПЛИС Zynq-7000 SoC. Диапазон выходных напряжений составляет 200–1000 В, КПД достигает 96%. Платы SEC-25 кВт-SIC-PIM-GEVK

могут соединяться параллельно для наращивания выходной мощности в зависимости от требований к системе.

### Заключение

Правильный выбор топологий каскадов ККМ и DC/DC-конвертеров в двунаправленных быстрых зарядных станциях позволяет оптимизировать габариты, стоимость, эффективность, выходную мощность, количество компонентов и простоту управления. Наличие высокопроизводительных отладочных комплектов от ведущих производителей SiC-приборов дает разработчикам ощутимое преимущество в реализации подобных устройств.

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

## 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/>



Акционерное общество  
«Завод «Комета»

173003, Россия, г. Великий Новгород, ул. Великая, 20  
+7 (8162) 335 390, 225 482, 334 938  
[market@kometta53.ru](mailto:market@kometta53.ru)  
[www.kometta53.ru](http://www.kometta53.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



• 22  
31  
десятилетие  
науки и технологий

23–26 апреля 2024

# СВЯЗЬ

36-я международная  
выставка «Информационные  
и коммуникационные технологии»



Экспозиция «Навитех» —  
«Навигационные системы, технологии и услуги»



[www.sviaz-expo.ru](http://www.sviaz-expo.ru)



Россия, Москва,  
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



12+  
Реклама



# EXPO ELECTRONICA

26-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

16–18 АПРЕЛЯ 2024  
МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО



ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ,  
МОДУЛИ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ



ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ  
И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЭЛЕКТРОНИКИ



ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ

NEW



РОБОТОТЕХНИКА

NEW



ИТ- И ЦИФРОВЫЕ  
РЕШЕНИЯ

ЗАБРОНИРУЙТЕ  
СТЕНД  
[EXPOELECTRONICA.RU](http://EXPOELECTRONICA.RU)



Организатор  
Organiser

# СИЛОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ

для вашей электронной продукции

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



Энергосберегающие технологии внедряются во все сферы нашей жизни, они нужны в промышленности, энергетике, транспорте.

Развитие этих технологий невозможно без использования силовой электроники, «рабочей лошадкой» которой являются IGBT, и их применение чрезвычайно обширно.

Компания ЮниРЭК осуществляет прямые поставки модулей IGBT производителей Xiner, SilverMicro, SPS, Leapers, JeanSemi, Fusemi, StarPower, драйверов Firstack, Novovsense, диодно-тиристорных модулей Zenli, TechSem.



ЮниРЭК

+7 (383) 205-24-96  
info@unirec.ru

unirec.ru

реклама