

СИЛОВАЯ  
ЭЛЕМЕНТНАЯ  
БАЗА

ПРИВОДЫ

ИСТОЧНИКИ  
ПИТАНИЯ

СИСТЕМЫ  
ИНДУКЦИОННОГО  
НАГРЕВА

АВТОМОБИЛЬНАЯ  
ЭЛЕКТРОНИКА

СОФТ

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

**WWW.POWER-E.RU**

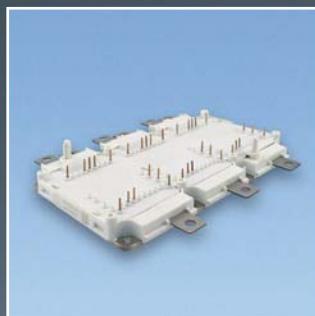
№ 1'2024  
МАРТ

# СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

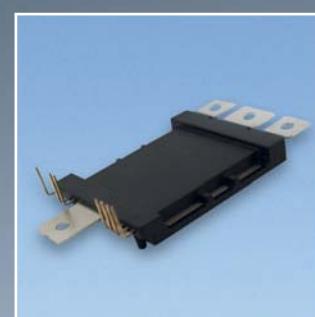
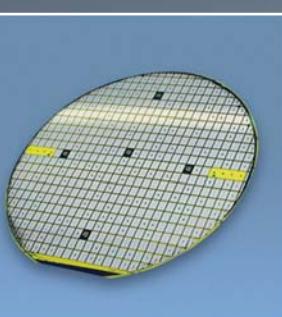
ISSN 2079-9322



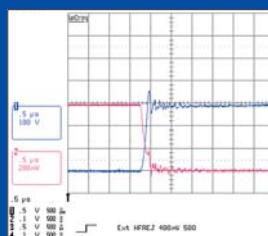
**SiC MOSFET**



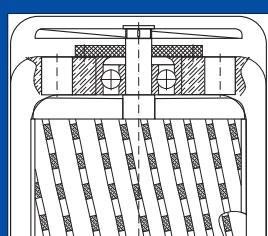
**IGBT**



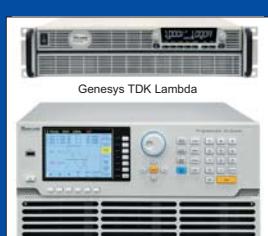
Высоковольтные  
твердотельные коммутирующие  
устройства  
**ООО «ПАРАМЕРУС»**



Гибридные IGBT-модули  
**ПАО «Электропривод»**



Области применения  
магнитного  
электродвигателя-генератора



Реальные возможности  
импортозамещения  
средств силовой электроники



**МАКРО  
ГРУПП**

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

[power@macrogroup.ru](mailto:power@macrogroup.ru)

# 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



реклама

 ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС

+7 (4862) 44-04-79

[www.proton-electrotex.com](http://www.proton-electrotex.com)

 EXPO  
ELECTRONICA

16-18 апреля 2024 Москва, МВЦ "Крокус Экспо"

Павильон № 3, зал № 12, стенд № 4031



# RUELECTRONICS

## ОПТОВЫЙ ПОСТАВЩИК ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Более 30 000 наименований продукции от 30 мировых брендов в наличии  
на наших складах в Москве и Московской области общей площадью 3 000 м<sup>2</sup>

### ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ

- Акустические компоненты
- Антенны
- Вентиляторы
- Датчики
- Диоды
- Дисплеи
- Измерительные приборы
- Инструмент
- Источники питания
- Кабельная продукция
- Кабельные аксессуары
- Клеммники
- Клеммы
- Коммутация
- Конденсаторы
- Крепеж
- Микросхемы
- Оптоэлектронные приборы
- Освещение и индикация
- Разъёмы
- Расходные материалы
- Резисторы
- Резонаторы и фильтры
- Реле
- Складское оборудование
- Счётчики
- Тиристоры
- Транзисторы
- Трансформаторы и дроссели
- Упаковочные материалы
- Установочные изделия
- Устройства защиты
- Ферритовые изделия и магниты
- Щитовые приборы
- Электродвигатели
- Электронные устройства

📞 8 (495) 133-10-18  
📞 8 (800) 302-54-85  
✉ info@ruelectronics.com  
🌐 www.ruelectronics.com



**Главный редактор**

Павел Правосудов pavel@fsmedia.ru

**Зам. главного редактора**

Анна Соснина a.sosnina@mtu-net.ru

**Выпускающий редактор**

Наталья Новикова natalia.novikova@fsmedia.ru

**Технический консультант**

Андрей Колпаков

**Дизайн и верстка**

Дмитрий Никаноров dmitry.nikanorov@fsmedia.ru

**Отдел рекламы**

Ольга Зайцева olga\_z@fsmedia.ru

**Отдел подписки**

podpiska@fsmedia.ru

**Москва**

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

**Санкт-Петербург**

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

**Республика Беларусь**

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

**Подписной индекс**

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

Дата выхода в свет 29.03.24  
Тираж 4000 экз.  
Свободная цена

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

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

Учредитель: ООО «Медиа КиТ»

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

Отпечатано в типографии «МАЙЕР»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Троицкий, д. 6

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

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

# В номере:

## Силовая элементная база

**Екатерина Криволапова, Дарья Киян**

Реле защиты электроустановок от АО «НИИПП» ..... 6

**Виктор Зыков, Андрей Руцкой, Михаил Моисеев**

Высоковольтные твердотельные коммутирующие устройства  
ООО «ПАРАМЕРУС» ..... 8

**Андрей Селеменев**

Компактные трехфазные диодные модули серии ДМ  
на токи 10–100 А напряжением до 2000 В ..... 14

**Александр Жеухин**

Карбид-кремниевые МОП-транзисторы  
от AMG Power ..... 16

**Андрей Колпаков**

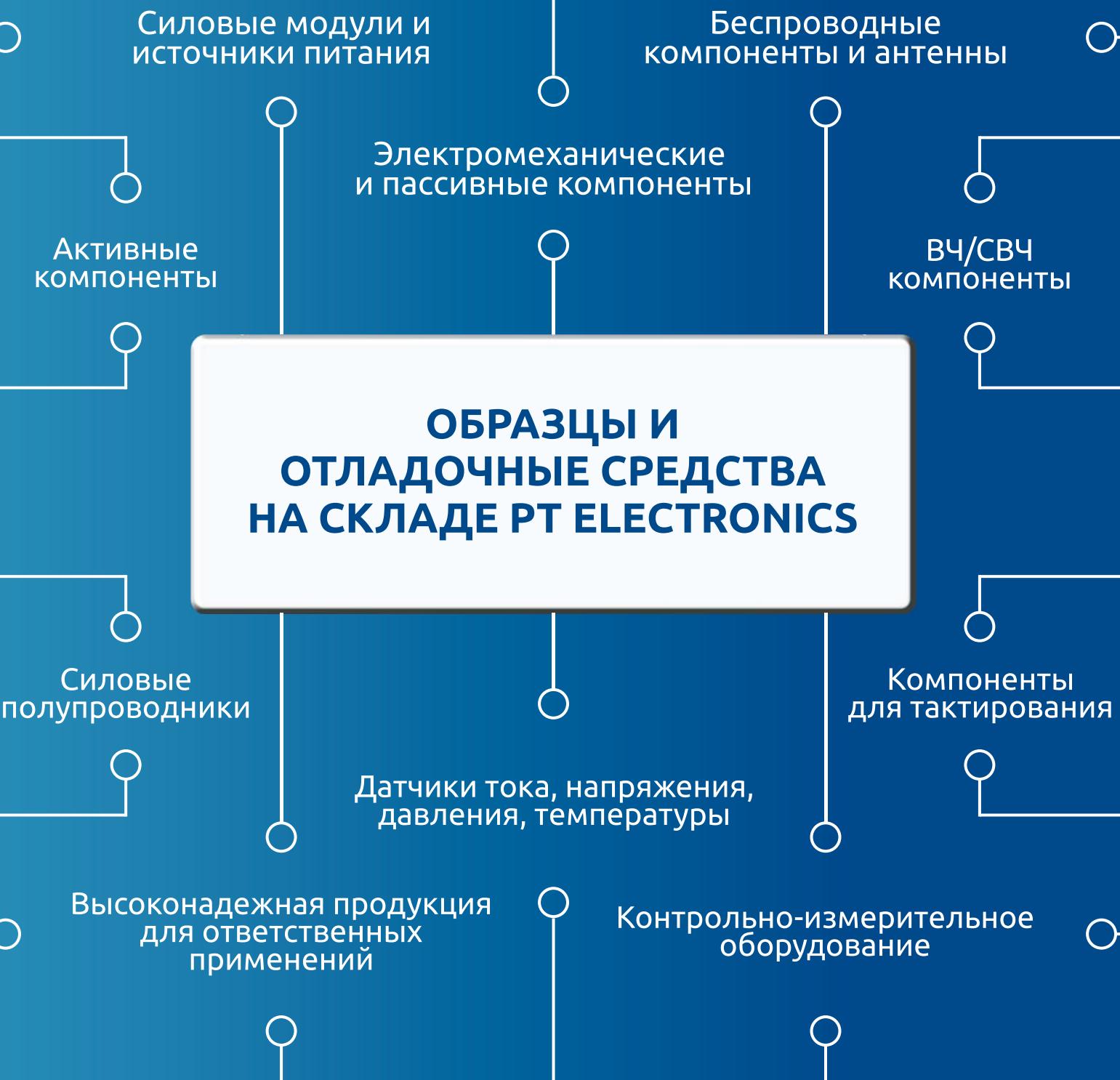
Российская силовая электроника:  
разворот на Восток и «доступная функциональность».  
Часть 6. Firstack Technology, продолжение ..... 18

**Алексис Брайсон, Музaffer Албайрак**

**Перевод: Евгений Карташев**

Технология карбида кремния для рынка  
электронной мобильности.  
Обеспечение электронной мобильности в небе,  
на суше, воде и железной дороге ..... 22

## ОБРАЗЦЫ И ОТЛАДОЧНЫЕ СРЕДСТВА НА СКЛАДЕ PT ELECTRONICS



КАТАЛОГ АНАЛОГОВ  
КОМПОНЕНТОВ КИТАЙСКИХ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

ПОДБОР  
КОМПЛЕКТУЮЩИХ,  
ОПТИМИЗАЦИЯ,  
УНИФИКАЦИЯ БАЗЫ

ПОСТАВКА  
ОБРАЗЦОВ И  
ОТЛАДОЧНЫХ СРЕДСТВ

ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ПОДДЕРЖКА  
НА ВСЕХ  
ЭТАПАХ ПРОЕКТА

8 800 333 63 50

**pt** ELECTRONICS  
Innovations & Technologies

реклама

[ptelectronics.ru](http://ptelectronics.ru)  
[semicond@ptelectronics.ru](mailto:semicond@ptelectronics.ru)

Editor-in-chief

Pavel Pravosudov pavel@fsmedia.ru

Managing editor

Natalia Novikova natalia.novikova@fsmedia.ru

Technical editor

Andrey Kolpakov

Design and layout

Dmitry Nikanorov dmitry.nikanorov@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

Representative office in Belarus

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

**Михаил Пушкирев**

Датчики тока от Rongtech ..... 28

**Вячеслав Мускатиньев, Михаил Тогаев**

Гибридные IGBT-модули  
ПАО «Электровыпрямитель» ..... 34

## Приводы

**Юрий Таланин**

Области применения  
магнитного электродвигателя-генератора ..... 37

**Ананд Джха,  
Перевод: Иван Сергеев**

Развитие приводов высокой мощности:  
выбор между концепциями VSI и LCI ..... 40

## Источники питания

**Тигран Гайказян**

Источники питания SmartPower нового поколения.  
Максимальная эффективность и компактность ..... 44

**Алексей Воронцов, Юрий Либенко, Андрей Четин**

Реальные возможности импортозамещения  
средств силовой электроники ..... 47

## Химические источники тока

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

Руководство по быстрой зарядке аккумуляторных батарей.  
Часть 2 ..... 52

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ФИЛЬТРЫ  
ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Соответствие  
характеристикам  
высоконадёжных  
источников питания Vicor, SynQor  
и радиационно-стойких  
источников питания VPT

Диапазоны входных напряжений

2:1 и 4:1

Диапазон выходных напряжений

3.3 В – 48 В

Мощность нагрузки

до 2000 Вт

КПД

до 96%



ПРОМТЕХ  
КОМПЛЕКТ

Представитель компании Smartpower

в Российской Федерации

АО «ПРОМТЕХКОМПЛЕКТ»

143441, Россия, Моск. обл.,

г.о. Красногорск, д. Путилково,

69 км МКАД, Бизнес-парк «Гринвуд», стр. 9

тел.: +7 (495) 721-85-00;

факс: +7 (495) 721-86-00

smartpower@ptkgroup.ru

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



# Реле защиты электроустановок

от АО «НИИПП»

**В статье представлены электронные микропроцессорные реле защиты трехфазных электроустановок — РКЗ, РКЗМ, РКДМ, РКД, которые выпускает АО «НИИПП».**

**Екатерина Криволапова**

krivolapova\_ea@niipp.ru

**Дарья Киян**

kian\_da@niipp.ru

**АО «НИИПП»**

АО «НИИПП» — одно из ведущих предприятий Госкорпорации «Ростех». На его производственных площадках используется современное оборудование. Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов основан в Томске в 1964 году, а в 1967 году на его базе заработал завод по серийному выпуску полупроводниковых приборов. Созданный как научный институт, НИИПП и в настоящее время работает с ведущими вузами Томска. В институте наложен полный цикл, начиная с разработки и заканчивая выпуском готовых изделий. Предприятие изготавливает продукцию для ВПК и радиоэлектронную продукцию гражданского назначения.

Реле от АО «НИИПП» устанавливаются в цепи питания трехфазных электроустановок (электродвигателей, трансформаторов и других агрегатов) для повышения их надежности и увеличения срока

службы. Предприятие имеет почти 25-летний опыт изготовления и поставок устройств релейной защиты. Отработанная конструкция и наложенное производство обеспечивают надежность в эксплуатации и невысокую цену.

Отключение электроустановки возможно в следующих аварийных ситуациях:

- перегрузка по току недопустимой продолжительности;
- недогрузка по току;
- недопустимый перекос фаз по току;
- обрыв любой фазы;
- короткое замыкание (реализовано в РКДМ и РКД);
- превышение напряжением заданного значения (реализовано в РКД);
- снижение напряжения меньше заданного значения (реализовано в РКД);
- появление сигнала («сухой контакт») на одном из двух дискретных входов (реализовано в РКД).

АО «НИИПП» выпускает реле четырех типов, основные отличия которых рассматриваются далее.



Рис. 1. РКЗ-250 с пультом

## Реле контроля и защиты (РКЗ)

Это базовая модель, наиболее востребованная, благодаря малым габаритам имеет невысокую цену. Поскольку РКЗ не обладает клавиатурой и дисплеем, программирование уставок и просмотр данных выполняются с помощью внешнего пульта управления. Один пульт может работать с любым количеством реле. У РКЗ предусмотрено крепление на винтовые соединения или DIN-рейку (рис. 1). Питание реле: ~220 В, 50 Гц.

Контролируемые токи:

- РКЗ-5: 0,4–5 А;
- РКЗ-25: 2–25 А;
- РКЗ-50: 5–50 А;
- РКЗ-250: 20–250 А;
- РКЗ-500: 40–500 А.

Технические характеристики и полное описание устройства представлены на сайте [1].

## Реле контроля и защиты (РКЗМ)

Это модернизированный вариант РКЗ, обладающий таким преимуществом, как наличие встро-



Рис. 2. Реле контроля и защиты



**Рис. 3.** Реле контроля, диагностики и защиты с пультом



**Рис. 4.** РКД и РКДМ

енной индикации причины аварийного отключения на панели реле. Устройство крепится на винтовые соединения и DIN-рейку. Настройка реле и считывание параметров осуществляются с помощью внешнего пульта управления (рис. 2).

Реле выпускается в следующих исполнениях:

- базовое (технические характеристики сходны с РКЗ);
- базовое + электронный ключ для управления внешним устройством аварийной сигнализации. Питание реле: ~180–420 В, 50 Гц;
- базовое + приемопередатчик интерфейса RS-232 для связи с компьютером.

Контролируемые токи:

- РКЗМ-25: 2–25 А;
- РКЗМ-50: 5–50 А;
- РКЗМ-250: 20–250 А;
- РКЗМ-500: 40–500 А.

Технические характеристики и полное описание устройств данной серии представлены по ссылке [2].

### Реле контроля, диагностики и защиты (РКДМ и РКД)

Реле РКДМ и РКД оснащены большим набором функций и настроек. Основные отличия данной серии — улучшенное разрешение измерений, расширенный диапазон контролиро-

ваемых токов и возможность подключения к ПК. Настройка реле и считывание его параметров выполняются с помощью внешнего пульта или сервисной программы, установленной на ПК (рис. 3).

РКД — старшая модель серии, позволяющая дополнительно контролировать напряжение питания ЭУ. В РКД добавлены два дискретных входа и возможность подключения к сети передачи данных посредством интерфейса RS-485 (рис. 4). Питание реле: ~220 В, 50 Гц. Контролируемые токи:

- РКД(М)-5: 0,3–60;
- РКД(М)-25: 2–300;
- РКД(М)-50: 4–600;
- РКД(М)-250: 15–2500;
- РКД(М)-500: 20–4000.

Технические характеристики и полное описание устройства представлены по ссылке [3].

Устройства релейной защиты АО «НИИПП» эксплуатируются на многих предприятиях России. По достоинству оценили реле контроля и защиты такие предприятия, как Томский электромеханический завод им. В. В. Вахрушева, ПАО «Распадская», предприятия холдинга «СИБУР», российские горно-

металлургические компании, обогатительные фабрики и другие предприятия.

Изделия, выпускаемые в АО «НИИПП», высоко ценятся на рынке благодаря уникальным сочетаниям простоты использования, превосходным характеристикам и высокой надежности, а также сроку службы — гарантийный срок на продукцию составляет 5 лет. Большой склад готовой продукции в АО «НИИПП» позволяет осуществлять доставку в любую точку РФ в кратчайшие сроки.

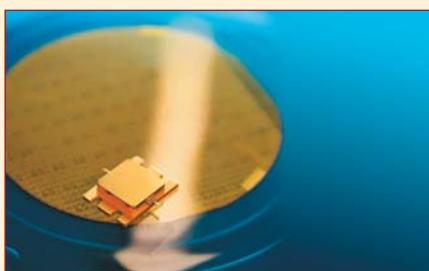
Устройства релейной защиты сертифицированы, имеют декларацию о соответствии Евразийского экономического союза.

Гибкая ценовая политика и индивидуальный подход к каждому заказчику позволяют АО «НИИПП» оставаться надежным поставщиком и сотрудничать на долгосрочных взаимовыгодных условиях.

По вопросам приобретения  
от производителя:

г. Томск ул. Красноармейская 99а  
тел: +7 3822 288-447  
e-mail: rkz@niipp.ru

## 1-кВт транзистор X-диапазона от Elite



Компания Elite Optoelectronics (KHP) представила новинку X-диапазона — GNI100104-P60. Внутренне

согласованный для диапазона 10–10,4 ГГц транзистор выполнен в герметичном фланцевом металлокерамическом корпусе и рассчитан на питание +50 В. GNI100104-P60 имеет коэффициент усиления 8 дБ, обеспечивает 33% КПД при длительности импульса 500 нс и скважности 67%.

В производственной линейке Elite есть и другие внутренне согласованные транзисторы для этого диапазона, способные работать в более жестких режимах вплоть до непрерывного. Они обеспечивают более высокий КПД при меньших уровнях выходной мощности.

Основные характеристики транзистора GNI100104-P60:

- частотный диапазон: 10–10,4 ГГц;
- максимальная выходная мощность: 60 дБм;
- КПД: 33%;
- напряжение питания/смещение: +50/-3 В;
- коэффициент усиления: 8 дБ.

Основными применениями транзистора являются передающие системы высокой мощности, функционирующие в импульсном режиме.

<https://macrogroup.ru/>

# Высоковольтные твердотельные коммутирующие устройства

ООО «ПАРАМЕРУС»

**В статье представлен обзор выпускаемых ООО «ПАРАМЕРУС» высоковольтных твердотельных коммутирующих устройств и импульсных генераторов. Оцениваются перспективы дальнейшего развития данного рода устройств. Компания специализируется на разработке и производстве силовой электроники: высоковольтных твердотельных коммутирующих устройств, высоковольтных источников питания, низковольтных источников питания и интегрированных устройств на их основе, в виде импульсных генераторов. Разработки осуществляются при поддержке фонда Сколково и Фонда содействия инновациям.**

**Виктор Зыков**

**Андрей Руцкой**

**Михаил Моисеев**

info@paramerus.com

## Введение

Современная промышленность имеет большую потребность в высоковольтных импульсных устройствах, обусловленную динамичным развитием оптических, лазерных, СВЧ и медицинских диагностических технологий. Формирование высоковольтных импульсов напряжением более 1 кВ является сложной инженерной задачей ввиду ограниченности большинства быстродействующих высоковольтных транзисторов рабочим напряжением 1,2 кВ.

Долгое время для переключения напряжения больших амплитуды использовались лампы, разрядники, тиатроны и высоковольтные электромеханические реле, однако каждому из перечисленных устройств свойственны значительные недостатки, ограничивающие их применимость. Так, лампы не способны коммутировать большие импульсные токи, а ввиду низкого КПД их нагрев недопустимо высок для современных применений. Разрядники могут коммутировать напряжение лишь в небольшом диапазоне, для них характерны низкая предельная частота и недолговечность. Тиатроны требуют высокомощного вспомогательного источника постоянного тока накала, а форма получаемого с их помощью высоковольтного импульса не только далека от идеального прямоугольника, но и дрейфует в течение срока службы. К недостаткам высоковольтных реле можно отнести низкие предельные частоты переключения и недолговечность.

Для формирования высоковольтных импульсов современной альтернативой устаревающим приборам стали высоковольтные твердотельные коммутирующие устройства (далее — коммутаторы). Они отличаются высокой долговечностью и надежностью, возможностью работы на частотах до нескольких мегагерц, а также способностью формировать

прямоугольные импульсы длительностью от десятков наносекунд до неограниченной. Благодаря возможности работы в режиме реле (открытие на неограниченное время) коммутаторы также подходят для подачи постоянного тока на высоковольтную нагрузку, такую как лампа бегущей волны (ЛБВ). Электрически коммутаторы представляют собой высоковольтный транзистор с цифровым управлением затвором, гальванической изоляцией силового канала и интегрированным антипараллельным высоковольтным диодом.

Коммутаторы эксплуатируются в высокотехнологичных устройствах, таких как спектрометры, импульсные лазеры, модуляторы радиолокационных систем, лазерные усилители, приборы ночного видения, газовые лазеры и лазерные дальномеры, а также электровакуумные приборы и устройства.

Коммутаторы имеют обширный диапазон применений, и решение задачи правильного выбора устройства, способного обеспечить пользователю необходимые характеристики, является основополагающим фактором успешной реализации проекта. Для первичной оценки компании-изготовителю необходимо получить от заказчика следующие параметры:

- рабочее напряжение, с учетом возможных выбросов при коммутации;
- максимальный импульсный ток;
- рабочую частоту;
- требования к длительности импульса;
- необходимые скорости нарастания и спада импульса;
- среднюю мощность в нагрузке;
- тип нагрузки.

Коммутирующие устройства, выпускаемые ООО «ПАРАМЕРУС», функционально можно разделить на однотактные коммутаторы, полумостовые коммутаторы, твердотельные реле, коммутаторы

для фотоники. Особо стоит отметить высоковольтные импульсные генераторы, совмещающие по своей структуре «коммутатор + высоковольтный источник питания + один или несколько источников смещения и нити накала».

Однотактные коммутаторы представлены четырьмя сериями: HVS-B, HVS-C (рис. 1), HVS-D, HVS-E (рис. 2). Приборы ранжированы по мощности, от самых компактных моделей HVS-B до сильноточных коммутаторов повышенной мощности HVS-E с принудительным охлаждением, которые применяются, когда нагрузка носит преимущественно активный характер.

- **HVS-B** — серия ультракомпактных высоковольтных коммутаторов с рассеиваемой мощностью до 4 Вт. Максимальное коммутируемое напряжение составляет 10 кВ, пиковый ток может достигать 140 А. Данный тип коммутаторов — это бюджетное реше-

ние, предназначенное в основном для мобильных и передвижных систем, а также для проведения различных НИОКР.

- **HVS-C** — базовая серия высоковольтных коммутаторов. Максимальное коммутируемое напряжение достигает 12 кВ, пиковый ток — 660 А. Данный тип коммутаторов характеризуется высокой импульсной и средней мощностью.
- **HVS-D** — серия высоковольтных коммутаторов с повышенным рабочим напряжением. Максимальное коммутируемое напряжение составляет 35 кВ, пиковый ток может достигать 100 А. Устройства данной серии характеризуются повышенной помехоустойчивостью, что позволяет обеспечить стабильную работу устройства даже в присутствии сильных помех. Изделия предназначены для работы с высоковольтными СВЧ-приборами, импульсными источниками излучения и электростатическими линзами.
- **HVS-E** — серия высоковольтных сильноточных коммутаторов повышенной мощности. Максимальное коммутируемое напряжение составляет 20 кВ, пиковый ток

достигает 1000 А. Для коммутаторов данной серии характерны пиковая мощность импульса до нескольких мегаватт, повышенная теплопроводность корпуса, широкий спектр опций для улучшенного охлаждения. Устройства предназначены для работы в сильноточных высоковольтных контурах, таких как газовые лазеры и лазеры на парах металлов, системы поджига плазмы, высоковольтные двигатели.

Полумостовые коммутаторы, представленные сериями HVS-HB, HVS-HBM (рис. 3), предназначены для управления нагрузками любого типа, когда важен четкий задний фронт высоковольтного импульса.

- **HVS-HB** — базовая версия высоковольтных коммутируемых устройств полумостовой конфигурации. Максимальное коммутируемое напряжение составляет 10 кВ, пиковый ток может достигать 100 А. Устройства предназначены для емкостной нагрузки и симметричной работы обоих плеч коммутатора.
- **HVS-HBM** — версия высоковольтных коммутирующих устройств полумостовой конфигурации для смешанной нагрузки и несимметричной работы плеч коммутатора. Максимальное коммутируемое напряжение составляет 35 кВ, пиковый ток может достигать 250 А. Рекомендуется для применения в составе СВЧ-устройств.

Твердотельные реле, представленные серией HVS-RH (рис. 4), — это высоковольтные твердотельные полумостовые реле с цифровым управлением. Максимальное коммутируемое напряжение составляет 30 кВ, пиковый ток — 15 А. Устройства предназначены для переключения полярности высокого напряжения на нагрузке либо для разрядки нагрузки на землю. Приборы многократно превосходят вакуумные и механические реле



Рис. 1. Коммутаторы серии HVS-B и HVS-C



Рис. 2. Коммутаторы серии HVS-D и HVS-E

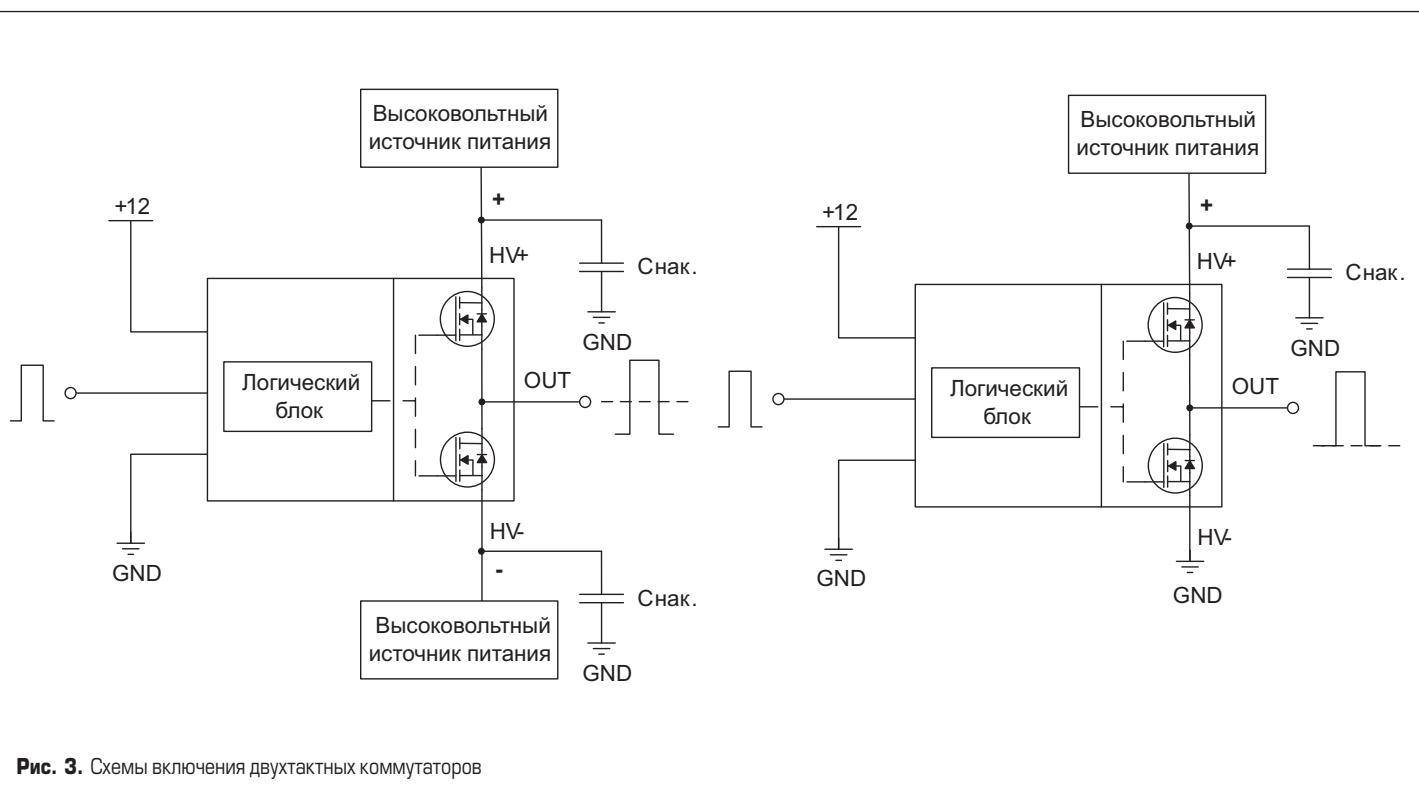


Рис. 3. Схемы включения двухтактных коммутаторов

по сроку службы, подходят для горячего переключения, обладают способностью выключить оба вывода и защитами от протекания сквозного тока и превышения максимальной частоты.

Коммутаторы для фотоники представлены сериями HVS-ONQ, HVS-OFFQ и HVS-HBP, HVS-FBP (рис. 5). Устройства предназначены для работы с ячейками Покельса. Применяемые типы охлаждения: кондуктивное или жидкостное.

- **HVS-ONQ** — коммутаторы предназначены для формирования импульса напряжения с резким нарастанием и плавным спадом на нагрузке малой емкости (до 6 пФ). Максимальное коммутируемое напряжение составляет 9 кВ, максимальная частота непрерывной работы 400 кГц.
- **HVS-OFFQ** — коммутаторы предназначены для формирования импульса напряжения с резким спадом и плавным нарастанием на нагрузке малой емкости (до 6 пФ). Максимальное коммутируемое напряжение составляет 9 кВ, максимальная частота непрерывной работы 400 кГц.
- **HVS-HBP** — коммутаторы предназначены для формирования прямоугольных импульсов на нагрузке малой емкости (до 6 пФ). Максимальное коммутируемое напряжение составляет 4,2 кВ, максимальная частота непрерывной работы 250 кГц, длительность импульса от 100 нс (рис. 6).
- **HVS-FBP** — коммутаторы предназначены для формирования узких импульсов на нагрузке малой емкости (до 6 пФ). Максимальное коммутируемое напряжение

составляет 4,2 кВ, максимальная частота непрерывной работы 250 кГц (рис. 7).

Конкурентным преимуществом коммутаторов для фотоники является наличие аналогового термодатчика, отслеживающего температуру устройства и передающего эти данные пользователю. Таким образом, пользователь может определить, на какой процент от допустимой мощности работает устройство в конкретный момент, с учетом используемой системы охлаждения.

Импульсные генераторы представлены моделями HVG и SHVG (рис. 8). Для работы

устройств не требуется внешнего высоковольтного источника питания, коммутатора и согласующих устройств для связки «источник-коммутатор». Параметры выходных импульсов соответствуют входному управляющему сигналу от внешнего генератора прямоугольных импульсов TTL-уровня, поддерживается возможность генерации импульсов заданной длины по фронту управляющего импульса, а также возможность создания пользовательского алгоритма генерации импульсов. Возможна модификация стандартных моделей для создания генера-

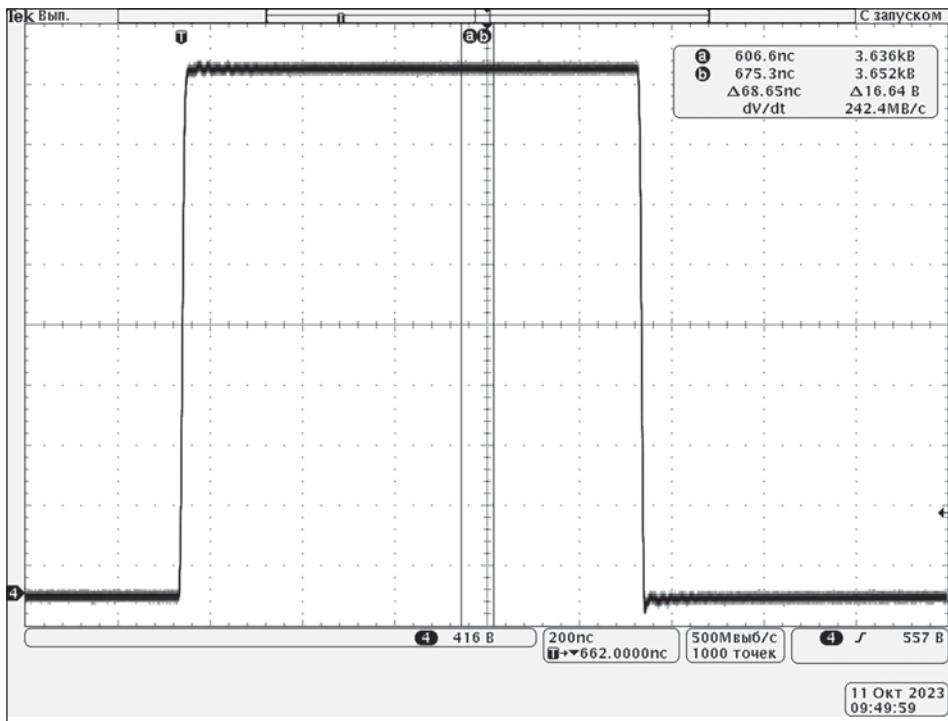


Рис. 6. Осциллограмма работы коммутатора серии HVS-HBP на емкостную нагрузку



Рис. 4. Коммутаторы серии HVS-RH



Рис. 5. Коммутаторы серии HVS-ONQ, HVS-OFFQ, HVS-HBP и HVS-FBP

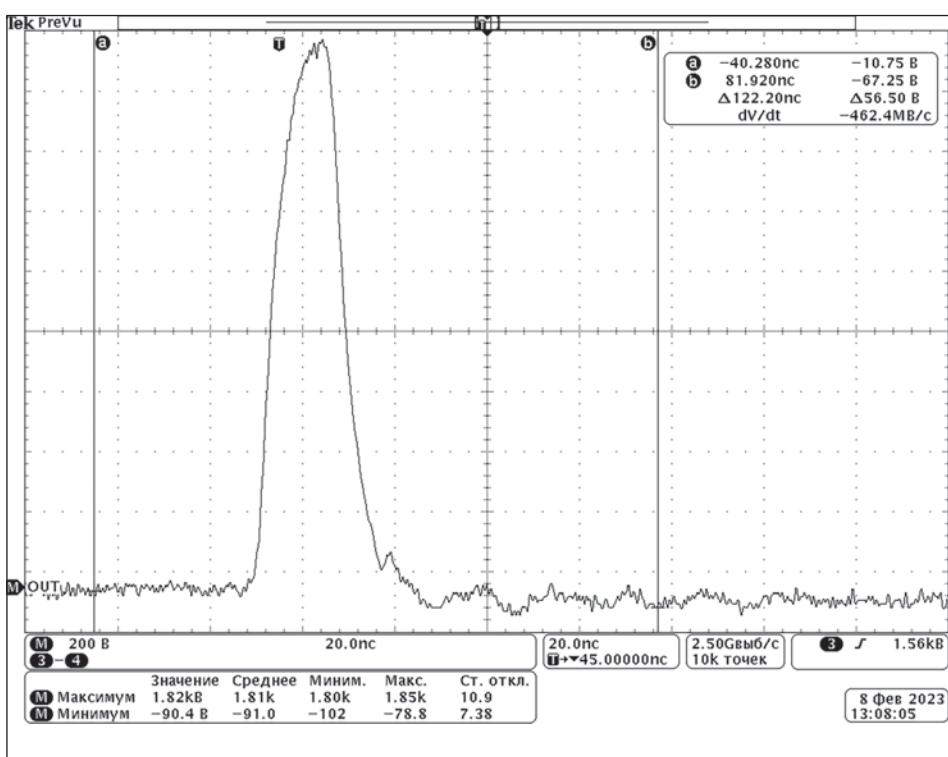


Рис. 7. Осциллограмма работы коммутатора серии HVS-FBP на емкостную нагрузку

торов импульсов с несколькими выходами, при этом напряжение на дополнительных выходах может быть синхронизировано и/или смешено на постоянную величину относительно импульса на основном выводе или генерироваться автономно по сигналу с внешнего сигнального генератора или внутреннего таймера. Разработаны модели генераторов, предназначенных для управления ячейкой Поккельса экстремально высокой емкости (50 пФ).

- **HVG** — серия компактных импульсных устройств, которые могут быть интегрированы в состав приборов научно-исследовательского, медицинского и общепромышленного назначения, а также использоваться как автономные устройства. Освоены высоковольтные генераторы прямоугольных импульсов амплитудой до 8 кВ с крутым фронтом и спадом импульса.
- **SHVG** — серия программируемых импульсных генераторов в приборном корпусе, позволяющих управлять устройством с передней панели или удаленно, используя цифровые интерфейсы управления.



**Рис. 8.** Импульсные генераторы HVG и SHVG

Освоенные технологии позволяют ООО «ПАРАМЕРУС» серийно выпускать любой генератор для электрооптики с рабочим напряжением до 10 кВ.

Общие требования и рекомендации по работе с высоковольтными коммутирующими устройствами:

- Допускается использовать только безиндукционные резисторы. Не допускается

применение проволочных резисторов. В качестве нагрузочных или шунтирующих следует использовать резисторы, устойчивые к импульсу. В противном случае пиковый ток через данные элементы может многократно превышать расчетное значение. Специалисты ООО «ПАРАМЕРУС» рекомендуют использовать керамические и цементные резисторы. Номинал резистора

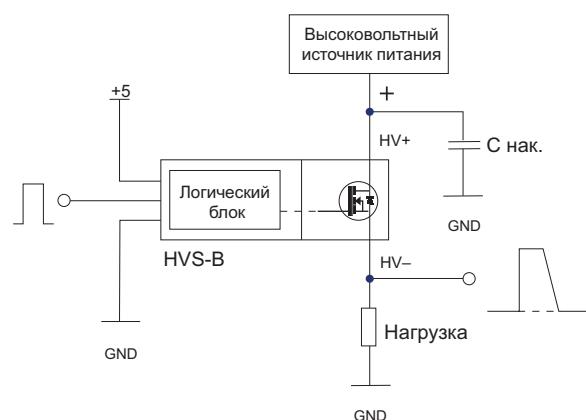


Схема получения импульсов положительной полярности с коммутацией на нагрузку

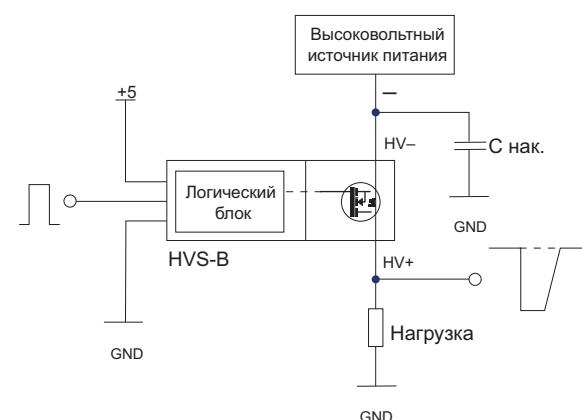


Схема получения импульсов отрицательной полярности с коммутацией на нагрузку

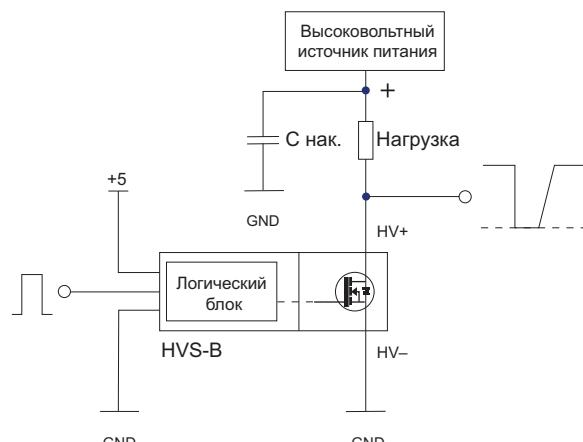


Схема получения импульсов положительной полярности с коммутацией на землю

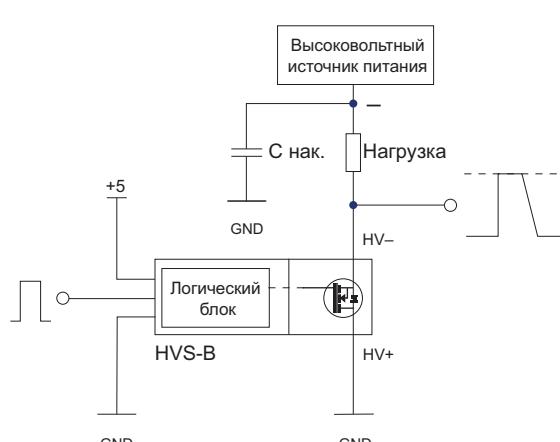


Схема получения импульсов отрицательной полярности с коммутацией на землю

**Рис. 9.** Схемы включения однотактных коммутаторов

Таблица. Примеры технических параметров коммутаторов и импульсных генераторов

Модель	Номинальное напряжение	Пиковый ток	Номинальная мощность	Частота непрерывной работы	Частота в режиме пачки	Максимальная нагрузка (емкостная)	Смещение напряжения
<b>Однотактные коммутаторы</b>							
HVS-B-1.5-140	1,5 кВ	140 А		20 кГц	500 кГц		
HVS-B-2.4-6.5	2,4 кВ	6,5 А		110 кГц	1 МГц		
HVS-B-4.2-8.5	4,2 кВ	8,5 А		50 кГц	1 МГц		
HVS-B-6-8.5	6 кВ	8,5 А		35 кГц	1 МГц		
HVS-B-7.5-16	7,5 кВ	16 А		10 кГц	500 кГц		
HVS-B-9.5-25	9,5 кВ	25 А		6 кГц	500 кГц		
HVS-B-10-16	10 кВ	16 А		7 кГц	500 кГц		
HVS-C-2-300	2 кВ	300 А		7,5 кГц	150 кГц		
HVS-C-2.2-6.5	2,2 кВ	6,5 А		500 кГц	1 МГц		
HVS-C-4.2-6.5	4,2 кВ	6,5 А		250 кГц	1 МГц		
HVS-C-5-40	5 кВ	40 А		70 кГц	500 кГц		
HVS-C-6.5-420	6 кВ	420 А		8 кГц	500 кГц		
HVS-C-8.5-6.5	8,5 кВ	6,5 А		130 кГц	1 МГц		
HVS-C-12-280	12 кВ	280 А		4 кГц	250 кГц		
<b>Полумостовые коммутаторы</b>							
HVS-HB-1.2-8	1200 В	8 А		100 кГц	2 МГц	200 пФ	
HVS-HBM-25N-10-SP	25 кВ	10 А		240 Гц		100 пФ	
HVS-HBM-6N-14	6 кВ	14 А		15 кГц	40 кГц	50 пФ	
<b>Твердотельные реле</b>							
HVS-RH-12-5	12 кВ	5 А		750 Гц			
<b>Коммутаторы для фотоники</b>							
HVS-HBP-4.2-50	4,2 кВ			50 кГц		6 пФ	
<b>Импульсные генераторы</b>							
HVG-10-10-7800P-ONQ	7,8 кВ (+)	10 А	10 Вт	650 Гц		50 пФ	
HVG-8-8-1000BI-LP	1 кВ (+), 1 кВ (-)	8 А	8 Вт	60 кГц		220 пФ	
HVG-6-10-7000P-ONQ	7 кВ (+)	10 А	6 Вт	230 Гц		50 пФ	
HVG-8-8-2000P-MAN	2 кВ (+)	8 А	8 Вт	10 кГц		20 пФ	
HVG-8-8-500P	500 В (+)	8 А	8 Вт	100 кГц		200 пФ	
HVG-8-10-2000N-EL2	2 кВ (-)	10 А	8 Вт	10 кГц		100 пФ	0–5 В
HVG-8-5-2000N-EL	2 кВ (-)	10 А	8 Вт	5 кГц		100 пФ	0–10 В
SHVG-30-2-2000N-R232	2 кВ (-)	2 А	30 Вт	10 кГц		1 нФ	65 В

должен быть таким, чтобы ток в контуре не превысил максимально допустимое для коммутатора значение.

- Для получения наилучших скоростных параметров длина контура от высоковольтного конденсатора до заземления должна быть минимальна. В случае если длину провода до накопительной емкости нельзя сократить менее 20 см, рекомендуется в непосредственной близости от коммутатора расположить конденсатор емкостью 100–150 пФ для фильтрации осцилляций, вызванных индуктивностью контура. Для использования коммутатора с емкостной или индуктивной нагрузкой необходимо проконсультироваться с производителем.
- При подключении коммутатора к нагрузке, ранее не тестируемой, начинать следует с пониженного коммутируемого напряжения и сниженной частоты работы/единичных импульсов. Необходимо контролировать выбросы выходного напряжения и нагрев коммутатора. Превышение номинальных параметров может привести к выходу устройства из строя.
- При подключении коммутатора нужно строго соблюдать полярность.
- Все коммутаторы могут подключаться в схему с плавающим потенциалом. Для этого в любой из предложенных выше схем с однополярным питанием (рис. 9) следует заменить подключенный к силовому

каналу коммутатора контакт заземления на выход высоковольтного источника той же полярности, что и уже подключенный. При этом амплитуды напряжений должны выбираться так, чтобы потенциал на высоковольтной клемме коммутатора «HV» никогда не был выше, чем на высоковольтной клемме «HV+».

- При подключении коммутаторов в схему с плавающей «землей» разница напряжений источников питания не должна превышать максимальное рабочее напряжение коммутатора, а наибольшее из этих напряжений — электропрочность гальванической изоляции между силовой и управляющей частью коммутатора.
- Использовать коммутаторы с индуктивной нагрузкой следует с крайней осторожностью, поскольку открытие и закрытие коммутатора может происходить за время порядка единиц наносекунд, что может привести к сильнейшим индуктивным выбросам. Кроме того, важно следить, чтобы ни в какой момент времени через коммутатор не протекал обратный ток. Несмотря на то, что в большинство высоковольтных ключей производства ООО «ПАРАМЕРУС» встроен обратный антипараллельный диод, его быстродействие часто может оказаться недостаточным для своевременного восстановления блокирующей способности устройства.

- Емкость нагрузки сильно зависит от ее типа и может вносить существенные искажения в форму импульса, а в ряде случаев — приводить к неконтролируемому росту тока через коммутатор и выходу его из строя. Что касается собственной емкости коммутатора, она всегда представлена в документации на устройство. Ее значение и протекающий через контур ток определяют крутизну спада высоковольтного импульса: чем выше ток и ниже емкость, тем быстрее закончится высоковольтный импульс на нагрузке после перехода управляющего TTL-сигнала в 0. Как правило, значение паразитной емкости составляет от единиц до десятков пФ. В случае если значение паразитной емкости конкретно выбранного коммутатора не позволяет использовать его в вашем контуре, следует выбрать другое устройство с меньшим значением емкости.

Для наглядности в таблице приведены примеры коммутаторов и импульсных генераторов различных серий.

В статье сделан краткий обзор высоковольтных коммутирующих устройств производства ООО «ПАРАМЕРУС» и приборов на их основе, показаны плюсы использования полупроводниковых коммутаторов в сравнении с традиционными устаревающими приборами, такими как разрядники и радиолампы, представлено упрощенное руководство по подбору и тестированию.

ОРГАНИЗATOR



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



MKB

МЕЖДУНАРОДНЫЕ  
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



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

**12–18 АВГУСТА  
ПАТРИОТ ЭКСПО**

# Компактные трехфазные диодные модули серии ДМ

на токи 10–100 А напряжением до 2000 В

**Ограничительные меры со стороны недружественных стран способствуют бурному развитию машиностроения и приборостроения в РФ, но для достижения полного технологического суверенитета в указанных отраслях требуется модернизация существующей и создание новой силовой ЭКБ. АО «Оптрон-Ставрополь» занимается разработкой и изготовлением силовых полупроводниковых приборов на основе кристаллов собственного производства — диодных, тиристорных, оптотиристорных модулей.**

**Андрей Селеменев**

a.selemenev@optron-stavropol.ru

С середины 2021 года по настоящее время специалисты АО «Оптрон-Ставрополь» ведут разработку и серийно изготавливают линейки диодных модулей ДМ различной мощности, фазности и конструктивного исполнения с использо-



Рис. 1. Трехфазные диодные модули ДМ3.3–50–16

ванием диффузионных технологий получения кристалла, толстопленочных технологий, технологий групповой пайки кристаллов в печах разных видов, лазерных и многих других технологий. В середине 2022 года были разработаны компактные трехфазные диодные модули ДМ3.3–50–16 с диэлектрическим, алюминиевым основанием (подложкой), с применением металлизированных теплопроводных керамических подложек  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{AlN}$ , на токи 10–100 А напряжением до 1600 В (рис. 1).

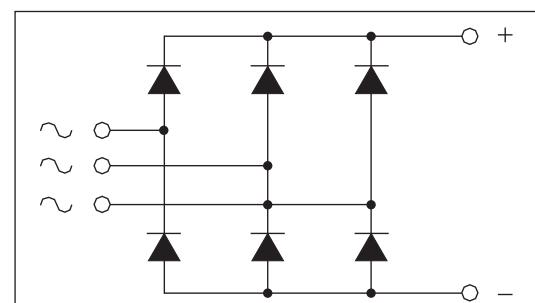
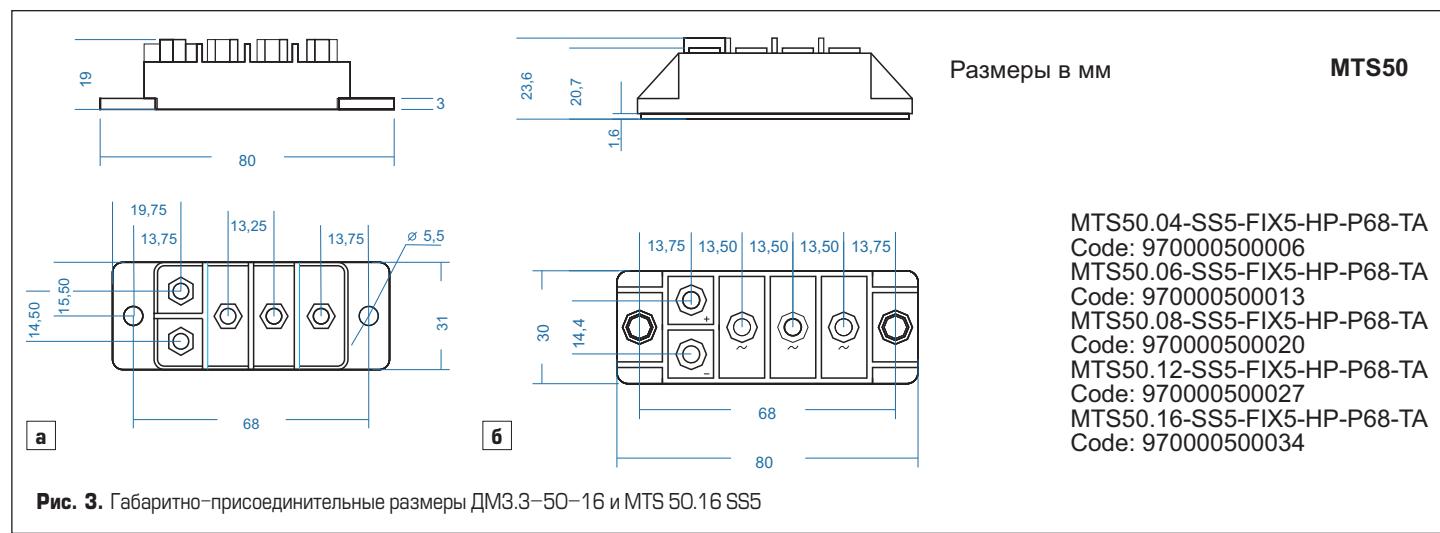


Рис. 2. Электрическая схема подключения ДМ3.3–50–16



**Таблица 1.** Сравнительная таблица параметров и массы диодного модуля ДМ3.3–50–16 с диодным мостом MTS 50.16 SS5

Наименование	Условия	ДМ3.3-50-16	MTS 50.16 SS5
Пиковое падение напряжения, $V_{FM}$	$I_F = 100 \text{ A, при } T = +25^\circ\text{C}$	1,1 В	1,7 В
Максимальный обратный ток, $I_{RRM}$	$V = V_{RRM}$	4 мА	4 мА
Минимальная и максимальная температура перехода, $T_{jmax}$		-50/+160 °C	-40/+150 °C
Вес, W, г		67,3	85

Эти трехфазные диодные модули являются аналогом силовых выпрямительных мостов MTS 50.16 SS5 — 50 А 1600 В SCOMES, имеют такую же электрическую схему подключения (рис. 2).

В части массогабаритных и электрических характеристик диодные модули ДМ3.3–50–16 имеют лучшие параметры в отличие от оригинала MTS 50.16 SS5 — 50 А (рис. 3, табл. 1).

Диодные модули ДМ3.3–50–16 производятся в модифицированном корпусе FIX5-HP-R68-TA. В зависимости от повторяющегося

импульсного обратного напряжения модули подразделяются на классы (табл. 2).

Цены на диодные модули ДМ3.3–50–16 в 1,7 раза ниже стоимости оригинала MTS 50.16 SS5.

Технологии, комплектующие, оборудование и материалы, использующиеся при разработке и производстве силовых полупроводниковых приборов в АО «Оптрон-Ставрополь», являются отечественными и созданы инженерным составом АО «Оптрон-Ставрополь». Все приборы имеют гарантийный срок эксплу-

**Таблица 2.** Классы диодных модулей ДМ3.3–50–16

№	P/N	$V_{RRM}$	$V_{RSM}$
1	ДМ3.3-50-4	400	450
2	ДМ3.3-50-6	600	670
3	ДМ3.3-50-8	800	900
4	ДМ3.3-50-10	1000	1120
5	ДМ3.3-50-12	1200	1340
6	ДМ3.3-50-14	1400	1570
7	ДМ3.3-50-16	1600	1800
8	ДМ3.3-50-18	1800	2020
9	ДМ3.3-50-20	2000	2250

атации от двух лет. АО «Оптрон-Ставрополь» осуществляет разработку (в рамках ОКР и НИОКР) и производство различных силовых, оптоэлектронных полупроводниковых изделий по ТЗ заказчика.

## Низкотемпературная версия ULT гибридно-пленочного конденсатора от HCB battery

Компания HCB начала серийное производство низкотемпературной версии ультраконденсатора серии UPC1520-ULT, рассчитанной на стабильную работу при экстремально низкой температуре.

При рабочей температуре ниже -20 °C производительность ультраконденсатора UPC1520-ULT превосходит стандартную версию UPC на 20%. При кратковременном разряде током 300 мА и температуре -40 °C ультраконденсатор показал более высокое и стабильное рабочее напряжение в сравнении с европейским аналогом Tadiran HLC1520.

UPC1520-ULT способен обеспечить импульсный ток до 8 А и до 4000 циклов заряд-разряд.

Особенности и преимущества ультраконденсатора UPC1520-ULT:

- высокая импульсная мощность: до 8 А;
- стабильный низкий ток утечки: 1–15 мКА;
- длительный срок хранения;
- безопасный дизайн;
- устранение задержки напряжения и увеличение импульсного тока при передаче данных в устройства NB IOT/LORA.

<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  
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

# Карбид-кремниевые МОП-транзисторы

от AMG Power

**В статье рассмотрены карбид-кремниевые МОП-транзисторы от компании AMG Power.**

Александр Жеухин

power@macrogroup.ru

**Н**айбольшее распространение в производстве полупроводниковых приборов получил кремний, имеющий ширину запрещенной зоны 1,12 эВ. Известно, что большая ширина запрещенной зоны обеспечивает более высокое рабочее напряжение при малых токах утечки, высокую температуру эксплуатации и быстродействие. В настоящее время в силовой электронике все чаще используются полупроводниковые материалы с большей шириной запрещенной зоны, в том числе и карбид кремния.

Большая ширина запрещенной зоны карбида кремния, 2,2–3,3 эВ в зависимости от ориентации кристаллов, предполагает более высокую электрическую прочность, что позволяет изготавливать высоковольтные приборы.

Удельное сопротивление канала в приборах полевого типа на карбиде кремния существенно меньше, чем кремниевых. Это позволяет сократить площадь кристалла с соответствующим уменьшением емкостей переходов и увеличением быстродействия.

Карбид кремния имеет втрое лучшую теплопроводность, чем кремний. Таким образом, даже при сокращении площади кристалла можно создавать приборы с меньшим тепловым сопротивлением, следовательно, с большей удельной мощностью.

Высокое быстродействие внутреннего диода снижает коммутационные потери, что способствует повышению рабочих частот преобразователей энергии.

Максимальная теоретическая температура, при которой сохраняется работоспособность полупроводников из карбида кремния, составляет +600 °C. Максимально допустимая рабочая температура реальных приборов, конечно, меньше и определяется используемыми конструктивными и технологическими решениями.

Технологический процесс изготовления кристалла МОП-транзисторов на карбиде кремния сложнее, чем на кремнии, особенно в части изготовления бездефектных окисных пленок, способных выдержать высокие напряжения. Немногие компании имеют в своем производстве такие технологии.

Производитель AMG Power предлагает МОП-транзисторы трех поколений на карбиде кремния для преобразовательной техники с предельными напряжениями сток-исток 650–3300 В и максимально допустимой рассеиваемой мощностью 20–550 Вт. Максимальная рабочая температура +175 °C.

Параметры транзисторов при температуре +25 °C приведены в таблице.

На рис. 1 и 2 показаны графики максимально допустимой мощности и области безопасной работы для транзистора третьего поколения A3G100N1200MT3.

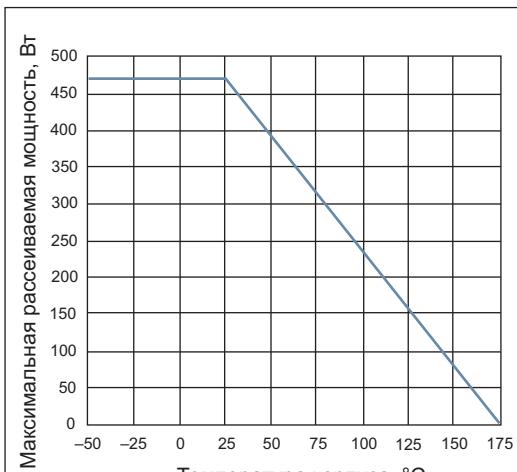


Рис. 1. Максимальная рассеиваемая мощность

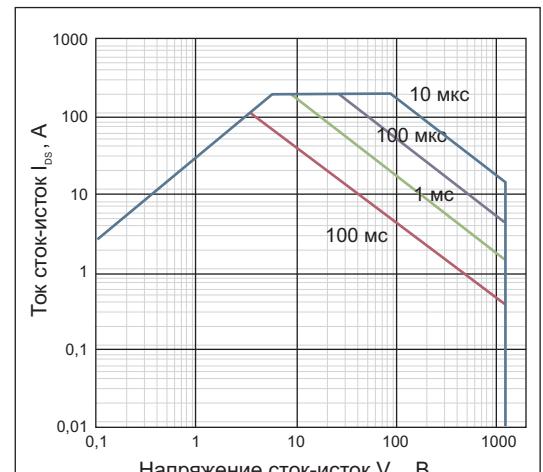


Рис. 2. Область безопасной работы

Таблица. Основные характеристики транзисторов

Обозначение	Пределевые режимы						Типовые значения		Динамические параметры							Корпус
	V <sub>DS</sub> , В	I <sub>D</sub> , А	I <sub>DMH</sub> , А	V <sub>GS</sub> , В	P <sub>D_Br</sub>	T <sub>J, T<sub>STG</sub></sub> , °C	R <sub>D(on)Y</sub> , мОм	V <sub>FSD</sub> , В	C <sub>iss</sub> , пФ	C <sub>oss</sub> , пФ	Q <sub>g</sub> , нК	t <sub>d(on)</sub> , нс	t <sub>r</sub> , нс	t <sub>d(off)</sub> , нс	t <sub>f</sub> , нс	
AMG30N650MT3	650	36	100	-10/+22	150	-55...+150	60	5,2	1138	88,8	13,5	10,5	10,5	18,7	9	TO-247
AMG30N650MT4	650	36	100	-10/+22	175	-55...+175	60	3,6	1480	110	75	10	22	18	8	TO-247-4
AMG60N650MT3	650	60	135	-10/+22	395	-55...+175	38	3,5	2612	212	128	12	35	22	9	TO-247
AMG60N650MT4	650	60	135	-10/+22	395	-55...+175	38	3,5	2612	212	128	10	12	19	7	TO-247-4
AMG100N650MT3	650	100	300	-10/+22	450	-55...+150	15	4,8	5315	325	236	25	136	63	27	TO-247
AMG100N650MT4	650	150	300	-10/+22	550	-55...+175	12	3,5	7169	325	236	26	35	63	17	TO-247-4
A3GR160N1200MD88	1200	20	32	-8/+19	93	-55...+175	160	3,5	715	42	26	11	8	14	9	PDFN8*8
A3G20N1200MT3	1200	20	35	-8/+19	116	-55...+175	160	3,5	715	42	26	11	8	14	9	TO-247
A3G20N1200MT4	1200	20	35	-8/+19	108	-55...+175	160	3,5	715	42	26	12	9	15	9	TO-247-4
A3G20N1200MT7	1200	20	35	-8/+19	108	-55...+175	160	3,5	715	42	26	11	8	14	9	TO-263-7
AMG30N1200MT3	1200	32	80	-10/+22	145	-55...+150	80	4,8	1590	63	72	58	20,5	35	17,8	TO-247
AMG30N1200MT4	1200	32	80	-10/+22	175	-55...+175	80	3,9	1465	78	72	42	15	36	11	TO-247-4
AMG30N1200MT7	1200	32	80	-10/+25	145	-55...+150	80	4,8	1590	63	72	42	15	36	11	TO-263-7
AMG60N1200MT3	1200	60	100	-10/+22	395	-55...+175	45	4,2	2565	109	125	17	66	28	14	TO-247
AMG60N1200MT4	1200	60	100	-10/+22	325	-55...+175	45	4,2	2565	109	125	15	19	25	10	TO-247-4
AMG60N1200MT7	1200	60	100	-10/+22	325	-55...+175	45	4,2	2565	109	125	13	17	23	9	TO-263-7
AMGR45N1200MD02	1200	60	100	-10/+22	218	-55...+175	45	4,2	2565	109	125	13	17	23	9	Toll
AMGR50N1200MD88	1200	60	100	-10/+22	218	-55...+175	45	4,2	2565	109	125	13	17	23	9	PDFN8*8
A2G60N1200MT4	1200	60	100	-10/+22	395	-55...+175	45	4,2	2565	109	125	15	19	25	10	TO-247-4
A3G60N1200MT4	1200	60	220	-8/+19	312,5	-55...+175	40	3,9	2850	102	100	14	18	24	10	TO-247-4
A3G100N1200MT3	1200	100	200	-8/+19	475	-55...+175	20	3,2	7218	275	172	131	21	56	11	TO-247
A3G100N1200MT4	1200	100	200	-8/+19	470	-55...+175	20	3,2	7218	275	172	33	37	64	15	TO-247-4
A3GR20N1200MD02	1200	100	200	-8/+19	470	-55...+175	20	3,2	7218	275	172	32	36	61	14	Toll
AMG100N1200MDS	1200	115	280	-10/+25	428	-55...+175	16	4,6	6378	245	238	42	34	71	13	SOT227
AMG100N1200MT3	1200	115	250	-10/+22	550	-55...+150	16	4,6	6378	245	238	185	75	28	26	TO-247
AMG100N1200MT4	1200	115	250	-10/+22	550	-55...+175	16	3,5	6878	288	238	52	38	81	17	TO-247-4
AMG100N1200MT4	1200	115	250	-10/+22	550	-55...+150	16									TO-247-4
A3G1N1700MF3	1700	1	2	-5/+15	20	-55...+175	10	3,5	50	2	2,5	2,6	1,7	2,2	1,5	TO-220F
A3G5N1700MT3	1700	5	10	-5/+15	60	-55...+175	750	3,5	200	6	8	10	7	8	6	TO-247
A2G40N1700MT3	1700	40	118	-10/+22	242	-55...+175	72	4,2	1550	138	100	35	22	19	15	TO-247
A2G100N1700MT4	1700	100	200	-10/+22	484	-55...+175	26	3,2	6460	198	128	32	35	60	15	TO-247-4
A3G100N1700MT4	1700	100	200	-8/+19	470	-55...+175	25	3,2	6465	195	172	37	36	64	15	TO-247-4
AMG20N3300MT4	3300	20	40	-10/+25	152	-55...+150	250	4,5	600	50	9	7	8	12	13	TO-247-4
A2G60N3300MT4	3300	60	230	-10/+22	536	-55...+175	48	4,2	7305	128	339	76	38	31	17	TO-247-4

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

## Часть 6. Firstack Technology, продолжение

**Драйвер изолированных затворов является одним из ключевых узлов силового преобразователя. Существует много вариантов реализации подобных устройств, к наиболее популярным из них относятся «ядра», подключаемые с помощью адаптеров, и полностью законченные платы plug-n-play, сконфигурированные для управления конкретными силовыми ключами.**

В журнале «Силовая электроника» № 2'2023 мы уже рассказывали о компании Firstack Technology, специализирующейся на разработке и производстве устройств управления изолированными затворами. Кроме множества стандартных драйверов, предназначенных для построения типовых двух- и трехуровневых инверторов с модулями 1200, 1700, 3300, 4500 и 6500 В, Firstack выпускает множество специализированных плат управления, а также сборок, о которых и пойдет речь в данной статье. В основе всех описанных устройств лежит цифровое драйверное «ядро» Firstack.

**Андрей Колпаков**

akolpakov@unirec.ru

**Firstack Technology**

Компания Hangzhou Firstack Technology Co., Ltd, расположенная в Северном технологическом парке Ханчжоу, специализируется на разработке и производстве драйверов IGBT. Компания удостоена звания «Национальное высокотехнологичное предприятие», а выпускаемая продукция сертифицирована по ISO9001. Некоторые продукты Firstack — прямые аналоги всемирно известных устройств управления изолированными затворами Power Integration.

Firstack является лидером китайского рынка в области разработки интеллектуальных цифровых IGBT-драйверов. В ассортименте продуктов компании представлены «ядра», а также устройства класса plug-n-play, предназначенные для непосредственного соединения с IGBT в стандартных корпусах 62 мм, EconoDual, Prime-PACK, IHV, IHM. Кроме этого, Firstack выпускает специализированные платы для управления сборками параллельных IGBT, трехуровневыми модулями Prime-PACK и транспортными IGBT в конструктиве HybridPack и EconoPack.

### АдAPTERЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ МОДУЛЯМИ IGBT

Применение технологии Driver Hub в сочетании с цифровым способом передачи данных позволяет обеспечить хороший баланс токов в параллельных цепях (в предельных режимах они отличаются не бо-

лее чем на 3% при соблюдении всех соответствующих правил проектирования). Практика показывает, что наращивание мощности за счет параллельного соединения стандартных силовых модулей дает во многих случаях наилучший результат как с точки зрения тепловых режимов, так и по стоимости решения. Этот вариант реализации инвертора оптимальен в наиболее сложных и ответственных приложениях, в частности для тяговых приводов или системы передачи постоянного тока высокого напряжения (HVDC).



**Рис. 1.** АдAPTERНЫЕ ПЛАТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУМЯ И ТРЕМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ МОДУЛЯМИ PRIME-PACK: PM140/PM110TRP

**Таблица 1.** Основные параметры драйверов PM140 и PM110TRP

Параметр	PM140 (2//IGBT)	PM110TRP (3//IGBT)
Напряжение питания, В	15	24
Выходная мощность (на 1 канал), Вт	7	8
Выходной ток (пиковый), А	38	38
Напряжение управления ( $V_{G\_on}/V_{G\_off}$ ), В		±15
Диапазон рабочих температур, °C		-40...+85
Вход ШИМ		Оптический
Функции защиты		SC, UVLO, OT*

Примечание. \* SC (Short Circuit) — защита от короткого замыкания (КЗ), UVLO (Under Voltage LockOut) — защита от падения напряжения управления, OT (Over Temperature) — защита от перегрева, STO (Soft Turn-Off) — плавное отключение.

**Таблица 2.** Основные параметры драйвера 1FSD215 (2//IGBT)

Параметр	1FSD215 (2//IGBT)
Напряжение питания, В	15
Выходная мощность (на 1 канал), Вт	8
Выходной ток (пиковый), А	110
Напряжение управления ( $V_{G\_on}/V_{G\_off}$ ), В	+15/-10
Диапазон рабочих температур, °C	-40...+85
Функции защиты	SC, UVLO, STO



**Рис. 2.** Адаптерная плата 1FSD215 для управления двумя параллельными модулями в конструкции IHM

**Таблица 3.** Основные параметры драйверов 4FSC08110 и 6FSC08110

Параметр	4FSC08110 (2-4//IGBT ED3)	6FSC08110 (2-6//IGBT ED3)
Напряжение питания, В		15
Выходная мощность (на 1 канал), Вт	6	8
Выходной ток (пиковый), А		110
Напряжение управления ( $V_{G\_on}/V_{G\_off}$ ), В		±15
Диапазон рабочих температур, °C		-40...+85
Функции защиты		SC, UVLO, SSD*

На рис. 1 представлены адаптерные платы, предназначенные для управления двумя (PM140) и тремя (PM110TRP) модулями IGBT в конструкции Prime-Pack. Адаптер 1FSD215 на рис. 2 создан для работы с двумя параллельными модулями IHM. Силовые модули высокой мощности в таких корпусах функционируют в судовых тяговых приводах, приводах локомотивов и интеллектуальных сетях.

Основные параметры драйверов PM140 и PM110TRP приведены в таблице 1, 1FSD215 — в таблице 2.

Решение, представленное на рис. 3, является реализацией концепции Master-Slave («ведущий-ведомый»), к важным особенностям которой относится идеальная симметрия цепей управления и независимость мощности ведущего ядра от количества параллельных IGBT. Поскольку энергия, рассеиваемая драй-

вером  $P_D$ , зависит от перепада напряжения управления  $dV_G$ , частоты коммутации  $F_{sw}$  и суммарного заряда затвора  $Q_G$  в соответствии с формулой  $P_D = dV_G \times F_{sw} \times Q_G$ , такая концепция является наилучшим вариантом построения инвертора при большом количестве параллельных затворов. Кроме того, данное решение позволяет произвольно выбирать расстояние между корпусами, что выгодно отличает его от конструкции с одним адаптером, монтируемым на параллельные ключи.

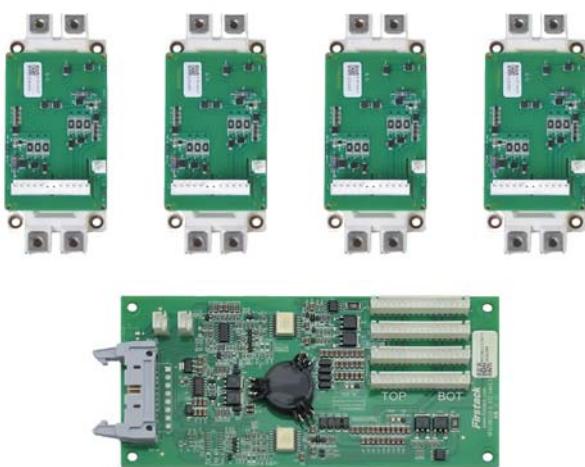
Драйвер 4FSC08110 предназначен для управления двумя-четырьмя IGBT в корпусе EconoDual. Он содержит цифровое «ядро» и соответствующее количество плат адаптеров, непосредственно устанавливаемых на модули. Основные параметры драйвера 4FSC08110 приведены в таблице 3.

Плата адаптера 6FSC08110, способная управлять параллельными модулями в корпусах EconoDUAL (2-6//IGBT) и PrimePACK (2-3//IGBT), представляет собой дальнейшее развитие концепции Master-Slave. Адаптер имеет волоконно-оптический интерфейс, он допускает подключение шести изолированных датчиков температуры NTC, что позволяет контролировать рабочую температуру модулей и осуществлять их защиту в режиме реального времени. Основные параметры драйвера 4FSC08110 приведены в таблице 3.

## Силовые сборки

### Трехуровневые инверторы, однофазные сборки

Основным преимуществом трехуровневой схемы с фиксированной нейтралью (3L NPC) является низкий коэффициент гармоник выходного тока, благодаря чему можно существенно упростить выходной фильтр или вообще отказаться от него. Транзисторы и диоды 3L-преобразователя работают при половинном напряжении DC-шины, поэтому он может быть построен на ключах меньшего класса напряжения (например, 600 вместо



**Рис. 3.** Драйвер 4FSC08110 для управления двумя-четырьмя параллельными модулями в конструкции EconoDual — реализация концепции Master-Slave



**Рис. 4.** Драйвер 6FSC08110 для управления параллельными модулями в конструкции EconoDual и PrimePACK

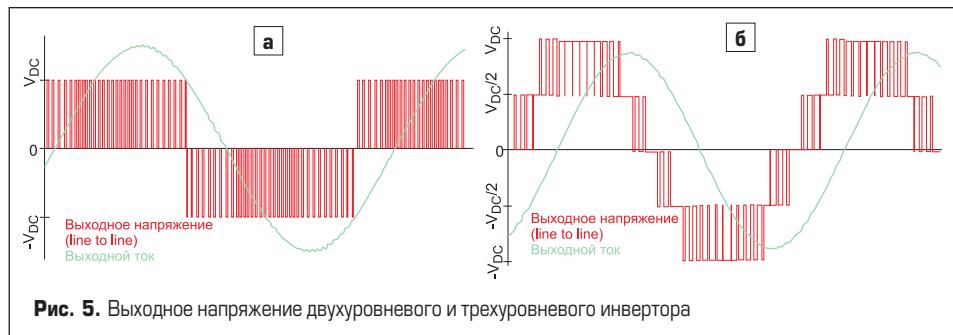


Рис. 5. Выходное напряжение двухуровневого и трехуровневого инвертора

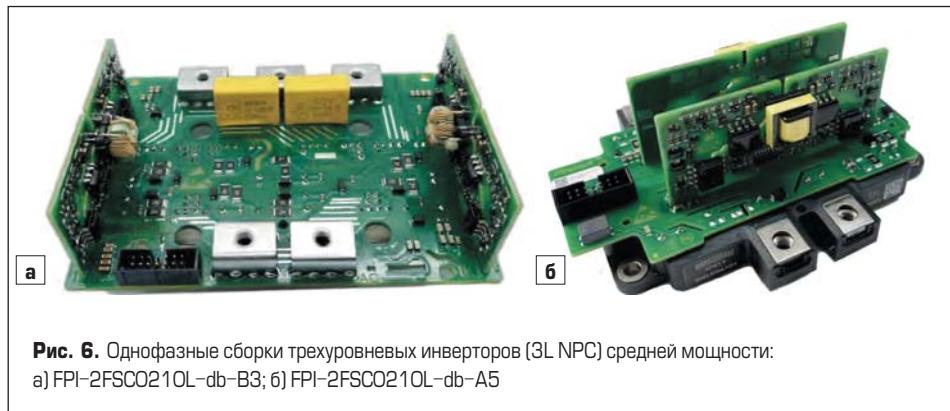
Рис. 6. Однофазные сборки трехуровневых инверторов (3L NPC) средней мощности:  
а) FPI-2FSC0210L-db-B3; б) FPI-2FSC0210L-db-A5

Таблица 4. Основные параметры 3L-сборок NPC-инверторов

Параметр	FPI-2FSC0210L-db-B3	FPI-2FSC0210L-db-A5
Конфигурация	3L NPC тип I (1 фаза)	
Выходная мощность, кВА	100	180
Номинальное напряжение/ток, В/А	380/150	690/150
Напряжение DC-шины, В	800	1600
Частота коммутации, кГц	20	
Функции защиты	SC, SSD, UVLO, FTP*	
Мониторинг температуры	2-канальный NTC-датчик, выход сигнала температуры, защита от перегрева	NTC-датчик выведен на разъем
Звено постоянного тока	Внешнее	Внешнее
Габаритные размеры, мм	140×108×54	140×104×60

Примечание.\* FTP (fault timing protection) — защита от неправильной последовательности импульсов управления.

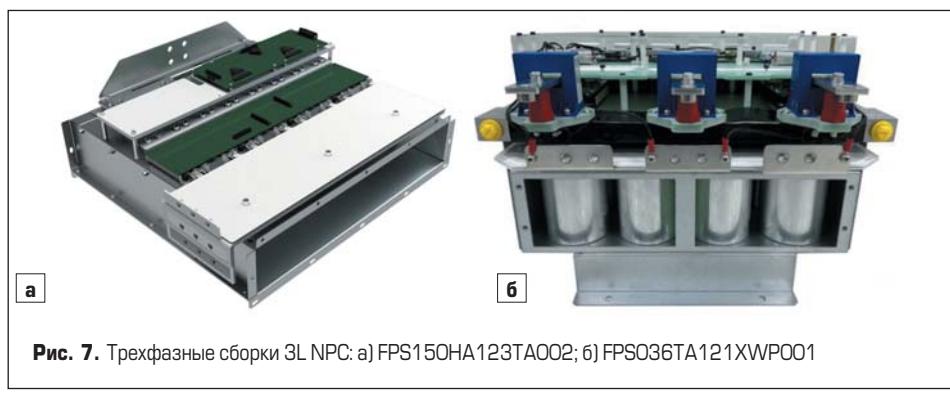


Рис. 7. Трехфазные сборки 3L NPC: а) FPS150HA123TA002; б) FPS036TA121XWP001

Таблица 5. Основные параметры трехфазных сборок

Параметр	FPS 150HA123TA002	FPS036TA121XWP001
Конфигурация	3L NPC тип I, 3 фазы (4-/IGBT на фазу)	ANPC, 3 фазы
Выходная мощность, МВт	1,725	
Номинальное напряжение/ток, В/А	690/1442	750/350
Напряжение DC-шины, В	1500	1600
Частота коммутации, кГц	3,5	3,5 кГц
Функции защиты	SC, SSD, UVLO, ITM, MLTO, IFC*	
Состав сборки	IGBT-модули на радиаторе, плата управления, DC-шина, AC-шина	
Габаритные размеры, мм	621×538×222	424×324×451

Примечание.\* ITM (intelligent timing management) — интеллектуальный контроль последовательности импульсов управления, MLTO (multi-level turn-off) — многоуровневый алгоритм отключения, IFC (intelligent fault communication) — интеллектуальный сигнал неисправности.

1200 В), отличающихся низким уровнем потерь и большей плотностью тока. Благодаря этому использование топологии 3L NPC дает возможность существенно повысить эффективность преобразования на высоких частотах.

Принцип работы многоуровневой схемы прост: низковольтные транзисторы или инверторные ячейки соединяются последовательно, поэтому напряжение питания устройства может быть выше рабочего напряжения отдельных ключей. Подобное решение позволяет сформировать многоступенчатый выходной сигнал, снизить уровень гармонических искажений и отказаться от дорогостоящих и громоздких выходных фильтров.

Очевидно, что при этом все IGBT должны управляться гальванически изолированными сигналами. В обычном инверторе, построенном на базе полумостовых каскадов, транзисторы подключают AC-выход поочередно к выводам звена постоянного тока, следовательно, выходное напряжение состоит из двух уровней ( $-V_{DC}$  и  $+V_{DC}$ , рис. 5а). В 3L-схеме коммутация выхода производится между потенциалами DC+, DC- и N, в результате формируется напряжение, содержащее три уровня (рис. 5б). Форма выходного сигнала приближается к синусоидальной, а значит, можно не только существенно снизить уровень гармонических искажений (THD) выходного тока, но и уменьшить негативное влияние на питающую сеть.

Трехуровневые преобразователи применяются в тех случаях, когда требуется максимальная отдача мощности при низком токе, высокая частота коммутации и минимальные требования к выходному фильтру, — альтернативная энергетика, источники питания, системы хранения энергии.

На рис. 6 и 7 показаны силовые сборки Firstack, предназначенные для реализации трехуровневых систем в широком диапазоне мощностей, а их основные параметры приведены в таблицах 4 и 5.

### Трехуровневые инверторы, трехфазные сборки высокой мощности

См. рис. 7 и таблицу 5.

### Заключение

Разработка устройств управления изолированными затворами — сложная и ответственная задача, которая во многом упрощается благодаря наличию «ядер» драйверов и заключенных устройств plug-and-play, обеспечивающих все необходимые функции.

Параллельное соединение силовых ключей используется для наращивания мощности в пределах определенного класса напряжения. Оно начинается на микроуровне в чипе, имеющем сотни тысяч IGBT-ячеек, и продолжается в модулях, содержащих несколько параллельных кристаллов. На схемном микроуровне увеличение мощности достигается параллельным соединением модулей в фаз-

ных стойках преобразователя или готовых инверторов [8].

Максимально эффективное использование силовых ключей достигается при идеальной статической (в течение периода проводимости) и динамической (в течение цикла коммутации) симметрии токов в параллельных цепях. Симметрия цепей управления также имеет крайне важное значение, поэтому возможность применения адаптеров, предназначенных для управления параллельными IGBT, заметно упрощает процесс проектирования.

## Литература

- Колпаков А., Новоторженцев Д. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Firstack // Силовая электроника. 2023. № 2.
- Хофштоттер Н. Параллельная работа IGBT при различных методах управления затворами // Силовая электроника. 2017. № 3.
- Хермвиль М., Колпаков А. Управление изолированным затвором // Электронные компоненты. 2008. № 6, 8.
- Крапп Й. Защитные функции современных драйверов IGBT // Силовая электроника. 2010. № 5.
- Крапп Й., Колпаков А. SKYPER 42 — развитие концепции ядра // Силовая электроника. 2011. № 1.
- Колпаков А. Цифровые драйверы и адаптеры нового поколения // Силовая электроника. 2020. № 2.
- Колпаков А. 3-L NPC-инвертор: управление, режимы работы, расчет параметров // Силовая электроника. 2016. № 3.
- Колпаков А. Параллельная работа IGBT при различных способах управления затворами // Силовая электроника. 2017. № 3.

## Изолированные нерегулируемые DC/DC-преобразователи от MEAN WELL для применения в медицинском оборудовании



Компания MEAN WELL представляет серии MDS01/02-N и MDD01/02-N DC/DC-преобразователей в корпусе SIP7. Новинки могут применяться в медицинском оборудовании, имеют улучшенные технические параметры

по сравнению с моделями предыдущих серий, в частности MDS01/02 и MDD01/02, и отличаются более доступной ценой. Предлагаемые устройства характеризуются уменьшенным током утечки < 2 мА, усиленной изоляцией 6000 В по постоянному напряжению 1×MOPP/2×MOOP, соответствующей медицинскому стандарту LVD IEC60601-1. Преобразователи будут востребованы в терминалах медицинского оборудования, где предъявляются повышенные требования к изоляции и пониженному току утечки. Подобные требования предусмотрены, в частности, для такой аппаратуры, как электроагуляционный нож в операционной, медицинский экран в операционной, монитор растворенного кислорода, медицинская тележка, оборудование для ухода за полостью рта и медицинского осмотра, и других приборов.

### Характеристики:

- пластиковый корпус SIP7 со стандартным расположением контактов;
- диапазон входного напряжения: ±10%;
- малый ток утечки: < 2 мА;
- изоляция между входом и выходом: 6000 В DC;
- расширенный диапазон рабочей температуры: -40...+95 °C;
- длительная защита от короткого замыкания на выходе;
- международные сертификаты: CB/UL/EAC/CE/UKCA;
- соответствие требованиям IEC60601-1 (1×MOPP/2×MOOP), ITC IEC/UL62368-1;
- габариты: 19,7×7,1×11,5 мм;
- гарантия: 3 года.

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

**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  
<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, НЭЭ

# Технология карбида кремния для рынка электронной мобильности.

Обеспечение электронной мобильности в небе, на суше, воде и железной дороге

**Следуя за электромобилями, новые транспортные рынки переходят к электронной мобильности (или e-мобильности) для достижения экологически чистого будущего, нейтрального к CO<sub>2</sub>. По всему миру появляются новые концепции электрифицированных транспортных средств — от коммерческих электромобилей до современных летательных аппаратов, судов дальнего плавания и высокоскоростных поездов.**

**Что же нужно для создания промышленной электронной мобильности? Новейшие технологии карбида кремния могут обеспечить надежное, эффективное и экономичное преобразование энергии и ее передачу.**

**др. Алексис Брайсон  
(Alexis Bryson)<sup>1</sup>**

**Музaffer Албайрак  
(Muzaffer Albayrak)<sup>1</sup>**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

Термин «электронная мобильность», или «e-мобильность», подразумевает использование электрической тяги для управления транспортным средством. Полупроводники с широкой запрещенной зоной, такие как карбид кремния, широко применяются в автомобильных инверто-

рах для управления передачей энергии от источника (например, аккумулятора или водородного топливного элемента) к электродвигателю. Хотя продукция Wolfspeed чаще всего ассоциируется с пассажирскими электромобилями (PEV), компания расширяет этот термин до «промышленной e-мобильности»,



**Рис. 1.** Примеры приложений промышленной электронной мобильности на наземном, воздушном, водном и железнодорожном рынках

охватывающей приложения на суще, в небе, на воде и на железной дороге, работающие на всех типах электрических платформ.

В то время как некоторые сегменты «промышленной е-мобильности» только зарождаются, в частности, например, электросамолеты вертикального взлета и посадки (eVTOL), другие, такие как электрифицированная железная дорога, уже хорошо зарекомендовали себя. Производители оборудования в каждом из указанных секторов работают над переходом от традиционных механических решений к электрифицированным системам, обладающим повышенной мощностью и эффективностью и отсутствием выбросов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ).

Коэффициент электрификации транспортных средств увеличивается во всех сегментах транспорта. В настоящее время 19% электромобилей [1], около 10% строительной и сельскохозяйственной техники [2], 1–2% водного транспорта [3] и 45% летательных аппаратов [4] полностью или частично электрифицированы. Ожидаемый рост этих сегментов с 2023 по 2030 год составляет 20% для электромобилей [5], 21,5% для строительной и сельскохозяйственной техники [6], 12,7% для водного транспорта [7] и 13% для авиационной техники [8] (рис. 1).

### Переход к промышленной электронной мобильности

Быстрый и повсеместный переход к электрификации транспортных средств обусловлен двумя основными движущими факторами.

#### Фактор #1. Глобальные цели по сокращению выбросов $\text{CO}_2$

На транспорт приходится 20% глобальных выбросов углекислого газа, достигающих примерно 7,6 Гт  $\text{CO}_2$  в год [9]. В первую очередь это связано со сжиганием дизельного топлива и бензина в транспортных средствах с двигателями внутреннего горения (ДВС). Хотя легковые автомобили и микроавтобусы являются основным источником выбросов, грузовые перевозки, судоходство, авиация и железная дорога также вносят свой вклад в общее негативное воздействие на окружающую среду.

Поэтому во всем мире вводятся все более строгие правила (и предлагаются новые стимулы) для ограничения выбросов и ускорения производства экологически чистого транспорта. Эти правила направлены на сокращение выбросов парниковых газов в рамках определенных сегментов транспорта. Например, инициатива EPA по грузовым автомобилям в США, документ PE-CONS 60/19 в Евросоюзе и VI Топливных стандартов в Китае устанавливают нормы выбросов  $\text{CO}_2$  для новых легких и тяжелых строительных и сельскохозяйственных машин.

Кроме того, Международная морская организация (International Maritime Organization, IMO) ввела в действие правила по сокращению выбросов парниковых газов, в частности документ MEPC 80 (Marine Environment

Protection Committee), ставящий целью уменьшение эмиссии  $\text{CO}_2$  при международных перевозках на 40% [10]. Проектный индекс энергоэффективности (Energy Efficiency Design Index) требует достижения максимального уровня энергоэффективности для различных типов и размеров судов. Это соответствует 30% сокращению выбросов  $\text{CO}_2$  в новых проектах в 2025 году по сравнению со средним показателем за 2000–2010 годы [11].

Другие организации, включая Международную организацию гражданской авиации (International Civil Aviation Organization), Агентство авиационной безопасности Европейского союза (European Union Aviation Safety Agency), Федеральное управление гражданской авиации (Federal Aviation Administration) и Управление гражданской авиации Китая (Civil Aviation Administration of China), также устанавливают стандарты по загрязнениям, создаваемым воздушными судами.

Для сокращения выбросов и выполнения требований указанных правил рынкам электротранспорта необходимо постоянное повышение энергоэффективности.

#### Фактор #2. Разработка новых силовых полупроводников

Промышленные системы электронной мобильности требуют надежных и эффективных решений для работы с высокими напряжениями и токами в сложных условиях окружающей среды. По сравнению с традиционными кремниевыми полупроводниками новые приборы на основе карбида кремния обеспечивают более высокие частоты переключения и большую плотность мощности в широком диапазоне рабочих температур — все это необходимо для новых промышленных приложений электронной мобильности.

Выпуск компанией Wolfspeed новых SiC MOSFET-транзисторов, сертифицированных для автомобильной промышленности (AEC-Q101), позволил производителям активно заменять ДВС на электрический привод. В 2019 году выпуск SiC-модулей повышенной мощности семейства XM3 дал старт разработке быстрых зарядных станций постоянного тока, обеспечивающих полный заряд батареи менее чем за 4 мин, что сделало внедрение электромобилей более привлекательным и доступным для потребителей.

Производители автомобилей, в частности General Motors, Lucid Motors, Jaguar Land Rover, Mercedes, а также ведущие китайские фирмы объявляют о планах выпуска EV следующего поколения (включая переход системы питания с 400 на 800 В). Разработчики промышленных приложений электронной мо-

бильности внимательно следят за этими процессами, в особенности новыми технологиями карбида кремния с более высокой плотностью мощности и эффективностью, обеспечивающими увеличение пробега наряду со снижением стоимости системы и повышением ее долгосрочной надежности.

### Рынок промышленной е-мобильности: водные транспортные средства

Рассмотрим подробнее, как преимущества технологии карбида кремния могут быть использованы в новых разработках электрических водных транспортных средств, начиная от гидроциклов и яхт и заканчивая пассажирскими паромами, водными такси, портовыми судами, грузовыми судами, танкерами и подводными лодками.

### Полумостовой модуль с высокой плотностью мощности

Цель разработки платформы XM3 — максимальное использование преимуществ SiC-технологии при сохранении стандартной конструкции модуля и обеспечении надежности, простоты и экономичности системы. При вдвое меньшем весе и объеме по сравнению с конструктивом 62 мм, модули XM3 имеют более высокую плотность мощности при минимальной индуктивности контура коммутации и простоте подключения силовых шин. Оптимизированная конструкция корпуса обеспечивает долговременную надежность при температуре чипов до +175 °C, а высоконадежная подложка из нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) гарантирует механическую прочность в экстремальных условиях применения.

Компоненты платформы XM3 оптимальны для таких сложных приложений, как промышленные тяговые инверторы систем электронной мобильности, в частности водные транспортные средства. Их применение дает возможность повысить плотность мощности без увеличения размера системы — например, инвертор 200 кВт с модулями CAB400M12XM3 может быть заменен на инвертор 300 кВт на основе CAB450M12XM3.

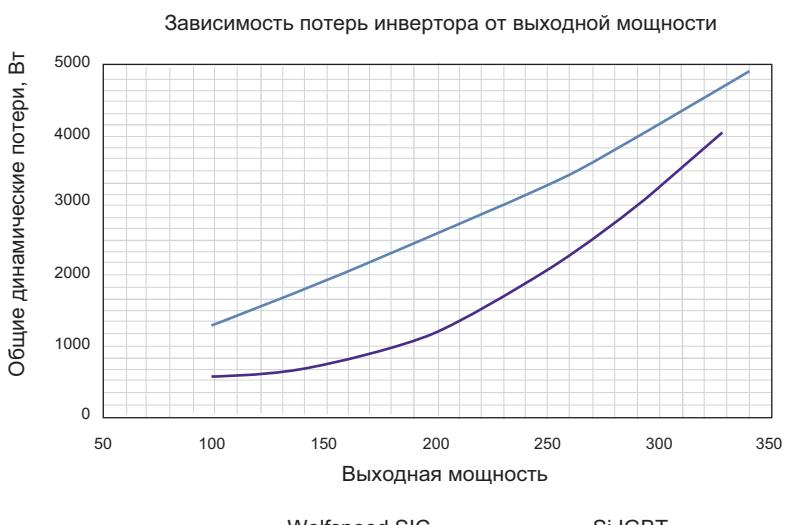
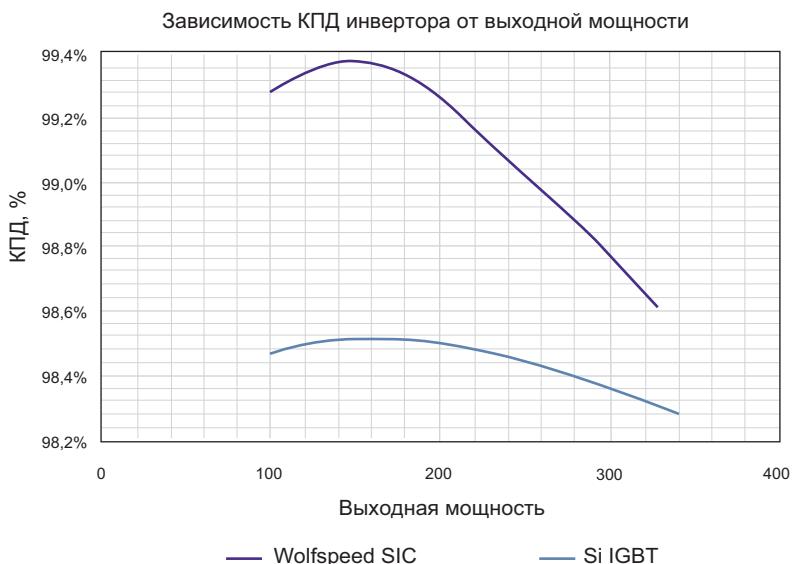
Для сравнения возможностей SiC MOSFET и Si IGBT был использован эталонный трехфазный инвертор мощностью 200 кВт с силовыми модулями XM3. Устройство содержит полный набор компонентов: силовые модули, систему охлаждения, DC- и AC-шины, драйверы, датчики напряжения/тока и управляющий контроллер. Для моделирования и оценки режимов работы инвертора использовался

Таблица 1. Семейство силовых модулей SiC MOSFET XM3

Тип модуля	Схема	Номинальное напряжение $V_C$ , В	Номинальный ток $I_C$ , А	$R_{DS(on)}$ , МОм, +25°C	$T_{j,\max.}$ , °C	Рынок
CAB320M17XM3	Полумост	1700	320	3,5	175	Общепром.
CAB400M12XM3	Полумост	1200	400	5	175	Общепром.
CAB425M12XM3	Полумост	1200	425	3,2	175	Общепром.
CAB450M12XM3	Полумост	1200	450	2,6	175	Общепром.
EAB450M12XM3	Полумост	1200	450	2,6	175	Автомобильный

**Таблица 2.** Сравнение SiC-инверторов мощностью 200 и 300 кВт

Основные параметры	Инвертор 200 кВт CRD200DA12E-XM3	Инвертор 300 кВт CRD300DA12E-XM3
Вес, кг	6,2	6,2
Плотность мощности, кВт/л	21,7	32,
Эффективность, %	98,28	98,3

**Рис. 2.** Силовой модуль SiC MOSFET XM3**Рис. 3.** Трехфазный инвертор 200 кВт на модулях XM3**Рис. 4.** Сравнение расчетной эффективности и динамических потерь силового модуля SiC MOSFET (CAB400M12XM3) и Si IGBT в инверторе 200 кВт ( $V_{dc} = 800$  В) водного транспортного средства

программный пакет SpeedFit Design Simulator и форум Wolfspeed Power Applications Forum. Процесс оценки включал в себя следующие этапы:

- сравнение эффективности инвертора в зависимости от выходной мощности;
- сравнение потерь инвертора в зависимости от выходной мощности.

Как показали испытания, устройство на основе карбида кремния обеспечивает более высокую мощность, КПД, меньшие потери переключения и более высокую частоту коммутации при снижении массогабаритных показателей.

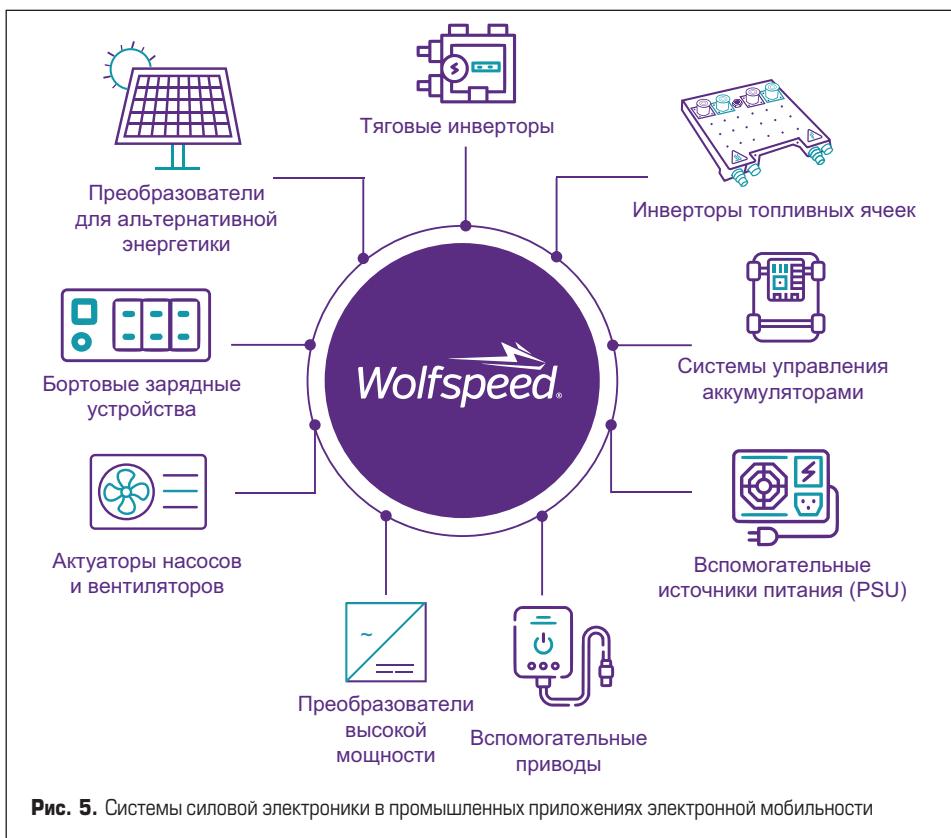
#### Электрификация всех компонентов промышленной электронной мобильности

В дополнение к тяговым инверторам батарейных электромобилей (BEV) и инверторам электромобилей на топливных элементах (FCEV) промышленные приложения электронной мобильности могут интегрировать компоненты силовой электроники в системы управления батареями (BMS), вспомогательные источники питания, вспомогательные силовые приводы, приводы насосов и вентиляторов (системы HVAC), а также бортовые зарядные устройства. Электрификация любой из систем сокращает количество механических компонентов по сравнению с автомобилями с ДВС, способствует повышению их эффективности, снижению веса и общей стоимости владения.

Замена механических узлов автомобиля на электрифицированные уменьшает общее энергопотребление, сокращает уровень выбросов и продлевает срок службы системы за счет снижения потерь, повышения плотности мощности, улучшения показателей надежности и безотказности. Какие именно системы больше всего выигрывают от электрификации, зависит от условий эксплуатации систем электронной мобильности, включая колебания температуры, вибрационные нагрузки, высокую влажность и другие климатические воздействия. Например, в дополнение к тяговому инвертору водный транспорт может оснащаться электрическими лифтами, кранами, якорными лебедками и системами автоматизации.

Многие системы, используемые в наземных транспортных средствах, от небольших вилочных погрузчиков до карьерных самосвалов, также могут быть электрифицированы. Например, электрические приводы отбора мощности (ePTO) способны снизить нагрузку на основной тяговый инвертор в тяжелых строительных и сельскохозяйственных машинах за счет распределения мощности для выполнения вспомогательных функций. Инверторы меньшей мощности могут заменить существующие системы с механическим приводом, такие как вентиляторы, насосы, актуаторы (HVAC) и системы терморегулирования.

В усовершенствованных аэромобильных приложениях могут использоваться небольшие эффективные электронные системы,



позволяющие снизить вес и сэкономить пространство внутри транспортных средств, где соотношение размеров, веса и мощности (SWaP — size, weight, and power) имеет критически важное значение. Электрические приводы спойлеров, контроллеры питания, автоматические выключатели, противообледенительные системы и т. п. — вот примеры ключевых устройств, используемых на авиационном транспорте. Снижение массогабаритных показателей, достигаемое за счет интеграции силовой электроники в такие вспомогательные системы, дает возможность увеличить дальность полета и/или грузоподъемность.

Электронные системы на региональных и высокоскоростных поездах, а также в метро работают от высоковольтной контактной сети, распределемой по воздушным (или подземным) линиям. На железнодорожном транспорте также предусмотрены электроприводы для управления дверями, системы торможения и рекуперации энергии в аккумуляторные батареи и сети. Для работы этих устройств нужны надежные и эффективные силовые полупроводниковые приборы, преобразующие электрическую энергию. Карбид кремния — лучшая в своем классе технология, способная работать в широком диапазоне напряжений, требуемых не только

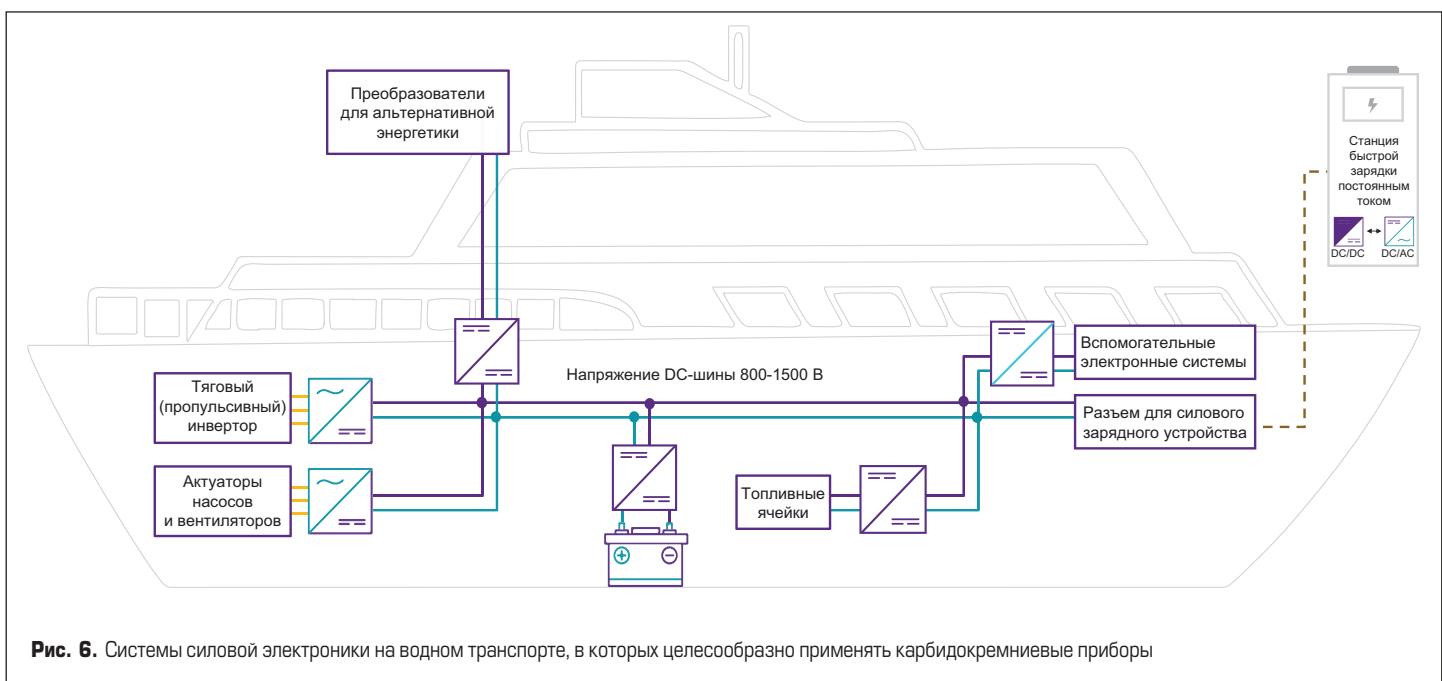
для основного инвертора, но и для широкого спектра вспомогательных источников питания и приводов, используемых в промышленных системах электронной мобильности.

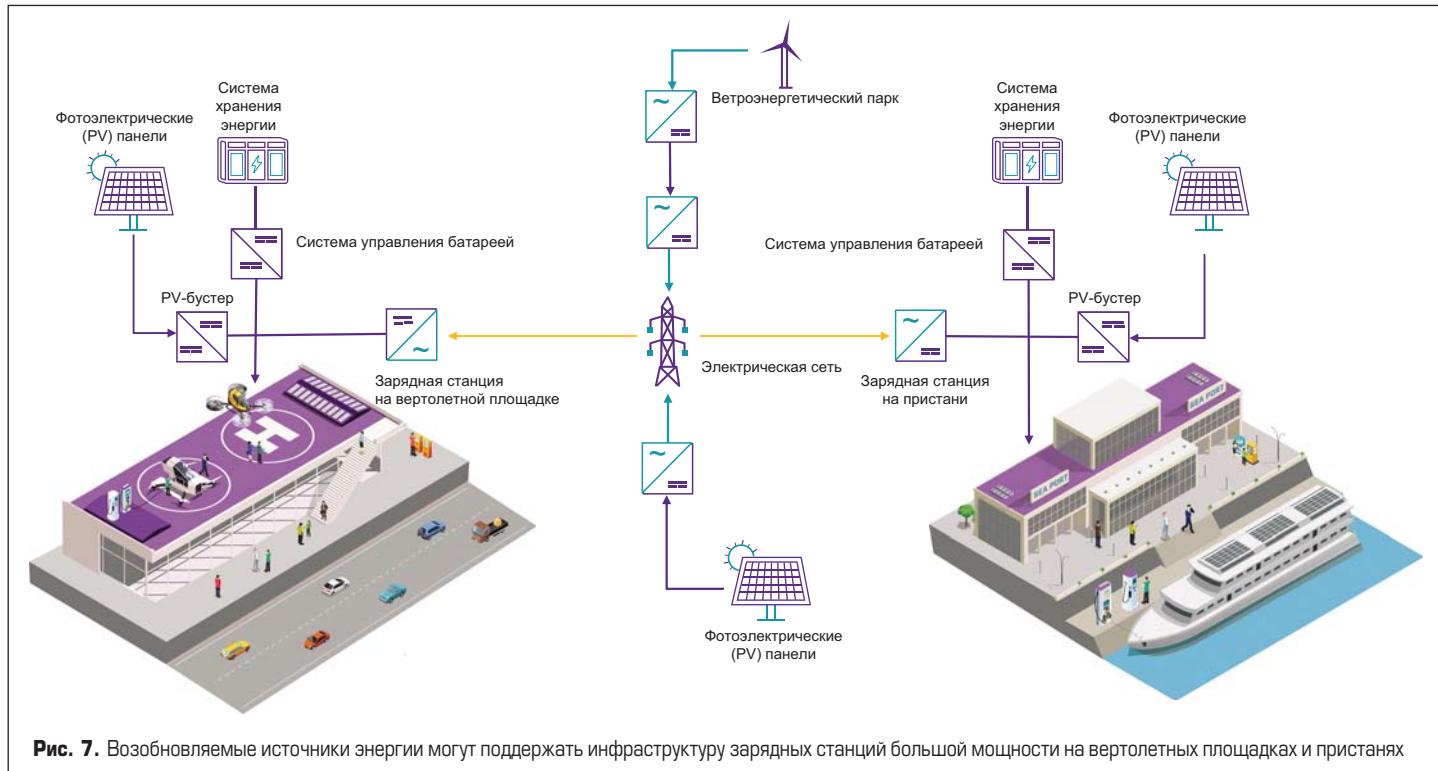
### Проблемы промышленной электронной мобильности

Две самые серьезные проблемы для будущего промышленной электронной мобильности — это источники энергии и инфраструктура. Всем электромобилям нужен источник энергии, как правило, аккумулятор или водородное топливо, и промышленность уже осознала растущий спрос на то и другое. По данным Международного энергетического агентства, с 2023 по 2030 год производство аккумуляторных батарей должно увеличиться на 400% [12], а производство водорода — более чем на 18% [13].

В дополнение к все большему количеству батарей для EV, промышленная е-мобильность требует разработки более мощных аккумуляторов для повышения плотности энергии в заданных габаритах (Вт·ч/кг). Батареи с высокими показателями Вт·ч/кг нужны для транспортных средств с инверторами большой мощности, такими как тяжелые строительные машины и грузовые суда. Развитие рынка аккумуляторов и водорода критически важно для будущего промышленной электронной мобильности.

Решающее значение имеет и развитие инфраструктуры, то есть зарядных станций высокой мощности, электросетей с большой пропускной способностью и станций заправки водородом. Региональные и местные органы власти развивают сеть зарядных станций для роста рынка PEV, но расширение, масштабирование и поддержание эффективной, быстрой и мощной инфраструктуры — это серьезная задача, над которой еще предстоит работать. Например, массовое внедрение электромобилей невозможно без повсеместной установки придорожных суперзарядников.





**Рис. 7.** Возобновляемые источники энергии могут поддержать инфраструктуру зарядных станций большой мощности на вертолетных площадках и пристанях

В отношении дальнемагистральных грузовиков это означает внедрение технологии мегаваттной зарядки MCS (Megawatt Charging System), для региональных автобусов — установку зарядных станций в депо, для электросудов нужны зарядные станции в портах, а для электросамолетов и вертолетов — в аэропортах.

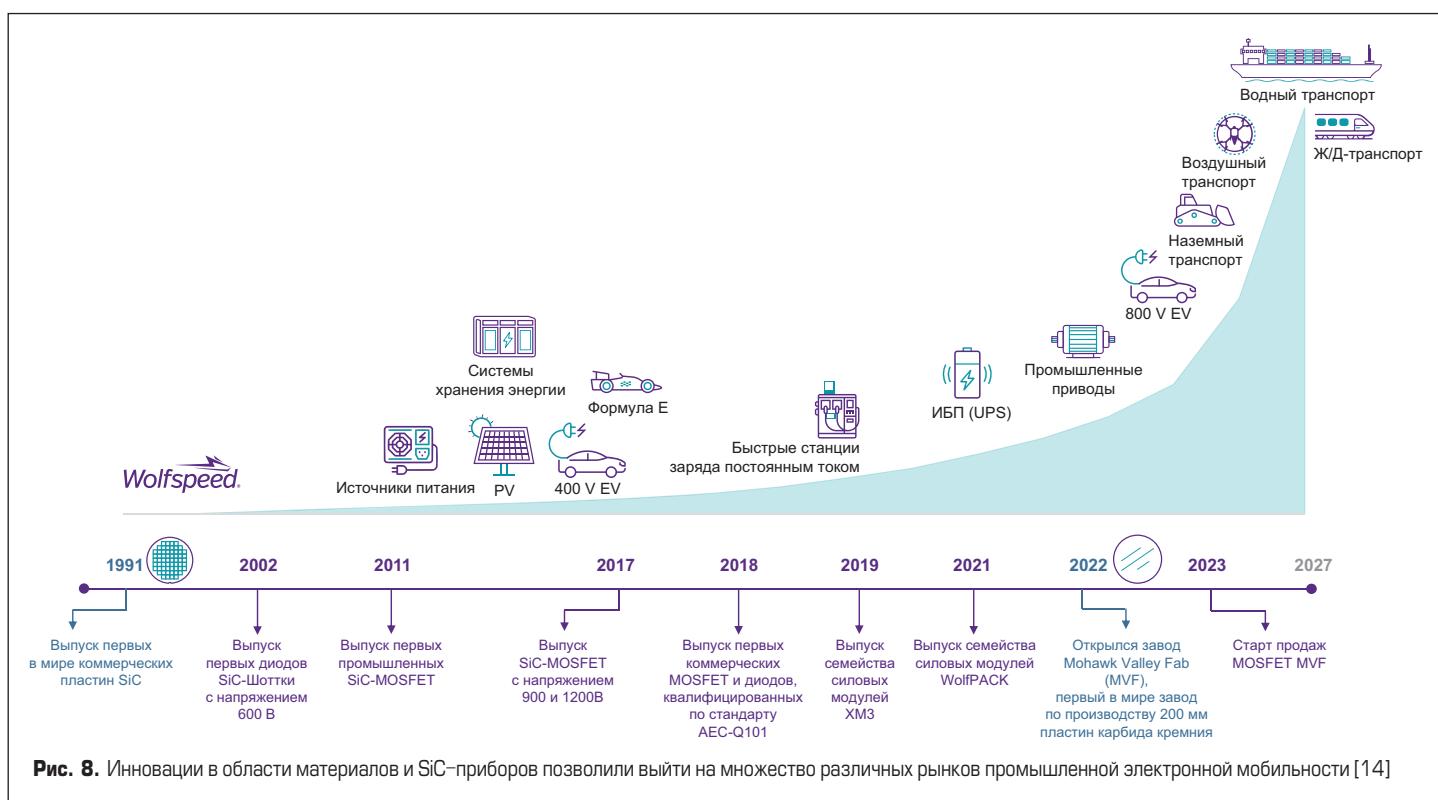
### Долгосрочные прогнозы по отрасли

Ожидается, что в ближайшие годы значительная доля рынка карбидокремниевых при-

боров будет приходиться на промышленные и энергетические приложения, включая промышленную электронную мобильность. Более 35 лет Wolfspeed занимается производством вертикально интегрированных пластин SiC и высококачественных силовых модулей в рамках мирового тренда по энергосбережению. Наработка SiC-приборов Wolfspeed в полевых условиях превысила 12 трлн ч. На сегодня свыше 60% мирового объема карбида кремния производится этой компанией, готовой оптимизировать компоненты для конкретных требований электронной мобильности.

### Литература

- EV expansion means new prospects for silicon carbide|McKinsey. [www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/new-silicon-carbide-prospects-emerge-as-market-adapts-to-ev-expansion](http://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/new-silicon-carbide-prospects-emerge-as-market-adapts-to-ev-expansion)
- Global Truck, Bus and Off-highway Vehicle Electrification and Alternative Fuel (Free Report) - Interact Analysis. [www.interactanalysis.com/research/global-truck-bus-and-off-highway-vehicle-electrification-and-alternative-fuel/](http://www.interactanalysis.com/research/global-truck-bus-and-off-highway-vehicle-electrification-and-alternative-fuel/)



**Рис. 8.** Инновации в области материалов и SiC-приборов позволили выйти на множество различных рынков промышленной электронной мобильности [14]

3. [www.idtechex.com/en/research-report/electric-boats-and-ships-2017–2027/509](http://www.idtechex.com/en/research-report/electric-boats-and-ships-2017–2027/509)
4. [www.nrel.gov/docs/fy22osti/80220.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80220.pdf)
5. EV expansion means new prospects for silicon carbide! McKinsey. [www.mckinsey.com/industries/semicconductors/our-insights/new-silicon-carbide-prospects-emerge-as-market-adapts-to-ev-expansion](http://www.mckinsey.com/industries/semicconductors/our-insights/new-silicon-carbide-prospects-emerge-as-market-adapts-to-ev-expansion)
6. [www.fnfresearch.com/off-highway-electric-vehicle-market](http://www.fnfresearch.com/off-highway-electric-vehicle-market)
7. [www.mordorintelligence.com/industry-reports/electric-boat-and-ship-market](http://www.mordorintelligence.com/industry-reports/electric-boat-and-ship-market)
8. [www.marketresearchcommunity.com/electric-aircraft-market?gad=1&glid=CjwKCAjwqZSlBhBwEiwAfoZUIFbn7za7Rn-DX9M6SUwd5IC6WFMRhE8Qig0qAuZsRfeq9m4QgeVOOxoC7QcQAvD\\_BwE](http://www.marketresearchcommunity.com/electric-aircraft-market?gad=1&glid=CjwKCAjwqZSlBhBwEiwAfoZUIFbn7za7Rn-DX9M6SUwd5IC6WFMRhE8Qig0qAuZsRfeq9m4QgeVOOxoC7QcQAvD_BwE)
9. Transportation emissions worldwide — statistics & facts | Statista. [www.statista.com/topics/7476/transportation-emissions-worldwide/#topicOverview](http://www.statista.com/topics/7476/transportation-emissions-worldwide/#topicOverview)
10. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships [www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx#:~:text=The%202023%20IMO%20GHG%20Strategy%20envisages%2C%20in%20particular%2C%20a%20reduction,at%20least%2040%25%20by%202030](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx#:~:text=The%202023%20IMO%20GHG%20Strategy%20envisages%2C%20in%20particular%2C%20a%20reduction,at%20least%2040%25%20by%202030)
11. [www.sustainable-ships.org](http://www.sustainable-ships.org)
12. World Energy Outlook 2022. Analysis. IEA. [www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022](http://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022).
13. Global Hydrogen Review 2023. Analysis. IEA. [www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023](http://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023) Chart based on Yole Power SiC 2023 Market and Technology Report and Wolfspeed/innovation timeline

## Новое семейство операционных усилителей NSOPA905x с напряжением питания до 40 В от компании Novosense



Компания Novosense сообщает о начале массового производства семейства микросхем NSOPA905x (NSOPA9051, NSOPA9052 и NSOPA9054) — высоковольтных операционных усилителей общего назначения с напряжением питания до 40 В. Микросхемы обеспечивают высокую точность статических и динамических параметров, включая размах входного/выходного сигнала, низкое напряжение смещения ( $\pm 200$  мкВ, тип.), малый

дрейф напряжения смещения ( $\pm 0,5$  мкВ/ $^{\circ}\text{C}$ , тип.), низкий уровень шума ( $10,5$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$  и  $6$  мкВ пик-пик) и полосу пропускания  $6$  МГц.

Уникальные особенности, такие как широкий диапазон дифференциального и синфазного входного напряжения до шины питания, большой выходной ток ( $65$  мА), высокая скорость нарастания напряжения ( $25$  В/мкс), высокая емкость нагрузки ( $1$  нФ) и функция отключения, делают NSOPA905x надежным и высокоэффективным устройством, предназначенным для высоковольтных промышленных применений.

Ключевые особенности:

- высокая скорость нарастания:  $25$  В/мкс (тип.);
- низкое напряжение смещения:  $200$  мкВ (тип.);
- низкий дрейф напряжения смещения:  $\pm 0,5$  мкВ/ $^{\circ}\text{C}$  (тип.);
- диапазон дифференциального и синфазного входного напряжения до шины питания;

- низкий ток потребления:  $600$  мкА на усилитель;
- широкий диапазон напряжения питания:  $\pm 1,35... \pm 20$  В,  $2,7$ – $40$  В;
- встроенные ЭМИ-фильтры на входе и на шине питания;
- корпус: SOT-23 (5), SOIC (8), MSOP (8), SOP (14), TSSOP (14).

Области применения:

- маломощный предварительный аудиоусилитель;
- мультиплексные системы сбора данных;
- испытательное и измерительное оборудование;
- драйверы АЦП;
- опорные буферы SAR АЦП;
- программируемые логические контроллеры;
- измерение тока нижнего и верхнего плеча.

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

## Компоненты для силового оборудования компании Rongtech

### СИЛОВЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА:

- мощные полевые (gan/si/sic mosfet) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (igbt);
- si/sic диоды: выпрямительные, диоды шоттки;
- мощные и высоковольтные плёночные резисторы;
- промышленные конденсаторы для цепей постоянного и переменного тока высокой ёмкости;

### СИЛОВЫЕ МОДУЛИ

на основе кристаллов мощных диодов и транзисторов IGBT/MOSFET/SiC MOSFET, в т. ч. со встроенным драйвером (IPM)

### ДАТЧИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Заказные и полузацисные AC/DC и DC/DC-преобразователи

### ВЕНТИЛЯТОРЫ И РАДИАТОРЫ ОХЛАЖДЕНИЯ



### Компания КВЕСТ

Тел.: +7 (812) 913-27-55  
E-mail: [info@icquest.ru](mailto:info@icquest.ru)  
[www.icquest.ru](http://www.icquest.ru)



Rongtech

# Датчики тока от Rongtech

**В статье рассмотрены характеристики датчиков тока китайской компании Rongtech, изготовленные по технологиям компенсационного типа с замкнутым контуром (Close Loop) и с разомкнутым контуром (Open Loop).**

**Михаил Пушкарев**

info@icquest.ru

Китайская компания Rongtech начала свою деятельность в 2001 году и позиционирует себя как разработчика и производителя компонентов для силового оборудования. В линейке продукции компании представлены датчики тока и напряжения, высоковольтные трансформаторы тока и напряжения, модули преобразователей переменного (постоянного) тока в постоянный ток.

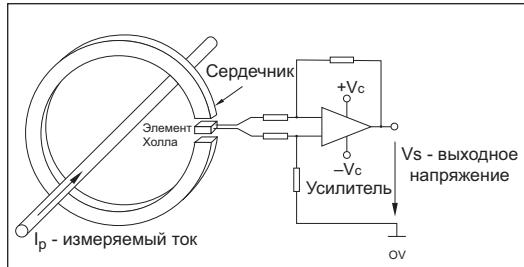
Современное промышленное оборудование и бытовая техника оснащаются устройствами, позволяющими контролировать процессы в электрических цепях и эффективно управлять ими. Преобразовать токи и напряжения в удобные для дальнейшей обработки управляющей электроникой сигналы с гальванической развязкой от силовых цепей позволяют датчики тока и напряжения.

Эти устройства применяются в электроприводах прокатных станов, подъемных кранов, печатных машин, насосов, стиральных машин и холодильников. С их помощью по всей сложной цепи контролируется процесс преобразования энергии ветра в электричество. Все средства передвижения на электрической тяге, в том числе и с питанием от аккумуляторов, в составе привода используют датчики. Источники бесперебойного питания и инверторные сварочные

аппараты содержат такие устройства. Далее речь пойдет о наиболее востребованных устройствах — датчиках тока.

Компания Rongtech предлагает большую номенклатуру датчиков тока, изготавливаемых по нескольким технологиям [1].

На рис. 1 схематически изображено устройство датчика по технологии Open Loop, характеристики датчиков приведены в таблице 1. В немагнитном зазоре сердечника, изготовленного из материала с большой магнитной проницаемостью, размещен



**Рис. 1.** Устройство датчика тока по технологии Open Loop

**Таблица 1.** Датчики тока по технологии Open Loop (прямого усиления)

Условное обозначение	$I_{PN}$ , А	$I_p$ , А	$V_{OUT}$ при $\pm I_{PN}$	Погрешность, %	$V_s$ , В	Частотный диапазон, кГц	Время отклика, мкс (50 А/мкс, 10–90%), не более	$T_A$ , °C
RTO10LSR508	10	$\pm 25$	$2,5 \pm 0,8$ В	$\pm 2,5$	5	DC–30 (–3 дБ)		$-40...+105$
RTO15LSR508	15	$\pm 40$						
RTO20LSR508	20	$\pm 50$						
RTO25LSR508	25	$\pm 62,5$						
RTO32LSR508	32	$\pm 80$						
RTO40LSR508	40	$\pm 100$						
RTO50LSR508	50	$\pm 125$						
RTO60LSR508	60	$\pm 150$						
RTO20DHR420	$\pm 20$	$\pm 120$	4 мА при $-I_{PN}$	$\pm 0,5$	20–30	DC–6 (–3 дБ)		$-40...+85$
RTO50DHR420	$\pm 50$	$\pm 120$						
RTO100DHR420	$\pm 100$	$\pm 600$						
RTO200DHR420	$\pm 200$	$\pm 600$						
RTO300DHR420	$\pm 300$	$\pm 1000$						
RTO400DHR420	$\pm 400$	$\pm 1000$	20 мА при $I_{PN}$					$-40...+85$
RTO500DHR420	$\pm 500$	$\pm 1500$						
RTO600DHR420	$\pm 600$	$\pm 1500$						
RTO1000DHR420	$\pm 1000$	$\pm 1500$						
RTO30K1T5	$\pm 30$	$\pm 60$						
RTO50K1T5	$\pm 50$	$\pm 100$	$2,5 \pm 1$ В	$\pm 1$	5		5	$-40...+85$
RTO100K1T5	$\pm 100$	$\pm 200$						
RTO200K1T5	$\pm 200$	$\pm 400$						

Таблица 1. Датчики тока по технологии Open Loop (прямого усиления) (продолжение)

Условное обозначение	$I_{PN}$ , А	$I_p$ , А	$V_{OUT}$ $I_{OUT}$ при $\pm I_{PN}$	Погрешность, %	$V_s$ , В	Частотный диапазон, кГц	Время отклика, мкс (50 А/мкс, 10–90%), не более	$T_A$ , °C
RTO300K1T5	±300	±600	2,5 ± 1 В	±1	5		5	−40...+85
RTO400K1T5	±400	±800						
RTO500K1T5	±500	±1000						
RTO30K1	±30	±60						
RTO50K1	±50	±100						
RTO100K1	±100	±200						
RTO200K1	±200	±400						
RTO300K1	±300	±600	±4 В	±1	±15		5	−40...+85
RTO400K1	±400	±800						
RTO500K1	±500	±1000						
RTO50G3 <sup>1</sup>	±50	±150						
RTO100G3	±100	±300						
RTO150G3	±150	±450						
RTO200G3	±200	±600						
RTO50LB	±50	±150	±4 В	±1,5	±15	DC-50 (−3 дБ)	3	−40...+85
RTO75LB	±75	±150						
RTO100LB	±100	±200						
RTO150LB	±150	±300						
RTO200LB	±200	±400						
RTO300LB	±300	±450						
RTO50E	±50	±150						
RTO75E	±75	±225	±4 В	±1	±15		3	−40...+85
RTO100E	±100	±300						
RTO150E	±150	±450						
RTO200E	±200	±600						
RTO300E	±300	±900						
RTO400E	±400	±1000						
RTO500E	±500	±1000						
RTO50B	±50	±150	±4 В	±1	±15		3	−40...+85
RTO75B	±75	±225						
RTO100B	±100	±300						
RTO200B	±200	±600						
RTO300B	±300	±900						
RTO400B	±400	±900						
RTO500B	±500	±900						
RTO600B	±600	±900	2,5 ± 1,25 В	±1	5		3	−40...+105
RTO50TF512	±50	±75						
RTO100TF512	±100	±150						
RTO200TF512	±200	±300						
RTO300TF512	±300	±450						
RTO400TF512	±400	±600						
RTO800TF512	±800	±1200						
RTO50BHS52	±50	±56	2,5 ± 2 В	±0,5	5	DC-30 (−3 дБ)		−40...+105
RTO100BHS52	±100	±112						
RTO200BHS52	±200	±225						
RTO300BHS52	±300	±337						
RTO500BHS52	±500	±562						
RTO600BHS52	±600	±675						
RTO800BHS52	±800	±900						
RTO1000BHS52	±1000	±1000	0,5–4,5 В	±0,5	5	DC-30 (−3 дБ)		−40...+125
RTO1200BHS52	±1200	±1200						
RTO1500BHS52	±1500	±1500						
RTO100HC5F	100	±110						
RTO200HC5F	200	±220						
RTO300HC5F	300	±330						
RTO500HC5F	500	±550						
RTO600HC5F	600	±660	2,5 ± 2 В	±0,5	5	DC-20 (−3 дБ)		−40...+125
RTO800HC5F	800	±880						
RTO900HC5F	900	±900						
RTO100ASA52	±100	±110						
RTO200ASA52	±200	±220						
RTO300ASA52	±300	±330						
RTO400ASA52	±400	±440						
RTO600ASA52	±600	±660						

Таблица 1. Датчики тока по технологии Open Loop (прямого усиления) [продолжение]

Условное обозначение	$I_{PN}$ , А	$I_P$ , А	$V_{OUT}$ при $I_{OUT}$ при $\pm I_{PN}$	Погрешность, %	$V_s$ , В	Частотный диапазон, кГц	Время отклика, мкс (50 А/мкс, 10–90%), не более	$T_A$ , °C
RTO800ASA52	±800	±880	2,5 ±2 В	±0,5	5	DC–20 (–3 дБ)		–40...+125
RTO1000ASA52	±1000	±1100						
RTO100F	±100	±300						
RTO200F	±200	±400						
RTO400F	±400	±800						
RTO500F	±500	±1000						
RTO600F	±600	±1200						
RTO800F	±800	±1600						
RTO1000F	±1000	±2000						
RTO2000F	±2000	±3000						
RTO200K2	±200	±400						
RTO400K2	±400	±800						
RTO600K2	±600	±1200						
RTO800K2	±800	±1600						
RTO1000K2	±1000	±2000						
RTO2000K2	±2000	±4000						
RTO200HT	±200	±600						
RTO400HT	±200	±1200						
RTO500HT	±500	±1500						
RTO600HT	±600	±1800						
RTO750HT	±750	±2250						
RTO800HT	±800	±2400						
RTO1000HT	±1000	±3000						
RTO1500HT	±1500	±3000						
RTO2000HT	±2000	±4500						
RTO400DR352 <sup>1</sup>	400	±400						
RTO500DR352	500	±500						
RTO600DR352	600	±600						
RTO800DR352	800	±800						
RTO900DR352	900	±900						
RTO1000DR352	1000	±1000						
RTO400KR2	±400	0–600						
RTO600KR2	±600	0–900						
RTO800KR2	±800	0–1200						
RTO1000KR2	±1000	0–1500						
RTO1500KR2	±1500	0–2000						
RTO400K	±400	±800						
RTO600K	±600	±1200						
RTO800K	±800	±1600						
RTO1000K	±1000	±2000						
RTO1200K	±1200	±2400						
RTO1600K	±1600	±3000						
RTO2000K	±2000	±3000						
RTO2500K	±2500	±4000						
RTO3000K	±3000	±4500						
RTO500HAX	±500	±1500						
RTO600HAX	±600	±1800						
RTO800HAX	±800	±2400						
RTO1000HAX	±1000	±3000						
RTO1500HAX	±1500	±4500						
RTO2000HAX	±2000	±6000						
RTO2500HAX	±2500	±6000						
RTO3000HAX	±3000	±6000						
RTO5000HAX	±5000	±10000						
RTO1000HB	±1000	±2000						
RTO2000HB	±2000	±6000						
RTO3000HB	±3000	±9000						
RTO5000HB	±5000	±10000						
RTO8000HB	±8000	±16000						
RTO10000HB	±10000	±20000						
RTO20000HB	±20000	±30000						

элемент Холла. Измеряемый ток, протекающий по первичной обмотке (проводнику), вызывает изменение магнитного потока в сердечнике. Выходной сигнал элемента Холла, пропорциональный изменившемуся магнитному потоку, усиливается и нормализуется электронной схемой.

Устройство датчика по технологии Close Loop с использованием датчика Холла показано на рис. 2, характеристики датчиков перечислены в таблице 2. Как и в классическом трансформаторе тока, на сердечнике размещается вторичная обмотка в несколько тысяч витков. Схема с элементом Холла и усилителем корректирует выходной ток таким образом, чтобы суммарный магнитный поток в сердечнике стремился к нулю. Стабильность рабочей точки на кривой перемагничивания, малая амплитуда магнитного поля в сердечнике позволили заметно уменьшить нелинейность передаточной характеристики, расширить полосу пропускания и сократить температурные погрешности.

Наилучшими характеристиками обладают самые конструктивно сложные датчики Multi-Point Zero Flux Gate — феррозондовые датчики,

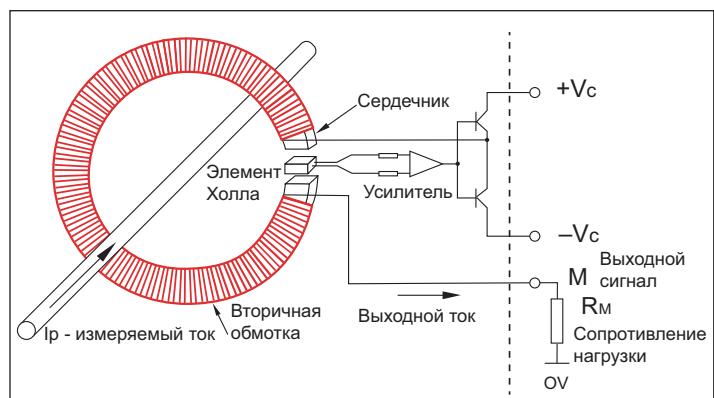


Рис. 2. Устройство датчика по технологии Close Loop с элементом Холла

Таблица 2. Датчики тока по технологии Close Loop (с обратной связью)

Условное обозначение	$I_{PN}$ , А	$I_p$ , А	Сопротивление внешнего резистора ( $\pm 0,1\%$ ), Ом	$V_{OUT} I_{OUT}$ при $\pm I_{PN}$	Погрешность, %	$V_S$ , В	Частотный диапазон, кГц	Время отклика (10–90 %), мкс, не более	$T_A$ , °C
RTC0.3TAS52	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	1000	$2,5 \pm 2$ В	$\pm 0,5$	5	DC–50 (–1 дБ)	0,007	$-40\dots+105$
RTC0.5TAS52	$\pm 0,5$	$\pm 0,55$	1000						
RTC0.6TAS52	$\pm 0,6$	$\pm 0,75$	500						
RTC1.0TAS52	$\pm 1$	$\pm 1,1$	500						
RTC5TAS52	$\pm 5$	$\pm 5,5$	100						
RTC7.5TAS52	$\pm 7,5$	$\pm 8,25$	100						
RTC10TAS52	$\pm 10$	$\pm 11$	100						
RTC03SY	3	9	400	$\pm 4$ В	$\pm 0,5$	$\pm 15$	DC–100 (–3 дБ)	1	$-40\dots+85$
RTC05SY	5	15	400						
RTC7,5SY	7,5	22,5	400						
RTC10SY	10	30	400						
RTC15SY	15	45	400						
RTC20SY	20	60	400						
RTC25SY	25	75	400						
RTC30SY	30	90	400						
RTC50SY	50	150	250						
RTC5PS3.3	5	12	25	$1,65 \pm 0,625$ В	$\pm 0,5$	3,3	DC–100 (–1 дБ)	0,5	$-40\dots+85$
RTC10PS3.3	10	24	20						
RTC15PS3.3	15	36	20						
RTC25PS3.3	25	50	25						
RTC30PS3.3	30	60	20						
RTC5PS3125	5	5,5	50	$1,65 \pm 1,25$ В	$\pm 0,5$	3,3	DC–200 (–1 дБ)	0,5	$-40\dots+85$
RTC10S3125	10	11	50						
RTC15S3125	15	16,5	50						
RTC25S3125	25	27,5	50						
RTC30S3125	30	33	50						
RTC5PS5	5	16	15	$2,5 \pm 0,625$ В	$\pm 0,5$	5	DC–100 (–1 дБ)	0,5	$-40\dots+85$
RTC10PS5	10	32	10						
RTC15PS5	15	48	7,5						
RTC25PS5	25	80	7,5						
RTC06DT33	6	$\pm 12$	30	$1,65 \pm 0,625$ В	$\pm 0,8$	3,3	DC–100 (–1 дБ)	1	$-40\dots+85$
RTC15DT33	15	$\pm 30$	10						
RTC20DT33	20	$\pm 40$	10						
RTC25DT33	25	$\pm 50$	7,5						
RTC50DT33	50	$\pm 100$	3,75						
RTC06LS35	6	$\pm 15$	20	$1,65 \pm 0,5$ В	$\pm 1$	3,3	DC–100 (–1 дБ)	1	$-40\dots+105$
RTC10LS35	10	$\pm 25$	12,5						
RTC15LS35	15	$\pm 37,5$	10						
RTC20LS35	20	$\pm 50$	7,5						
RTC25LS35	25	$\pm 62,5$	5						
RTC30LS35	30	$\pm 75$	5						
RTC40LS35	40	$\pm 100$	3,75						

Таблица 2. Датчики тока по технологии Close Loop (с обратной связью) [продолжение]

Условное обозначение	$I_{PN}$ , А	$I_p$ , А	Сопротивление внешнего резистора ( $\pm 0,1\%$ ), Ом	$V_{OUT} I_{OUT}$ при $\pm I_{PN}$	Погрешность, %	$V_s$ , В	Частотный диапазон, кГц	Время отклика (10–90 %), мкс, не более	$T_A$ , °C
RTC50LS35	50	$\pm 125$	2	$1,65 \pm 0,5$ В	$\pm 1$	3,3	DC–100 (–1 дБ)	1	–40...+105
RTC06H5	6	$\pm 12$	25	$1,65 \pm 0,625$ В	$\pm 0,5$	5	DC–200 (–1 дБ)	0,5	–40...+105
RTC15H5	15	$\pm 30$	10						
RTC25H5	25	$\pm 50$	7,5						
RTC50H5	50	$\pm 100$	3,75						
RTC06HR5	6	$\pm 12$	25						
RTC15HR5	15	$\pm 30$	10	$1,65 \pm 0,625$ В	$\pm 0,5$	5	DC–200 (–1 дБ)	0,5	–40...+105
RTC25HR5	25	$\pm 50$	7,5						
RTC50HR5	50	$\pm 100$	3,75						
RTC06Q58	6	$\pm 15$	40						
RTC15Q58	15	$\pm 37,5$	20						
RTC25Q58	25	$\pm 62,5$	10	$2,5 \pm 0,8$ В	$\pm 0,5$	5	DC–100 (–1 дБ)	1	–40...+105
RTC30Q58	30	$\pm 75$	10						
RTC40Q58	40	$\pm 100$	5						
RTC50Q58	50	$\pm 150$	4						
RTC06DT52	6	6,6	100						
RTC15DT52	15	16,5	50	$2,5 \pm 2$ В	$\pm 0,5$	5	DC–100 (–1 дБ)	0,5	–40...+85
RTC25DT52	25	27,5	25						
RTC50DT52	50	55	10						
RTC10HXS5	10	30	20						
RTC15HXS5	15	45	7,5						
RTC20HXS5	20	60	10	$2,5 \pm 0,625$ В	$\pm 0,5$	5	DC–100 (–1 дБ)	0,5	–40...+105
RTC30HXS5	30	90	7,5						
RTC50HXS5	50	150	3,75						
RTC10Q4	10	$\pm 30$	100						
RTC15Q4	15	$\pm 45$	200						
RTC20Q4	20	$\pm 60$	200	$\pm 4$ В	$\pm 0,5$	$\pm 15$	DC–100 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC25Q4	25	$\pm 75$	200						
RTC30Q4	30	$\pm 90$	100						
RTC50Q4	50	$\pm 150$	40						
RTC60Q4	60	$\pm 150$	30						
RTC75Q4	75	$\pm 150$	30						
RTC25LAH <sup>2</sup>	25	$\pm 100$							
RTC25AY <sup>2</sup>	25	$\pm 55$							
RTC50AY	50	$\pm 100$							
RTC025LA	25	75							
RTC050LA	50	150			$\pm 0,5$	$\pm(12-18)$	DC–200 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC100LA	100	300							
RTC125LA	125	375							
RTC200LA	200	600							
RTC025LA2	25	50							
RTC050LA2	50	100			$\pm 0,5$	$\pm(12-15)$	DC–200 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC100LA2	100	200							
RTC125LA2	125	200							
RTC200LA2	100	200							
RTC025TP	25	75							
RTC050TP	50	150			$\pm 0,5$	$\pm(12-18)$	DC–200 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC100TP	100	300							
RTC125TP	125	375							
RTC200TP	200	600							
RTC25P3 <sup>1</sup>	2–25	75							
RTC50P3	5–500	150			$\pm 0,2$	$\pm(12-18)$	DC–250 (–3 дБ)	0,5	–40...+85
RTC100P3	10–100	300							
RTC200P3	20–200	600							
RTC50LAH	50	150							
RTC100LAH	100	280							
RTC50BP565	50	$\pm 150$	3	$1,65 \pm 0,625$ В	$\pm 0,5$	5	DC–200 (–1 дБ)	0,5	–40...+105

Таблица 2. Датчики тока по технологии Close Loop [с обратной связью] (продолжение)

Условное обозначение	$I_{PN}$ , А	$I_p$ , А	Сопротивление внешнего резистора ( $\pm 0,1\%$ ), Ом	$V_{OUT}$ $I_{OUT}$ при $\pm I_{PN}$	Погрешность, %	$V_S$ , В	Частотный диапазон, кГц	Время отклика (10–90 %), мкс, не более	$T_A$ , °C
RTC75BP565	75	$\pm 225$	4	$1,65 \pm 0,625$ В	$\pm 0,5$	5	DC–200 (–1 дБ)	0,5	–40...+105
RTC100BP565	100	$\pm 300$	3						
RTC150BP565	150	$\pm 360$	2						
RTC200BP565	200	$\pm 360$	1,5						
RTC50ECH	5–50	150		5–50 мА	$\pm 0,2$	$\pm(12\text{--}18)$	DC–200 (–3 дБ)	0,5	–40...+85
RTC75ECH	7,5–75	225		5–50 мА					
RTC100ECH	10–100	300		5–50 мА					
RTC200ECH	20–200	500		10–100 мА					
RTC50TAH	5–50	150		5–50 мА	$\pm 0,2$	$\pm(12\text{--}18)$	DC–100 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC100TAH	10–100	300		10–100 мА					
RTC200TAH	20–200	700		10–100 мА					
RTC300TAH	30–300	900		10–100 мА					
RTC100LP	100	300		50 мА	$\pm 0,5$	$\pm(12\text{--}18)$	DC–200 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC125LP	125	375		125 мА					
RTC200LP	200	600		100 мА					
RTC300LP	300	600		150 мА					
RTC100LTA	100	300		50 мА	$\pm 0,2$	$\pm(12\text{--}18)$	DC–150 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC200LTA	200	600		100 мА					
RTC300LTA	300	750		150 мА					
RTC300LTA3	300	900		100 мА					
RTNT100-S	100	300		100 мА	$\pm 0,5$	$\pm(12\text{--}18)$	DC–100 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTNT200-S	200	600		100 мА					
RTNT300-S	300	750		150 мА					
RTNT400-S	400	900		133,3 мА					
RTC350LTB	350	1200		175 мА	$\pm 0,2$	$\pm(15\text{--}24)$	DC–100 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTC400LTB	400	1200		100 мА					
RTC500LTB	500	1500		150 мА					
RTH400-SG	$\pm 400$	$\pm 480$		$\pm 0,2$ А	10 ppm	$\pm 15$	DC–500 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTH600-SG	$\pm 600$	$\pm 720$		$\pm 0,4$ А	10 ppm	$\pm 15$	DC–500 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTH1000-SG	$\pm 1000$	$\pm 1200$		$\pm 0,67$ А	10 ppm	$\pm 15$	DC–500 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTNT1000-C3 <sup>3</sup>	10–1000	2000		2–200 мА	$\pm 0,3$	$\pm(15\text{--}24)$	DC–150 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTLT1000SH	10–1000	2500		2–200 мА	$\pm 0,1$	$\pm(15\text{--}24)$	DC–150 (–3 дБ)	1	–40...+85
RTLT2000SH	20–2000	3000		4–400 мА	$\pm 0,2$	$\pm(15\text{--}24)$	DC–150 (–3 дБ)	1	–40...+85

дополненные технологиями подавления собственных шумов, устройство которых описано в [2].

Основной параметр датчика тока — номинальный измеряемый ток  $I_{PN}$ , при котором нормированы все характеристики. Максимально допустимый измеряемый ток  $I_p$  может превосходить номинальный в несколько раз. Естественно, датчик при этом выполняет свои функции, но с увеличенными погрешностями.

Выходной сигнал датчиков Open Loop, как правило, напряжение. Только несколько моделей имеют выходной сигнал 4–20 мА, рас-

пространенный в промышленной автоматике. В датчиках Close Loop закономерно выходной сигнал — это ток, а выходное напряжение получается при протекании выходного тока через прецизионный нагрузочный резистор заданного номинала.

Датчики, изготовленные по технологии Open Loop, имеют достаточно хорошую точность (погрешность в нормальных условиях не превышает 1–2%). Нелинейность передаточной характеристики, вызываемая в основном нелинейностью кривой намагничивания и наличием гистерезиса, достигает 1%. Погрешность дат-

чиков Close Loop с элементом Холла менее 1%, а нелинейность передаточной характеристики менее 0,1%. У датчиков Multi-Point Zero Flux Gate погрешность и нелинейность характеристики не превышают 10 ppm и 2 ppm соответственно.

Все датчики позволяют измерять постоянный ток. Верхняя граница полосы пропускания, нормируемая на уровне –3 или –1 дБ: 5–50 кГц для датчиков Open Loop, 50–200 кГц для датчиков Close Loop с использованием элемента Холла и 500 кГц для датчиков Multi-Point Zero Flux Gate. Датчики Close Loop быстрее реагируют на ступенчатое изменение входного тока.

Электрическая прочность изоляции для напряжения промышленной частоты составляет 2,5–6 кВ.

Датчики рассчитаны на эксплуатацию в широком диапазоне температур окружающей среды –40...+85(105) °C.

Датчики с номинальным током до 50 А выпускаются в исполнении для печатного монтажа, датчики на более значительные токи имеют окно в корпусе для проводника, в котором измеряется ток. Варианты конструктивного исполнения изображены на рис. 3, 4.



Рис. 3. Датчик тока для монтажа на печатную плату



Рис. 4. Датчик тока для сильноточных цепей

## Литература

1. [www.rongtech-sensor.com/](http://www.rongtech-sensor.com/)
2. [www.power-e.ru/components/ultrastab-it/](http://www.power-e.ru/components/ultrastab-it/)

# Гибридные IGBT-модули

## ПАО «Электровыпрямитель»

**В статье представлены результаты испытаний новых разработок гибридных модулей на основе Si SPT IGBT и SiC-диодов Шоттки.**

**Вячеслав Мускатиньев**

**Михаил Тогаев**

nicspp@elvpr.ru

Уже более 10 лет гибридные IGBT-модули производятся в России. Данные изделия зарекомендовали себя как оптимальное решение с точки зрения соотношения цены и параметров и для ряда применений успешно заменяют Full SiC MOSFET-модули, которые до настоящего времени имеют высокую стоимость. Первоначально гибридные IGBT-модули изготавливались с использованием планарных Fast NPT (Non-Punch Through) IGBT, и оптимизация их системы параметров во многом зависела от применяемых диодов Шоттки [1]. Постепенно, по мере развития технологии Trench Gate, на рынке появились чипы IGBT Fast Trench, которые имеют меньшие потери как во включенном состоянии, так и при переключении, что позволило дополнительно снизить потери мощности в гибридных модулях. При этом не стоит забывать об обратной стороне медали и учитывать повышенный заряд затвора у IGBT Trench Gate в сравнении с NPT при одинаковом номинальном токе. Поскольку гибридные модули предназначены для эксплуатации при повышенных частотах коммутации, переход на модули с увеличенным зарядом затвора требует повышения

### Введение

мощности драйвера, что не всегда реализуемо без существенных доработок.

С появлением и бурным развитием Trench Gate IGBT планарная технология, тем не менее, не потеряла актуальности и продолжает свое развитие у ряда производителей чипов в виде технологии SPT (Soft Punch Through). Структура SPT отличается от NPT наличием дополнительного буферного  $n^+$ -слоя между высокоомной  $n^-$ -областью и  $p^+$ -слоем коллектора, а также меньшей толщиной  $n^-$ -слоя. Именно буферный слой и позволяет уменьшить толщину чипа без снижения напряжения пробоя структуры, что, в свою очередь, существенно сокращает статические потери.

### Результаты разработки

В статье представлены результаты исследований трех вариантов гибридных IGBT-модулей производства ПАО «Электровыпрямитель», изготовленных с применением чипов IGBT Fast NPT, Fast Trench и SPT. Исследования проводились для модулей на напряжение 1200 В как наиболее востребованных на российском рынке. Модули с номинальным током 300 А собраны по схеме полумоста в стандартном корпусе 62×106 мм.

**Таблица 1.** Результаты измерений статических параметров

$V_{CE(sat)}$ , В $I_{CE} = 300$ А $T_j = +25$ °C	$I_{CES}$ , мА		$V_{CES}$ , В		$V_{GE(th)}$ , В
	$V_{CES} = 1200$ В	$T_j = +25$ °C	$T_j = +125$ °C	$I_{CE} = 12$ мА $T_j = +25$ °C	
	$T_j = +25$ °C	$T_j = +125$ °C	$T_j = +125$ °C	$T_j = +125$ °C	
<b>M2TKI-300-12ЧШ (Fast NPT)</b>					
3,47	< 0,1	1,7–1,8	1335–1343	> 1200	5,4
<b>M2TKI-300-12КЧШ (Fast Trench)</b>					
2,18	< 0,1	1,0–1,2	1333–1341	> 1200	5,8
<b>M2TKI-300-12СШ (SPT)</b>					
1,90	< 0,1	0,6–0,7	1268–1272	> 1200	6,3

**Таблица 2.** Результаты измерений динамических параметров

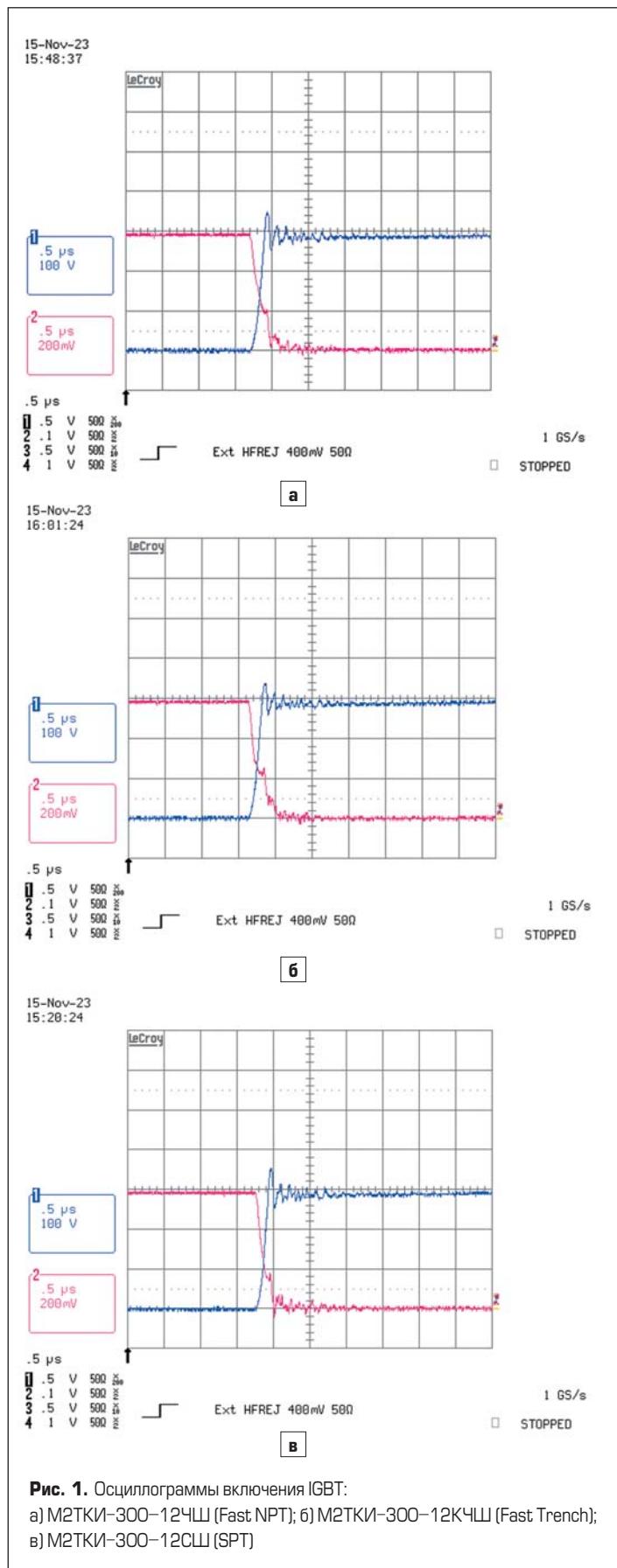
Тест включения			Тест выключения		
$t_{d(on)}$ , мкс	$t_r$ , мкс	$E_{on}$ , мДж	$di/dt_{on}$ , А/мкс	$t_{d(off)}$ , мкс	$t_f$ , мкс
<b>M2TKI-300-12ЧШ (Fast NPT)</b>					
0,487	0,135	11,9	1822	0,644	0,338
<b>M2TKI-300-12КЧШ (Fast Trench)</b>					
0,382	0,131	11,2	1948	0,517	0,291
<b>M2TKI-300-12СШ (SPT)</b>					
0,502	0,116	7,3	2235	0,651	0,317
					36,6

**Статические параметры**

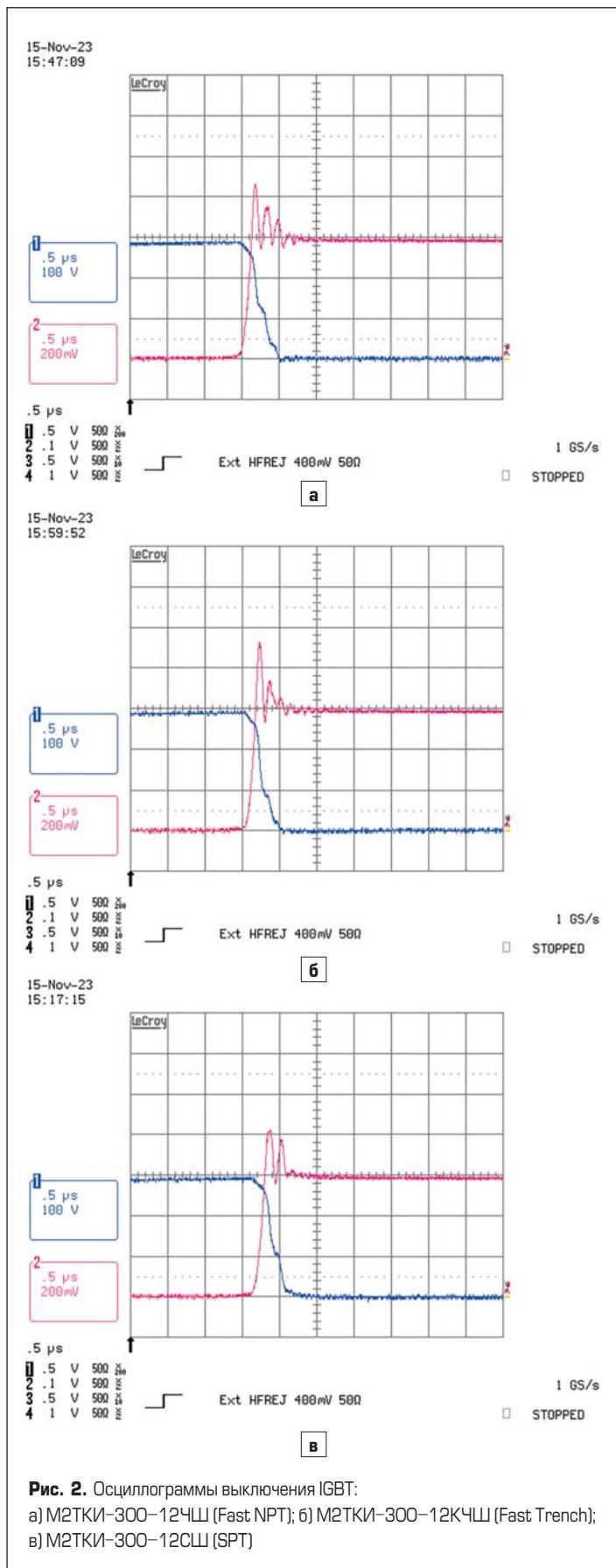
Результаты измерений статических параметров представлены в таблице 1 только для IGBT, так как диоды обратного тока во всех модулях одинаковые.

По результатам тестирования можно сделать следующие выводы для модулей с SPT IGBT:

- Напряжение пробоя несколько ниже, чем у остальных IGBT, однако укладывается в норму и имеет меньший разброс значений между модулями.
- Ток утечки в горячем состоянии ( $T_j = +125^\circ\text{C}$ ) меньше.
- Напряжение насыщения ниже на 13%, чем у Fast Trench, и на 45% — чем у Fast NPT.



**Рис. 1.** Осциллографмы включения IGBT:  
а) М2ТКИ-300-12ЧШ (Fast NPT); 6) М2ТКИ-300-12КЧШ (Fast Trench);  
в) М2ТКИ-300-12СШ (SPT)



**Рис. 2.** Осциллографмы выключения IGBT:  
а) М2ТКИ-300-12ЧШ (Fast NPT); 6) М2ТКИ-300-12КЧШ (Fast Trench);  
в) М2ТКИ-300-12СШ (SPT)

4. Пороговое напряжение выше на 0,5–0,9 В, что увеличивает помехоустойчивость SPT IGBT.

#### Динамические параметры

Результаты измерения динамических параметров представлены в таблице 2 при следующих условиях:

- $V_{CE} = 600$  В;
- $I_C = 300$  А;
- $R_G = 3,9$  Ом;
- $L_S = 180$  нГн;
- $T_j = +125$  °С.

Для ограничения коммутационных перенапряжений в цепи коллектор-эмиттер, возникающих при выключении IGBT, измерения проведены с активным ограничителем на напряжение  $V_{CE} = 950$  В.

На рис. 1 и 2 представлены коммутационные осциллограммы для всех вышеперечисленных модулей.

По результатам измерения динамических параметров можно сделать следующие выводы. Отличия во временах задержки включения и выключения не влияют на частотные характеристики модулей и коммутационные потери, определяющими являются

времена нарастания и спада. SPT IGBT оказались более быстрыми при включении, что привело к снижению потерь на 35–38%. Одновременно у SPT IGBT обнаружена практически одинаковая с Fast NPT и увеличенная на 20% в сравнении с Fast Trench энергия потерь при выключении. Если учесть меньшие потери при включении и меньшее напряжение насыщения, то суммарные потери практически одинаковы с Fast Trench. Выявленный при выключении остаточный ток коллектора (рис. 2в) имеет малую длительность (0,2 мкс), что находится в пределах типичных значений «мертвого» времени. Колебания напряжения коллектор-эмиттер при выключении всех IGBT связаны только с особенностями измерительного оборудования (с работой схемы активного ограничения перенапряжения), которые в реальной схеме преобразователя с низкими паразитными индуктивностями и соответствующими снабберами минимальны либо вообще отсутствуют.

#### Заключение

В условиях множественных ограничений, касающихся приобретения комплектующих

ведущих производителей чипов IGBT, требуется поиск альтернативных решений для удовлетворения запросов потребителей, которые уже применяют гибридные модули. Новые решения должны быть таковы, чтобы минимизировать адаптацию уже разработанных преобразователей под параметры новых модулей. По результатам проведенного тестирования можно сделать вывод, что гибридные модули с применением SiC-диодов Шоттки и IGBT, изготовленных по технологии SPT, могут в большинстве применений успешно заменить аналогичные модули с использованием чипов IGBT Fast NPT и Fast Trench. ■

#### Литература

1. Бормотов А., Шапелько Т., Тогаев М., Мускатиньев В. Исследования параметров и характеристик SiC-диодов Шоттки в гибридных IGBT-модулях ОАО «Электровыпрямитель» // Силовая электроника. 2016. № 5.
2. Volke A., Hornkamp M. IGBT Modules. Technologies, Driver and Application, 2012.

## Высоковольтные источники питания постоянного тока серии АКИП-1404

Компания «ПРИСТ» представляет новую серию источников биполярного напряжения АКИП-1404 в трех модификациях. При работе над серией инженерам-дизайнерам удалось обобщить многолетний опыт проектирования электронных схем, приборов и устройств питания в целях создания источников питания постоянного тока для различных сценариев высоковольтных испытаний.

Серия импульсных программируемых источников питания постоянного тока АКИП-1404 обеспечивает выдачу максимального выходного напряжения до  $\pm 10$  кВ, разрешение по напряжению/току достигает 0,1 В/0,1 мА. Полустоечный (1/2 стойки) корпус источника питания высотой 2U не только поддерживает настольные приложения, но и позволяет удобно разместить прибор в стандартном 19" шкафу для облегчения его системной интеграции. Большой ЖК-дисплей высокого разрешения комфортен для работы оператора – можно удобно считывать воспроизводимые параметры, отображать подробную информацию о тестировании и текущем статусе работы источника питания.

Базовые технические характеристики и особенности:

- число каналов: 1 выход;
- Уных.:  $\pm 2500$ ,  $\pm 5000$ ,  $\pm 10000$  В (в зависимости от модели);
- погрешность установки и измерения:  $\pm 0,01\% / \pm 0,01\%$  (напряжение/ток);
- максимальный ток нагрузки: до 10 мА, до 5 мА, до 1 мА (в зависимости от модели);
- максимальная мощность: до 25, 25, 10 Вт соответственно;
- максимальное разрешение: 0,1 В/0,1 мА (кроме АКИП-1404/3);
- нестабильность: < 0,01% / 0,02% (при изменении Упит./ Унагр.);
- режим стабилизации напряжения и тока: CV/CC;
- защита OVP/OCP/OTP (от перенапряжения, перегрузки по току, от короткого замыкания и перегрева);
- интерфейсы: LAN и RS232, аналоговое управление.

По соображениям безопасности серия АКИП-1404 не имеет выходных гнезд на передней панели. Функциональные силовые клеммы высоковольтного интерфейса (Com/High OUT +/-) перенесены на заднюю панель. Там же расположены порт аналогового программирования (Ext Progr), интерфейс контроля напряжения/тока (Monitoring). Источники имеют порт LAN и интерфейс RS-232, поддерживают команды SCPI,



а также шину систем IEEE-488 при использовании коммуникационного преобразователя NE101. Штатные интерфейсы могут быть задействованы пользователем для создания автоматизированной системы высоковольтных испытаний.

Низкий уровень выходного шума имеет большое значение для источников питания. В модификациях АКИП-1404/1 и АКИП-1404/2 пульсации напряжения в выходном сигнале не превышают 3 мВ с.к.з. Такой минимальный показатель очень востребован для чувствительных измерительных приборов и систем при измерении тока утечки или тестировании ИУ с высоким удельным сопротивлением.

Новинки могут быть востребованы в тестировании высоковольтного оборудования, испытании устройств и материалов в области физики высоких энергий. В этих сферах к источнику питания предъявляются требования по поддержке высоковольтного напряжения и стабильной генерации малых токов. Кроме того, подобное оборудование востребовано для испытаний на пробой устройств IGBT, а также в приложениях тестирования материалов изоляции.

<https://prist.ru/>

# Области применения

## магнитного электродвигателя-генератора

**Магнитный электродвигатель-генератор можно использовать как источник резервного и бесперебойного питания, в качестве силовой гибридной установки и тягового электродвигателя-генератора в электромобилях.**

Юрий Таланин

tyv1357@mail.ru

**М**агнитный электродвигатель-генератор [1] состоит из ротора и статора. Его устройство поясняется с помощью чертежей: на рис. 1 показан вид спереди двигателя в разрезе, на рис. 2 — разрез по плоскости А–А (разрез статора и ротора). Ротор представляет собой цилиндр, на поверхности которого установлены  $n$  постоянных магнитов, выполненных в виде клиньев, расширяющихся к статору. Клины расположены относительно оси ротора под углом 65–75° и залиты нейтральным по отношению к магнитным полям материалом. Вал ротора установлен в подшипниках и имеет с одной стороны шкив для отбора мощности электродвигателя, а также может быть использован для вращения якоря генератора, с другой — крыльчатку для охлаждения магнитного электродвигателя-генератора.

Статор выполнен с  $n$  или  $n \pm 1$  постоянными магнитами, сужающимися к ротору и обращенными S-одноименными полюсами к постоянным магнитам ротора, залитым нейтральным по отношению к магнитным полям материалом. По всей длине статора между постоянными магнитами выполнены пазы, расположенные относительно оси статора под углом 65–75°, в которых установлены  $n$  или  $n \pm 1$  статорные обмотки.

Постоянные магниты ротора и статора обращены друг к другу S-одноименными полюсами, которые отталкиваются и заставляют ротор магнитного электро-

двигателя вращаться вокруг своей оси, обеспечивая высокую удельную мощность двигателя за счет отталкивающей силы нескольких пар магнитов, а также повышенный КПД за счет энергии высокоэнергетических постоянных магнитов, создающих сильные магнитные поля несколькими парами постоянных магнитов. Вектор силы при этом приложен к торцам магнитов и направлен по касательной к ротору, что повышает крутящий момент магнитного электродвигателя.

Дальнейшее увеличение количества взаимодействующих пар постоянных магнитов на роторе и статоре, обращенных друг к другу одноименными полюсами, повысит мощность магнитного электродвигателя-генератора — другими словами, это происходит при увеличении диаметра и длины статора и ротора.

Заливка постоянных магнитов нейтральным материалом максимально сохраняет работу магнитных полей магнитов и обеспечивает высокую мощность двигателя. Один из факторов, способствующих получению данных преимуществ, — практическое отсутствие железа в магнитном электродвигателе-генераторе. Это значительно снижает потери на вихревые токи и гистерезисные потери. В зависимости от назначения статорные обмотки можно соединять различным способом (последовательно, параллельно, группами, звездой с общей точкой, треугольником, образовывать различное число фаз и т. д.) и питать тяговый электродвига-

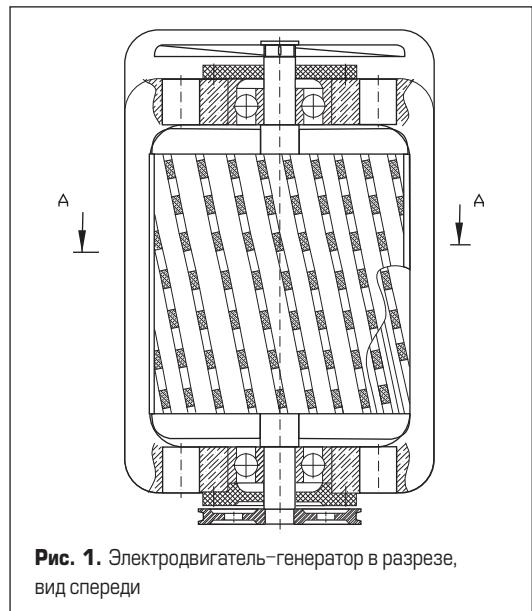


Рис. 1. Электродвигатель-генератор в разрезе, вид спереди

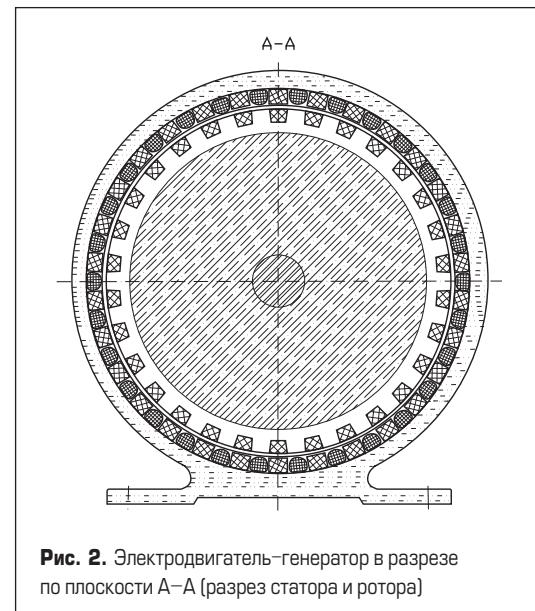


Рис. 2. Электродвигатель-генератор в разрезе по плоскости А–А (разрез статора и ротора)

тель электромобиля, через зарядные устройства заряжать аккумуляторную батарею.

Принцип функционирования магнитного электродвигателя-генератора основан на взаимодействии врачающегося магнитного поля статора и постоянных магнитных полей ротора и статора. Оптимальный режим работы магнитного электродвигателя-генератора удается получить при воздействии реактивной энергии, что возможно при автоматической регулировке тока. Эта особенность обуславливает работу магнитного электродвигателя-генератора с минимальным потреблением и отдачей реактивной энергии в сеть.

### Режим работы резервного источника питания

Магнитный электродвигатель-генератор совместно с аккумуляторной батареей может работать в режиме резервного источника питания. При пропадании напряжения в сети контроллер подключает аккумуляторную батарею через частотный преобразователь или инвертор к магнитному электродвигателю-генератору. На три равноудаленные друг относительно друга статорные обмотки магнитного электродвигателя-генератора подается напряжение. По этим обмоткам статора пойдет синхронный переменный ток, создавая крутящий момент и заставляя ротор вращаться. При вращении ротора поток энергии постоянных магнитов, установленных в нем, пересекает проводники статорных обмоток и индуцирует в обмотках переменную электродвижущую силу  $E$  (ЭДС), при подключении статорных обмоток к нагрузке обеспечивается бесперебойное энергоснабжение и восстанавливается рабочий режим нагрузки (освещение, холодильник, работа механизма) и т. д. Продолжительность работы резервного источника питания зависит от емкости аккумуляторной батареи. Резервное подключение источника питания осуществляется вручном режиме.

### Режим работы источника бесперебойного питания

Магнитный электродвигатель-генератор совместно с аккумуляторной батареей и двигателем внутреннего сгорания (ДВС) может работать в режиме источника бесперебойного питания.

При пропадании напряжения в сети контроллер подключает аккумуляторную батарею через частотный преобразователь или инвертор к магнитному электродвигателю-генератору. На три равноудаленные друг относительно друга статорные обмотки магнитного электродвигателя-генератора подается напряжение, по этим обмоткам статора пойдет синхронный переменный ток, создавая крутящий момент и заставляя ротор вращаться. При вращении ротора поток энергии постоянных магнитов, установленных в роторе, пересекает проводники ( $n$  или  $(n \pm 1) - 3$ ) статорных обмоток и индуцирует в обмотках переменную электродвижущую силу  $E$ , при подключении этих статорных обмоток к нагрузке обеспе-

чивается бесперебойное энергоснабжение и восстанавливается рабочий режим питания. Контроллер следит за напряжением аккумуляторной батареи и при снижении напряжения аккумуляторной батареи до определенного уровня отключает аккумуляторную батарею и подключает ДВС. На коленчатом валу ДВС установлен шкив, который механически связан со шкивом магнитного электродвигателя-генератора посредством ременной передачи, которая включается от механизма натяжения приводного ремня [3]. При включении механизма натяжения приводного ремня вал магнитного электродвигателя-генератора приводится во вращение от двигателя внутреннего сгорания. При вращении ротора поток энергии постоянных магнитов, установленных в роторе, пересекает проводники статорных обмоток и индуцирует в обмотках переменную электродвижущую силу  $E$ . При подключении трех (четырех) статорных обмоток магнитного электродвигателя-генератора через электронный регулятор (контроллер) к тяговому электродвигателю последний начинает работать, приводя электромобиль в движение.

При вращении ротора поток энергии постоянных магнитов, установленных в нем, пересекает проводники статорных обмоток и индуцирует в обмотках переменную электродвижущую силу  $E$ . При подключении ( $n$  или  $(n \pm 1) - 3$ ) статорных обмоток к нагрузке обеспечивается бесперебойное энергоснабжение. Три равноудаленные друг относительно друга статорные обмотки подключаются через выпрямитель и зарядное устройство к аккумуляторной батарее и происходит процесс ее зарядки. Контроллер следит за зарядкой аккумуляторной батареи и при ее полной зарядке подключает аккумуляторную батарею через частотный преобразователь или инвертор к магнитному электродвигателю-генератору, восстанавливая рабочий режим нагрузки от аккумуляторной батареи. Одновременно контроллер дает команду на отключение механизма натяжения ремня и отключение ДВС. Далее процесс повторяется.

### Силовая гибридная установка электромобиля

Силовая гибридная установка электромобиля состоит из тягового электродвигателя, аккумуляторной батареи, магнитного электродвигателя-генератора и ДВС.

Тяговый электродвигатель электромобиля работает в штатном режиме от аккумуляторной батареи, контроллер следит за напряжением

аккумуляторной батареи и при снижении ее напряжения до определенного уровня включает ДВС. На коленчатом валу ДВС установлен шкив, который механически связан со шкивом магнитного электродвигателя-генератора посредством ременной передачи, которая включается от механизма натяжения приводного ремня. При включении механизма натяжения приводного ремня ротор магнитного электродвигателя-генератора приводится во вращение от двигателя внутреннего сгорания. При вращении ротора поток энергии постоянных магнитов, установленных в роторе, пересекает проводники статорных обмоток и индуцирует в обмотках переменную электродвижущую силу  $E$ . При подключении трех (четырех) статорных обмоток магнитного электродвигателя-генератора через электронный регулятор (контроллер) к тяговому электродвигателю последний начинает работать, приводя электромобиль в движение.

А три (две) равноудаленные друг относительно друга статорные обмотки магнитного электродвигателя-генератора подключаются через зарядное устройство (импульсное зарядное устройство) к аккумуляторной батарее, в результате происходит процесс ее зарядки. Контроллер следит за процессом зарядки аккумуляторной батареи и при ее полной зарядке отключает ДВС и подключает аккумуляторную батарею к тяговому электродвигателю, который начинает работать в штатном режиме.

### Работа магнитного электродвигателя-генератора в режиме тягового электродвигателя-генератора электромобиля

Устройство шестифазного шестиполюсного магнитного электродвигателя-генератора показывается с помощью чертежей, где на рис. 3 представлен вид устройства спереди, на рис. 4 — разрез по плоскости А—А (разрез статора и ротора).

Шестифазный шестиполюсный магнитный электродвигатель-генератор состоит из статора и ротора.

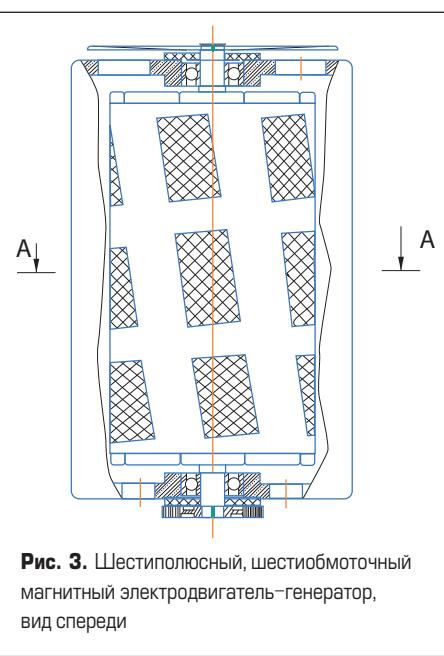


Рис. 3. Шестиполюсный, шестиобмоточный магнитный электродвигатель-генератор, вид спереди



Рис. 4. Шестиполюсный, шестиобмоточный магнитный электродвигатель-генератор сечение по плоскости А—А (разрез статора и ротора)

Ротор представляет собой цилиндр, на поверхности которого размещены секции из шести постоянных магнитов, равномерно размещенных по его длине, выполненных в виде клиньев, расширяющихся к статору, расположенных относительно оси ротора под углом 65–75° и залитых нейтральным по отношению к магнитным полям материалом. Вал ротора установлен в подшипниках и имеет с одной стороны шестерню для подключения к редуктору привода колес электромобиля, с другой стороны крыльчатку для охлаждения магнитного электродвигателя-генератора.

Статор — это шестифазный шестиполюсный электродвигатель-генератор с постоянными магнитами, расположенными на поверхности статора секциями по шесть магнитов и равномерно распределенными по его длине, выполненными в виде клиньев, сужающихся к ротору, расположенных относительно оси статора под углом 65–75° и залитых нейтральным по отношению к магнитным полям материалом, и обращенными S-одноименными полюсами к постоянным магнитам ротора. По всей длине статора между постоянными магнитами выполнены пазы, расположенные относительно оси статора под углом 65–75°, в которых установлены шесть статорных обмоток.

При установке магнитного электродвигателя-генератора на электромобиль он может работать в качестве тягового электродвигателя в двух режимах.

- Если магнитный электродвигатель-генератор установить на электромобиль, подключив аккумуляторную батарею через частотный преобразователь, контроллер, и на шесть статорных обмоток подать напряжение, то по обмоткам статора пойдет синхронный переменный ток, создавая крутящий момент и заставляя ротор вращаться. Вращение ротора через шестерню, установленную на конце ротора, передается на редуктор, который вращает колеса электромобиля, приводя электромобиль в движение.
- Если магнитный электродвигатель-генератор установить на электромобиль, подключив аккумуляторную батарею через частотный преобразователь, контроллер, и на три (четыре) статорные обмотки подать напряжение, то по обмоткам статора пойдет синхронный переменный ток, создавая крутящий момент и заставляя ротор вращаться. Вращение ротора через шестерню, установленную на конце ротора, передается на редуктор, который вращает колеса электромобиля, приводя электромобиль в движение, а три (две) другие статорные обмотки подключаются через зарядное устройство (импульсное зарядное устройство) к аккумуляторной батареи, в результате происходит процесс ее зарядки.

Во время движения электронный контроллер реагирует на движение электромобиля: при езде по трассе (прямолинейное движение), при спуске и подъеме, а также при остановках электромобиля (например, остановка перед светофором). В зависимости от дорожной ситуации контроллер выбирает режимы работы, регулирует моменты переключения режимов, создавая оптимальный режим работы магнитного электродвигателя-генератора, с минимальным потреблением и отдачей реактивной энергии через зарядное устройство в аккумуляторную батарею..

Данное техническое решение позволит снизить емкость и массу аккумуляторной батареи, а также уменьшит и массу электромобиля.

Количество секций постоянных магнитов в роторе и статоре можно увеличивать, тем самым повышая мощность тягового электродвигателя.

Магниты, используемые в магнитном электродвигателе-генераторе, это магниты с высоким значением магнитной индукции, такие как магниты на основе редкоземельных элементов, в частности неодимовые магниты. Они имеют сильные магнитные поля и позволяют достигать высокой однородности поля. Недостатком этих магнитов является то, что они могут быть хрупкими и не выдерживать больших нагрузок. В таком случае наружные поверхности магнитов покрывают тонкой металлической, например медной, оболочкой.

### Литература

- Таланин Ю. В. Магнитный электродвигатель-генератор. Патент RU 2 772 864, МПК H02K 21/14 // Бюл. № 15. 2022.
- Таланин Ю. В. Магнитный электродвигатель-генератор // Силовая электроника. 2022. № 4.
- Лиу К. (US), Серх А. (US). Система ременного привода (варианты) и устройство натяжения для нее. Патент № 2272947, МПК F16H7/12. Патентообладатель: ДЗЕ ГЕЙТС КОРПОРЕЙШН (US). Публикация патента: 27.03.2006.

### Импульсные источники питания Dekraft

Российская производственная компания «Систэм Электрик» расширяет бренд низковольтного оборудования Dekraft импульсными источниками питания серий ИП-501, ИП-502, ИП-503 и ИП-505.

Импульсные источники питания Dekraft являются полностью электронными приборами с возможностью регулировки выходного напряжения. Они обеспечивают стабилизированное напряжение постоянного тока для программируемых логических контроллеров (ПЛК) и цепи управления оборудования, входящего в состав автоматизированной системы, с возможностью установки на монтажную плату или специальную монтажную шину — DIN-рейку.

Импульсные источники питания ИП-500 производятся в различных модификациях и могут выдавать регулируемое напряжение 5–48 В постоянного тока. Даже в случае значительных перепадов входного напряжения выходное остается неизменным с высокой точностью. Это позволяет использовать блоки питания Dekraft, в том числе в чувствительных электронных системах.

Импульсные источники питания Dekraft обладают рядом преимуществ:

- соответствуют нормам класса A по электромагнитной совместимости;
- работают в широком диапазоне температур: -20...+70 °C, что позволяет существенно расширить сферы применения оборудования;
- обладают низким уровнем пульсации на выходе;
- низкое энергопотребление обеспечивает высокий КПД — более 88%.

Благодаря встроенной защите от перегрузки нет необходимости использовать дополнительные защитные устройства между источниками питания.

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



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

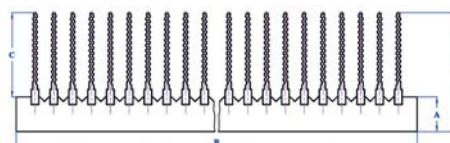
### Новинка — сварные радиаторы

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



### Новинка — охладители О57

по вашим размерам



реклама

# Развитие приводов высокой мощности: выбор между концепциями VSI и LCI

**С точки зрения автора, рассмотрение относительных преимуществ конфигураций приводов VSI и LCI при мощности «на валу» 20 МВт не является вариантом «или–или». Обе технологии могут быть успешно реализованы, и решение должно основываться на конкретных эксплуатационных характеристиках проекта.**

**Ананд Джха (Anand Jha)<sup>1</sup>**

**Перевод: Иван Сергеев**

Страна необходимость в «декарбонизации» промышленности заставляет многих операторов «вращающих» систем, таких как газокомпрессорные станции, переходить на электрифицированные приводы. Эта тенденция в значительной степени обусловлена введением налогов на выбросы углерода и доступностью кредитов, а также необходимостью удовлетворения требований инвесторов в области ESG. Напомним, что ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance) — это совокупность характеристик управления компанией, при котором достигается вовлечение данной компании в решение экологических, социальных и управлений проблем. Кроме того, использование электроприводов вместо газовых или паровых турбин позволяет значительно повысить эффективность оборудования, что непосредственно приводит к снижению эксплуатационных расходов (OPEX). Этому способствует и растущая доступность стабильных источников электроснабжения даже в отдаленных районах.

Проблема для операторов состоит в том, что типовое оборудование мощностью 10 млн тонн в год (МРТА), например установка по производству сжиженного природного газа (LNG), может создавать общую нагрузку примерно в 450–550 МВт на привод с регулируемой частотой вращения VSD (Variable Speed Drive). Для решения подобной задачи требуются приводные системы среднего напряжения (MV — Medium Voltage) мощностью приблизительно 30–100 МВт, примеров которых в настоящее время достаточно мало.

Ключевой вопрос состоит в том, какую технологию привода лучше всего использовать? Инвертор с коммутируемой нагрузкой LCI (Load-Commutated Inverter) считается самым современным решением для систем высокой мощности, однако в последние годы растет популярность инверторов напряжения VSI (Voltage Source Inverter). Почти во всех новых приложениях мощностью менее 20 МВт используются VSI-приводы. На мощностях свыше 35 МВт по-прежнему преобладают LCI, однако для этой цели можно использовать и VSI в параллельных конфигурациях. Между обоими диапазонами мощностей существует «серая зона», а значит, полезно изучить основные характеристики данных технологий, чтобы понять, почему выбор часто не столь однозначен.

## Сага о двух технологиях

Приводы LCI, представленные на рынке с середины 1970-х, достаточно хорошо себя зарекомендовали. Как правило, это преобразователи на базе тиристоров с фазовым управлением (PCT), включающие выпрямитель, звено постоянного тока и инвертор. Сглаживающий реактор в DC-шине придает LCI характеристики источника тока, что делает его частью более широкого семейства инверторов тока CSI (Current Source Inverter). Мощность LCI легко масштабируется за счет последовательного включения большего количества тиристоров. Это иллюстрирует преобразователь LCI MEGADRIVE, установленный в аэродинамической трубе НАСА в 1997 году, который до сих пор представляет собой крупнейшую в мире горизонтальную комбинацию двигателя и привода мощностью 101 МВт.

Развитие технологий силовых полупроводников обусловило появление на рынке первых MV VSI в середине 1990-х годов. В них использовались высоковольтные интегральные тиристоры с коммутируемым затвором IGCT (Integrated Gate-Commutating Thyristors). В отличие от уникальных по своей природе LCI, инверторы VSI охватывают целый ряд «субтопологий», содержащих конденсаторы в звене постоянного тока, что придает им характеристики источника напряжения.

Силовые модули, применяемые как в LCI, так и в VSI, представляют собой приборы в конструктиве Press-Pack, предотвращающем образование дугового разряда благодаря надежному керамическому корпусу и сборке под давлением. Такие приборы обеспечивают максимальную единичную мощность, что позволяет реализовать сверхмощные конвертеры с минимальным количеством компонентов. Другое их преимущество — низкие потери проводимости, что повышает эффективность системы. Существуют специальные топологии инверторов на основе низковольтных IGBT (как правило, 17-го класса), которые также применяются в сегменте приводов высокой мощности (свыше 20 МВт). В качестве примера можно привести MMC — модульный многоуровневый преобразователь.

Все производители используют одну и ту же базовую топологию LCI. Это позволяет заменять один

<sup>1</sup>ABB Motion System Drives.

инвертор на другой, не меняя входной трансформатор, силовые кабели и двигатель. Такая гибкость является преимуществом концепции LCI, поскольку замена VSI одного производителя на другой, как правило, невозможна из-за разнообразия схемных решений. Это становится важным фактором с учетом более короткого срока службы инверторов напряжения по сравнению с другими компонентами системы.

### Требования к двигателю и нагрузочным режимам

В зависимости от технических требований, таких как мощность на валу, скорость вращения и КПД, делается выбор между синхронным (SD) или асинхронным двигателем (AD). Оба типа моторов, доступных в широком диапазоне мощностей, могут применяться в приводах VSD. Обычно синхронные моторы выбирают из-за их более высокой эффективности, в то время как преимуществами асинхронных машин являются простота, надежность и дешевизна.

Именно здесь обнаруживается важное различие между двумя концепциями привода: LCI может работать только с SD-машинами, поскольку для коммутации инвертора в нем используется противо-ЭДС (EMF), в то время как VSI способен приводить в действие оба типа двигателей.

Гармоники тока, создаваемые VSD, генерируют дополнительные потери в двигателе, вызывая повышение температуры. В системах с LCI стандартные моторы обычно не устанавливаются, а специализированные машины проектируются с учетом эффекта «гармонического нагрева». При использовании привода VSI можно добиться относительно чистой формы сигнала тока либо с помощью выходного синусоидального фильтра, либо с помощью многоуровневой схемы, формирующей ступенчатый сигнал.

В приложениях высокой мощности синусоидальные фильтры обычно не применяются, поскольку двигатели проектируются для работы с определенным типом VSI и в процессе разработки учитывается гармонический состав тока. Тем не менее при использовании фильтра дополнительного повышения температуры не происходит, он также может потребоваться при большой длине выходного силового кабеля (несколько км).

Кроме того, крутильные колебания ведомого вала всегда были проблемой при использовании приводов VSD как в конфигурации LCI, так и VSI. Хотя амплитуды моментов пульсации достаточно малы по сравнению с приводным моментом, они могут вызывать резонансы при совпадении их частоты с собственной частотой вращения. Для сложных систем с высокой крутильной нагрузкой на валу требуется особый подход к процессу проектирования. Соответствующие риски могут быть устранены за счет последовательного проектирования механических и электрических узлов для обеспечения оптимальных режимов управления VSD.

**Таблица 1.** Сравнение LCI- и VSI-систем с точки зрения питающей сети

Характеристика	LCI	VSI
Гармонические искажения питающей сети	Используются инженерные решения	
Сквозные потери источника питания	++	+
Коррекция коэффициента мощности	Требуется	Не требуется

Преобразователи разных типов различаются уровнем генерируемых гармоник и механизмом возбуждения резонансов. В целом, инверторы VSI генерируют меньшие амплитуды 6- и 12-й гармоник, чем LCI, тем не менее они присутствуют, и это необходимо учитывать. Для уменьшения крутящих моментов пульсации в оборудовании с приводом LCI с самого начала разработки использовался двигатель с двумя группами обмоток.

### Особенности питающей сети

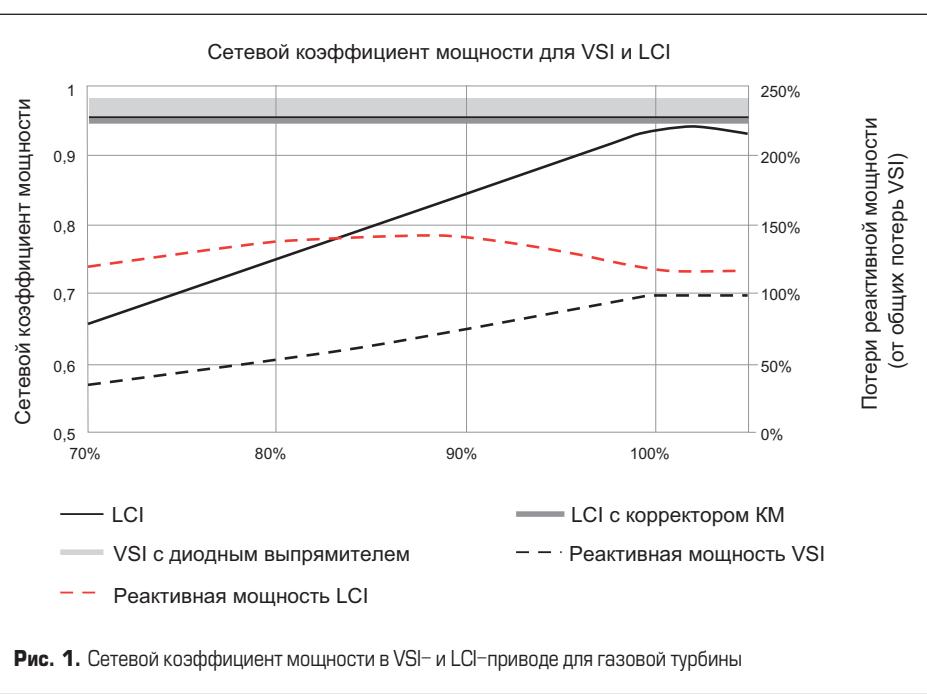
**Коэффициент мощности ( $\cos \phi$ ):** для приводов VSD высокой мощности в большинстве топологий VSI используется неуправляемый выпрямитель (диодный мост). В этом случае коэффициент мощности определяется индуктивной нагрузкой в контуре регулирования, зависящей от времени коммутации, которое, в свою очередь, зависит от фактического напряжения коммутации, тока нагрузки и ее импеданса. Низкий импеданс сети/трансформатора, высокий уровень напряжения и малые токи нагрузки повышают коэффициент мощности. Величина  $\cos \phi$  также определяется схемой (количеством фаз) выпрямителя, поскольку разные схемы диодных мостов имеют и разные импедансы. Чем больше фаз, тем лучше коэффициент мощности, в правильно спроектированной системе его величина для любой рабочей точки может превышать 0,95.

В приводах с инверторами VSI могут использоваться активные сетевые выпрямители, если необходима двухнаправленная передача энергии. В этом случае коэффициент мощности можно регулировать в широком диапазоне, но обычно поддерживается  $\cos \phi = 1$ .

Как правило, схемы коррекции коэффициента мощности в VSI-системах не требуются.

Для приводов с LCI коэффициент мощности зависит от рабочей точки и схемного решения системы. Величина  $\cos \phi$  пропорциональна соотношению напряжения двигателя и сети. Напряжение на моторе увеличивается пропорционально скорости, соответственно растет и коэффициент мощности сети. Из-за наличия требований к  $\cos \phi$  и диапазону скоростей в LCI-инверторах часто требуется схема компенсации. Измерения режимов промышленного компрессорного привода с LCI с использованием современных алгоритмов управления показывают значительные улучшения по сравнению с традиционными методами. При частоте вращения 92%, крутящем моменте 82% и напряжении сети 100% было достигнуто повышение коэффициента мощности с 0,83 до 0,93. На рис. 1 показано, что при использовании корректора коэффициента мощности (KKM) приводы с VSI и LCI могут достигать одинаковой величины  $\cos \phi$ .

**Гармонические искажения:** в общем виде VSD представляет собой нелинейную нагрузку, создающую гармонические искажения тока. Уровень искажений определяется режимами регулирования напряжения в индуктивных цепях VSI и LCI. Гармонический состав также зависит от угла отсечки выпрямителя, который для диодных мостов можно считать равным нулю ( $\alpha = 0$ ). Гармоники тока рассчитываются в соответствии с методикой, изложенной в IEC/TR 60146-1-2. Линейной зависимости между углом отсечки и амплитудами гармоник не существует, тем не менее они имеют тенденцию расти с увеличением фазного угла.



**Рис. 1.** Сетевой коэффициент мощности в VSI- и LCI-приводе для газовой турбины

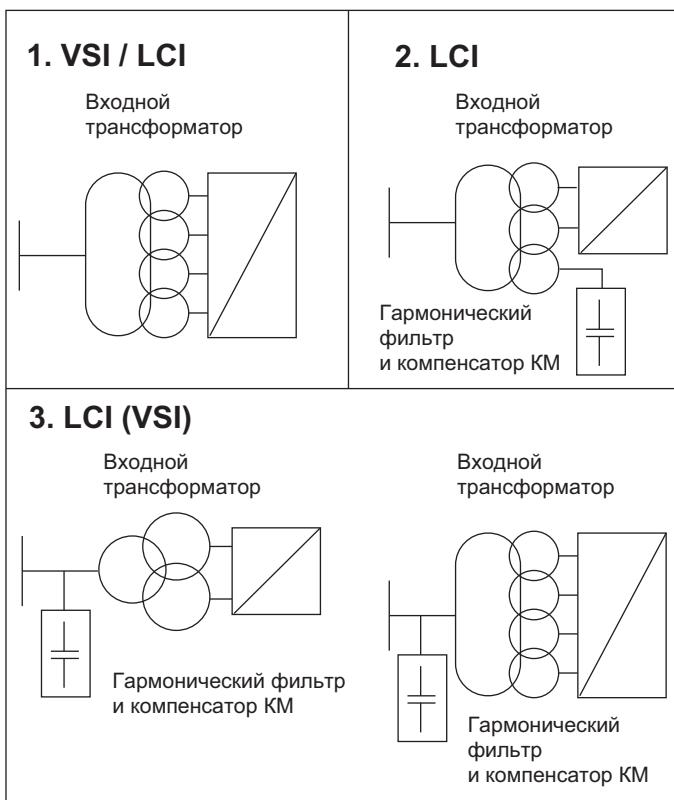


Рис. 2. Варианты конфигурации сети для VSI и LCI, позволяющие уменьшить гармонические искажения и скомпенсировать сетевой коэффициент мощности выпрямителя

Независимо от технологии VSI или LCI, уровень гармонических искажений может быть в определенной степени уменьшен за счет увеличения количества фаз выпрямителя — на практике можно реализовать даже 24- или 36-импульсную схему. Однако это зависит от точности фазового сдвига обмоток трансформатора («половину обмотки» реализовать нельзя). Дальнейшее увеличение числа импульсов нецелесообразно, поскольку в таком случае невозможно обеспечить векторную группу трансформатора с требуемыми допусками.

Наиболее предпочтительными считаются 24- и 36-импульсные выпрямители, самые рас-

пространенные варианты организации сети показаны на рис. 2. Конфигурация 1 используется как для VSI, так и для LCI в тех случаях, когда не требуется фильтрация гармоник и компенсация коэффициента мощности. Для LCI рабочий диапазон должен быть небольшим и близким к номинальной частоте вращения, в противном случае применяются другие способы компенсации  $\cos \phi$ .

Характеристики 24-импульсной системы в отношении уровня гармоник в типовых условиях работы достаточны для соответствия международным стандартам. Если требуется компенсация КМ для LCI, то для уменьшения уровня гармонических искажений используется

фильтр. В этом случае для снижения сложности предпочтительнее 12-импульсный выпрямитель. Размер фильтра (реактивная мощность в МВАр) определяется требуемым коэффициентом мощности сети и рабочими режимами. Такой фильтр может легко справиться с гармоническими искажениями, создаваемыми 12-импульсным выпрямителем, и обеспечить соответствие сетевым стандартам. Конфигурация 2 или 3 может использоваться для компенсации  $\cos \phi$  и уменьшения амплитуды гармоник в LCI системе.

**Режим ride-through (перебои в подаче питания):** ASD-системы на базе VSI и LCI способны бороться с перебоями в подаче напряжения питания различными способами. Остановку привода можно предотвратить даже при отключении сети на несколько секунд за счет усовершенствованного программного обеспечения. Максимально допустимая продолжительность отключения электроэнергии зависит от нагрузки, типа электрической машины и фактических режимов работы перед пропаданием питания. Инвертор VSI способен обеспечить частичный крутящий момент при уровне сетевого напряжения 70–80%. Когда напряжение на DC-шине становится слишком низким, привод переходит в режим ride-through, в котором мотор работает в качестве генератора для компенсации внутренних потерь преобразователя. Энергия, запасенная во вращающейся системе «двигатель — нагрузка», используется для поддержания заряда в звене постоянного тока (рис. 3).

Система с LCI обладает гораздо большей способностью противостоять сбросам питания, чем в случае VSI. Это объясняется наличием активного каскада выпрямления и тем, что развязка со стороны моторного инвертора не зависит от блока конденсаторов. Благодаря современным методам управления LCI может обеспечить частичное снижение крутящего момента при спаде сетевого напряжения до уровня ниже 50%. Использование основанных на оптимизации «прогнозирующих моделей» позволяет поддерживать работоспособность приводного оборудования даже в еще более широких пределах. Оценка остаточной мощности при провалах сетевого питания компрессорной системы 41,2 МВт, приводимой в действие LCI, представлена на рис. 4.

### Вопросы масштабирования

Для повышения мощности системы необходимо масштабирование. Существует четыре основных способа увеличения масштаба VSD с помощью последовательного или параллельного подключения следующих компонентов:

- Полупроводниковые приборы: последовательное включение полупроводников означает отсутствие изменений в топологии преобразователя или в схеме управления. Для увеличения мощности и напряжения LCI силовые ключи (тиристоры) подключаются последовательно. Тиристоры — очень надежные приборы, поэтому резервирование «n + 1», как правило, не требуется, но легко обеспечивается.

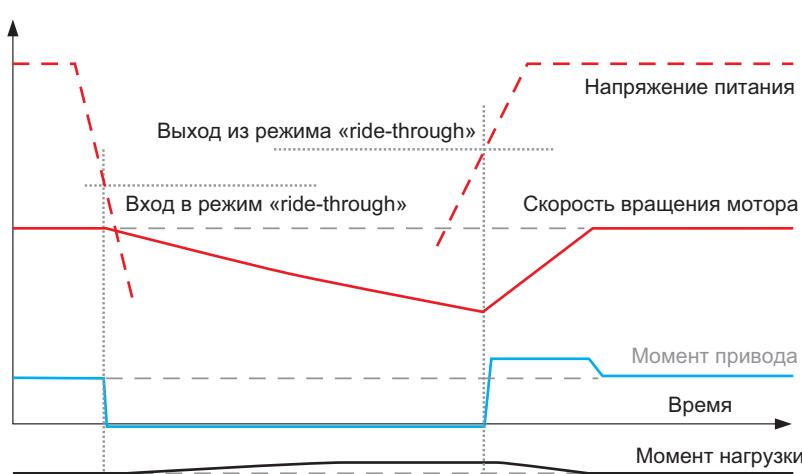


Рис. 3. Работа привода VSI при входе в режим ride-through (кратковременный сброс питания) и выходе из него

2, 3) Инверторы: последовательное или параллельное соединение инверторов изменяет конфигурацию системы. Последовательное включение формирует многоуровневый инвертор (MLI), для которого требуется сложный входной многообмоточный трансформатор. Преимуществом MLI является улучшенная (многоуровневая) форма выходного сигнала, которая может быть оптимизирована с помощью сложных систем управления.

Увеличение номинальной мощности и тока без увеличения класса напряжения реализуется путем параллельного соединения VSI.

4) VSD: параллельное включение VSD подразумевает использование изделий стандартного размера, что увеличивает сложность сборки, схемы управления и защиты. Такой подход обеспечивает избыточность на системном уровне VSD, что полезно только в тех случаях, когда устройства имеют большие размеры или процесс допускает снижение мощности. Тем не менее в системах на основе LSI и VSI используется параллельное соединение ASD для наращивания мощности.

### Надежность и доступность

При оценке надежности изделия такой показатель, как среднее время наработки на отказ (MTBF), и аналогичные параметры следует использовать с осторожностью. Они актуальны при сравнении различных компоновок одного и того же привода. В то же время они оказываются бесполезными при сравнении надежности изделий от разных поставщиков из-за различных подходов, которые обычно используются для получения соответствующих цифр. Показатели надежности могут пригодиться для сравнения двух различных систем в том случае, если один и тот же поставщик или оператор применил единый подход к нормированию соответствующих параметров. При этом невозможно провести независимое от поставщика сравнение показателей надежности между топологиями на основе VSI и LCI. Очевидно, что VSD является наиболее сложным компонентом системы, а потому имеет смысл сосредоточиться на нем.

В таблице 2 представлено сравнение ожидаемой величины интенсивности отказов различных топологий в двух независимых системах (20 и 50 МВт), в качестве эталона для обоих случаев используется надежность VSI, принятая за 1. Причина, по которой LCI имеет преимущество на 20 МВт, заключается в более простой топологии. LCI сохраняет свое преимущество и при более высокой мощности, поскольку для его масштабирования требуется меньше дополнительных компонентов.

Опыт эксплуатации показывает, что только около 25% отключений связаны непосред-

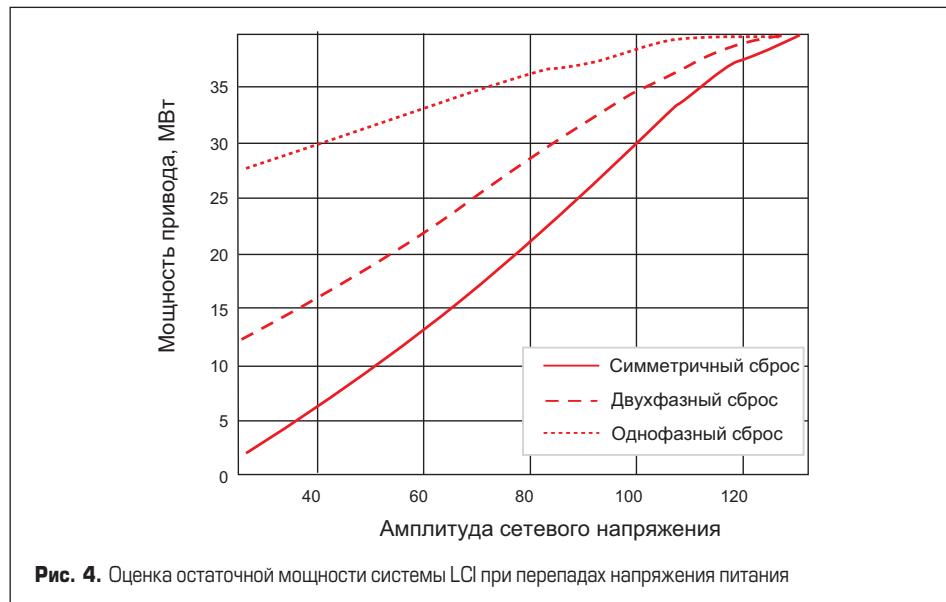


Рис. 4. Оценка остаточной мощности системы LCI при перепадах напряжения питания

ственno с приводом. Из этого количества 90% обусловлены конструкцией преобразователя и процессом его внедрения, а оставшиеся 10% связаны с параметром MTBF (наработка на отказ) компонентов. Это означает, что только около 2,5% всех отключений объясняются проблемами надежности компонентов. Наиболее важным фактором является качество проектирования системы, включая сетевую интеграцию, механическую и электрическую совместимость и защиту системы. Кроме того, постоянная модернизация и достаточная степень зрелости оборудования обеспечивают его высокую доступность.

Если VSD-привод должен работать в течение многих лет без остановки, по расписанию или не по расписанию, необходимо обеспечить его резервирование на «макроуровне» путем использования полностью аналогичного либо резервного преобразователя. Существует множество способов реализации полного резервирования привода, одна из возможностей основана на следующих граничных условиях:

- допускается нулевой крутящий момент в течение <150 мс при отказе привода;
- для этого требуется резервный VSD и (если нужно) система возбуждения, то есть еще один конвертер возбуждения;
- оба VSD полностью независимы, включая управление и охлаждение, и рассчитаны на 100% мощность двигателя.

Из-за различий в концепциях защиты VSI и LCI схема LCI может иметь сетевой автоматический выключатель на вторичных обмотках

входного трансформатора. Это означает, что резервирование входного трансформатора VSD необязательно и не влияет на производительность LCI. Предполагаемая схема системы резервирования показана на рис. 5. Сетевой фильтр не нужен, поскольку критически важные системы VSD спроектированы с учетом обеспечения полного крутящего момента без него.

Топология LCI считается лучшей, поскольку развязка каналов 1 и 2 достигается с помощью тиристоров в заблокированном состоянии, она не зависит от состояния сетевого автомата защиты (MCB) и выходных коммутаторов (S1/2). Кроме того, здесь не требуется заряд конденсаторов DC-шины, и MCB может быть включен в любое время. Если S1/2 замкнуты и производится мониторинг напряжения в сети и на двигателе, то контроллер управления LCI всегда имеет информацию о состоянии двигателя (и сети). При наличии обратной связи по нулевому току неисправной системы управление может быть немедленно блокировано.

### «Право на жизнь» имеют оба решения: VSI и LCI

В статье дан обзор основных различий между технологиями VSI и LCI. Следует учитывать и такие важные аспекты системы, как безопасность, стоимость, эффективность и занимаемое пространство. Подводя итог, можно сделать вывод, что, несмотря на большое количество возможных вариантов VSI, выбор между VSI или LCI в системах высокой мощности можно сделать только на основе анализа всех описанных выше факторов.

Простая и хорошо зарекомендовавшая себя топология LCI гарантирует высокую надежность, в то время как приводы на базе VSI обеспечивают большую гибкость с точки зрения системной интеграции. По мере разработки моделей и алгоритмов прогнозирующего управления LCI разрыв в динамических характеристиках этих двух концепций сокращается.

Таблица 2. Сравнение относительных показателей надежности VSI и LCI при различной мощности на валу

Мощность на валу	20 МВт		50 МВт	
	VSI	LCI	VSI	LCI
Относительная надежность	1,0	1,1	1,0	1,4

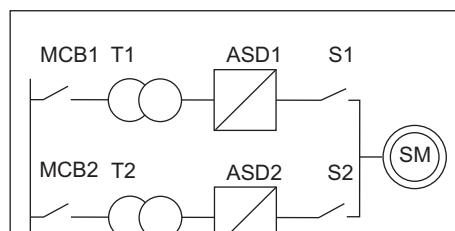


Рис. 5. Схема резервной системы VSD, включающей входные трансформаторы

# Источники питания SmartPower нового поколения.

## Максимальная эффективность и компактность

**В статье рассматриваются технические характеристики и особенности применения DC/DC-преобразователей нового поколения от компании SmartPower. Устройства имеют высокую выходную мощность и предназначены для индустриальных, транспортных и других ответственных применений. Изделия обладают высокой плотностью мощности, эффективностью и компактностью.**

Тигран Гайказъян, к. т. н.

gt@ptkgroup.ru

Сегодня источники питания играют критически важную роль в электронных системах, обеспечивая надежное и стабильное электропитание. Новое поколение источников питания SmartPower серии DD7C представляет собой современные решения, разработанные с использованием передовых технологий, совершенной схемотехники и инновационных подходов (рис. 1). Эти устройства отличаются высокой эффективностью, точностью и надежностью, предоставляя высокие электрические характеристики и удовлетворяя разнообразные потребности различных приложений.

Компания SmartPower объявила о начале выпуска источников питания постоянного тока серии DD7C мощностью до 1680 Вт. Высоконадежные DC/DC-преобразователи для ответственных применений представлены в ультракомпактных корпусах с использованием технологии ChiP (Converter housing in Package, Converter-in-Package) и обеспечивают высокий КПД (до 97,5%), сверхвысокую плотность мощности (до 2735 Вт/дюйм<sup>3</sup>), малый вес (500 Вт в 29 г) благодаря современным технологиям, таким как фиксированная частота переключения, синхронное выпрямление, защита от внешних шумов и электромагнитных помех. В преобразователях постоянного тока серии DD7C предусмотрены передовые технологии обработки и управления энергией,

### Введение

компоновки для повышения производительности, гибкости, надежности и экономической эффективности компонентов питания.

Области применения продукции SmartPower:

- гражданская авиация и космическая промышленность;
- железнодорожный транспорт и инфраструктура;
- атомная, тепловая и гидроэнергетика;
- газовый и нефтедобывающий сектор;
- оборонно-промышленный комплекс;
- автомобильная промышленность;
- телекоммуникационный сектор;
- судостроительная отрасль.

### Подробно о топологии и особенностях

Большим преимуществом источников питания SmartPower серии DD7C является соответствие характеристикам мировых производителей (табл. 1). Серия DD7C — это полный аналог источников питания Vicor серий BCM, DCM, VCM и других в корпусах ChiP.

Обладая мощностью 25–1680 Вт и полным набором входных напряжений в диапазонах 2:1 и 4:1, а также широким рядом выходных напряжений 3,3–48 В, серия DD7C полностью удовлетворяет требованиям разработчиков электронных устройств в изделиях для ответственных применений.



Рис. 1. Источники питания SmartPower серии DD7C

Рассмотрим линейку преобразователей SmartPower по принципу действия:

- BCM (Bus Converter Module).

BCM-модули разработаны для систем распределенного питания, где требуется преобразование напряжения. Они обеспечивают высокую эффективность и высокий коэффициент мощности за счет использования преобразования на основе архитектуры шины. Источники питания BCM предлагают высокую плотность мощности и конвертируют входное постоянное напряжение в шинное напряжение с высокой точностью и надежностью.

- DCM (DC-DC Converter Module).

Источники питания DCM разработаны для преобразования постоянного напряжения в стабилизированное напряжение, подходящее для различных приложений. Обладают широким диапазоном входного напряжения, высокой плотностью мощности и богатым набором выходных напряжений. DCM-модули имеют интегрированный контроллер и поддерживают параллельное подключение, что облегчает масштабирование и повышает надежность системы.

- VCM (VI Chip Modular).

VCM-модули представляют собой мощные источники питания, действующие с рабочими напряжениями 9–384 В, обеспечивают точное и стабильное выходное напряжение с высокой надежностью и устойчивостью к нагрузочным колебаниям. Источники питания VCM оснащены защитными механизмами от перегрузок, короткого замыкания и перегрева, обеспечивая безопасную и надежную работу.

К преимуществам источников питания SmartPower нового поколения можно отнести высокую эффективность, компактный размер, широкий диапазон входного напряжения и широкий выбор выходных напряжений. Они обладают различными функциями защиты и высокой надежностью.

Основные характеристики источников питания SmartPower серии DD7C:

- максимальная мощность: до 1680 Вт;
- диапазон входных напряжений: 2:1, 4:1;
- соответствие стандарту GJB150A-2009 (аналог MIL-STD-810G);
- эффективность: до 97,5%;
- диапазон рабочей температуры: -55...+100 °C;
- конструктивное соответствие 3-му поколению источников питания Vicor;
- возможность параллельной работы до восьми модулей.

В таблице 2 представлена информация для замены модулей Vicor 3-го поколения на ис-

**Таблица 1.** Соответствие SmartPower характеристикам мировых производителей

Бренд	Изолированные ИП		Неизолированные ИП	Фильтры ЭМС	Линейные регуляторы
	AC/DC	DC/DC			
Gaia converter	◆	◆			
Infineon (IR)		◆		◆	◆
Microsemi		◆			
Vicor	◆	◆	◆	◆	
VPT		◆	◆	◆	
SynQor	◆	◆	◆	◆	

**Таблица 2.** Соответствие SmartPower источникам питания Vicor 3-го поколения

Наименование SmartPower	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходная мощность, Вт	Габариты, мм	Замена для Vicor
DD7C-36N-LG16	16–50	3,3–48	25–50	16,5×22×6,73	PI31xx-00-HVMZ
DD7C-28N-LG16	9–50	3,3–48	25	16,5×22×6,73	-
DD7C-24N-LG16	18–36	3,3–48	25–50	16,5×22×6,73	-
DD7C-36N-LG32	16–50	26–50	120–500	32,5×22×6,73	MVTM36BF360M003A00
DD7C-40N-LG32	18–60	26–55	120–240	32,5×22×6,73	MVTM36BF360M003A00
DD7C-46N-LG32	38–55	5–55	400–600	32,5×22×6,73	PRM48BF480Tx0B00
DD7C-50N-LG32	45–55	5–55	400–600	32,5×22×6,73	PRM48JF480M500A00
DD7C-55N-LG32	36–75	20–55	400–600	32,5×22×6,73	PRM48AF480M400A00
DD7C-38F-LG32	26–50	3–24	120	32,5×22×6,73	-
DD7C-40F-LG32	26–55	4–32	200–300	32,5×22×6,73	VTM48EFxxxT0xxxA00
DD7C-46F-LG32	38–55	4–32	200–300	32,5×22×6,73	BCM48BFxxxMxxxxA00
DD7C-36N-LG38	16–50	3,3–48	120–320	38,72×22,8×7,21	DCM3623T50MxxxxM00
DD7C-28N-LG38	9–50	3,3–48	80–160	38,72×22,8×7,21	DCM3623T50TxxxxM00
DD7C-24N-LG38	18–36	3,3–48	120–320	38,72×22,8×7,21	DCM3623T36GxxxxM00
DD7C-48N-LG38	36–75	5–48	160–320	38,72×22,8×7,21	DCM3623T75HxxxxM00
DD7C-290N-LG47	160–420	3,3–48	150–500	47,91×22,8×7,21	DCM4623TD2KxxxxM00
DD7C-210N-LG47	200–420	3,3–48	150–600	47,91×22,8×7,21	DCM4623TD2HxxxxM00
DD7C-270N-LG47	120–420	3,3–48	110–375	47,91×22,8×7,21	DCM4623TD2NxxxxM00
DD7C-290W-LG4665F	160–420	3,3–48	150–500	51,6×39,2×9,8	-
DD7C-290W-LG4665F	200–420	3,3–48	150–600	51,6×39,2×9,8	-
DD7C-335N-LG61	260–410	12; 24	816–1500	61×25,14×7,21	BCM384P120M1K5AC1
DD7C-380N-LG61	360–400	12; 24	816–1500	61×25,14×7,21	BCM6123TD1ExxxM00
DD7C-335N-LG61	260–410	48	816–1680	63,3×22,8×7,21	BCM400P500M1KxA30
DD7C-380N-LG61	360–400	48	816–1680	63,3×22,8×7,21	-
DD7C-290W-LG4651F	160–420	3,3–48	150–500	65×27,2×9,8	-
DD7C-310N-LG4651F	200–420	3,3–48	150–600	65×27,2×9,8	-

точники питания от SmartPower. Следует отметить, что номенклатура серии DD7C шире, чем линейка преобразователей Vicor. Существуют модели, не имеющие аналогов и обладающие уникальными характеристиками для использования в перспективных проектах.

В качестве примера рассмотрим источник питания DD7C322–24N12-M-LG38 (рис. 2) постоянного тока мощностью 320 Вт в корпусе HALF CHIP (38,72×22,8×7,21 мм) с входным напряжением 16–50 В, рядом выходных напряжений 3,3–48 В. Конструктивно и по расположению выводов полностью соответствует

источнику питания от компании Vicor — DCM3623T36G13C2M00.

Основные параметры источника питания DD7C322–24N12-M-LG38 представлены в таблице 3.

Источники питания SmartPower серии DD7C имеют широкий спектр применений в различных отраслях. Вот несколько примеров применения данных источников питания:

1. Промышленность: источники питания DD7C могут использоваться в различных промышленных системах, таких как робототехника, автоматические линии производства, электрооборудование и промышленные

**Таблица 3.** Основные параметры источника питания DD7C322–24N12-M-LG38

Параметр	Мин.	Типичное	Макс.	Заметки
Входное напряжение, В	16	28	50	
Выходное напряжение, В	11,88	12	12,12	100% нагрузки, +25 °C
Эффективность, %		92,2		Номинальное напряжение, 100% нагрузки, +25 °C
Пульсации, мВ		200		Пик-пик, номинальное напряжение, 100% нагрузки, 20 МГц полоса пропускания
Подстройка выходного напряжения, В	7,2		13,2	
Регулирование при нагрузке, В		0,2		10–100% нагрузки
Ток нагрузки, А	0		26,67	
Ограничение тока, А	26,67	29,6	34	



**Рис. 2.** Источник питания DD7C322–24N12-M-LG38

**Таблица 4.** Руководство для заказа

Бренд	Тип	Серия	Мощность, Вт	Входное напряжение, В	Количество выходов	Выходное напряжение, В	Рабочая температура, °C	Корпус
D	D	7C	322	24	N	12	M	LG38
SmartPower	D: DC/DC	7C: DC/DC new gen	122 = 120 Вт 182 = 180 Вт 322 = 320 Вт	24 = 16–50 В	N=одиночный	3,3; 5; 12; 15; 24; 28; 36; 48	H: -40...+100 °C M: -55...+100 °C	Корпус 3872

компьютеры. Они обеспечивают стабильное электропитание для надежной работы этих систем.

2. Телекоммуникации: в сфере телекоммуникаций источники питания SmartPower серии DD7C применяются в оборудовании связи, сетях передачи данных и коммутационных устройствах. Они обеспечивают высокую эффективность и стабильное питание, что важно для непрерывной работы коммуникационной инфраструктуры.
3. Медицина: в медицинской отрасли источники питания DD7C используются в специализированном оборудовании, таком как мониторы пациентов, аппараты искусственного дыхания и лабораторное оборудование. Они обеспечивают стабильное питание для жизненно важных устройств.
4. Авиация: модули DD7C могут быть применены в авиационных системах, таких как авионика, бортовые системы и приборы. Они отличаются небольшими массогабаритными характеристиками, высокой энергоэффективностью и надежностью, что особенно важно в авиационной сфере.
5. Энергетика: в области энергетики источники питания SmartPower находят применение в солнечных и ветровых установках, энергосистемах и резервных источниках электропитания. Они обеспечивают надеж-

ное и эффективное питание для устойчивых источников энергии.

В таблице 4 предоставлено руководство по составлению номера заказа (part number guide).

Например, рассмотренный нами источник питания DD7C322-24N12-M-LG38 является преобразователем постоянного тока (DD), серии (7C), мощностью 320 Вт (322), с диапазоном входного напряжения 16–50 В (24), одним (N) выходным напряжением 12 В (12) с диапазоном рабочей температуры -55...+100 °C (M) и в корпусе 3872 (LG38).

### Заключение

Разработка источников питания серии DD7C от компании SmartPower — это значительный прогресс в области электропитания систем. Благодаря своим высоким показателям эффективности, стабильности и надежности данные системы становятся оптимальным выбором для различных отраслей, включая промышленность, телекоммуникации, медицину и авиацию. Технологические инновации, такие как модульность, увеличение плотности мощности и интегрированные функции защиты, делают устройства серии DD7C высокопроизводительными и гибкими решениями.

Дальнейшее развитие компактных источников питания SmartPower видится в наращивании

эффективности и высокой надежности, а также в применении инновационных подходов, чтобы удовлетворить растущие потребности современных электронных систем. С постоянным развитием технологий и новыми требованиями отрасли они продолжат играть ключевую роль в обеспечении энергоэффективности и производительности систем в будущем.

Преимущества SmartPower:

- Соответствие характеристикам зарубежных производителей высоконадежных источников питания VPT, Interpoint, SynQor, Vicor, Traco Power и др.
- Широкий спектр номенклатуры изделий (по мощности, диапазону рабочих напряжений и температурных условий эксплуатации).
- Для оценки качества продукции и проведения испытаний доступен заказ образцов.
- Техническая и логистическая поддержка российским представительством SmartPower.
- Срок производства от 8–12 недель.
- Возможность производства по требованиям заказчика.

### Литература

1. Техническая документация на продукцию SmartPower
2. [www.smpower.hk/](http://www.smpower.hk/)

### Специализированные конференции

## ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2024



14  
февраля

19-я специализированная конференция

**ПТА – ЕКАТЕРИНБУРГ**

27  
марта

5-я специализированная конференция

**ПТА – КАЗАНЬ**

28  
мая

15-я специализированная конференция

**ПТА – САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

25  
сентября

4-я специализированная конференция

**ПТА – УФА**

30  
октября

14-я специализированная конференция

**ПТА – НОВОСИБИРСК**

Организатор «Экспотроника»

+7 (495) 234-22-10 / [www.pta-expo.ru](http://www.pta-expo.ru)

реклама

# Реальные возможности импортозамещения

## средств силовой электроники

**В условиях многочисленных, обширных и жестких санкций, применяемых к России западными странами, весьма актуален вопрос о реальных возможностях импортозамещения различных по назначению и видам зарубежных средств силовой электроники, которые до настоящего времени еще достаточно широко применяются в нашей стране. Частично эти возможности предлагается рассмотреть на примере некоторых видов средств силовой электроники, выпускаемых ООО «НТЦ АКТОР». Для этого приведем их технические характеристики и укажем на зарубежные аналоги таких средств.**

**Алексей Воронцов<sup>1</sup>**

av@aktor.ru

**Юрий Либенко<sup>1</sup>**

lib7636@mail.ru

**Андрей Четин<sup>1</sup>, к. т. н.**

chetin@aktorstc.ru

ООО «НТЦ АКТОР» разрабатывает и производит значительный ряд источников электропитания (ИЭ), регулируемых эквивалентов (имитаторов) электрических нагрузок и комплексов имитационных технических средств (КИТС) для проведения проверок и испытаний РЭА на устойчивость ее функционирования при кондуктивных силовых электромагнитных воздействиях по цепям электропитания РЭА различных направлений применения в виде нормированных и расширенных изменений значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ).

ИЭ различного вида и назначения широко применяются потребителями, работающими во всех областях электронного приборостроения на промышленных и ремонтных предприятиях, в научно-исследовательских и образовательных организациях. Все многообразие ИЭ по основному показателю — роду выходного тока — подразделяется на два больших класса: источники электропитания постоянного или переменного тока.

Кроме того, исходя из основного назначения и условий применения, источники электропитания подразделяются на: лабораторные, промышленные, специальные (например, авиационные аэродромные, авиационные бортовые и другие виды), а по конструкционным особенностям на автономные, встроенные, защищенные и другие виды.

Источники электропитания постоянного тока, как правило, характеризуются количеством независимых выходных каналов, номинальными значениями, диапазонами и способами регулирования значений канальных выходных напряжений, а также значениями их пульсаций, максимальными значениями канальных выходных токов, возможностью автоматизированно реализовывать заданные пользователем последовательности изменений выходных параметров (сценарии), наличием стандартных интерфейсов для управления от внешнего персонального компьютера, наличием специализированного программного обеспечения (СПО) для создания с их участием автоматизированных контрольно-испытательных и измерительных информационных систем.



PSW7 GW Instek



Genesys TDK Lambda



Chroma 6463-3



AC6803A Keysight (Agilent)



EA Elektro-Automatik



PINBA13-2/40/1200-KP (ООО «НТЦ АКТОР»)

**Рис. 1.** Внешний вид источников питания различных производителей

**Таблица 1.** Характеристики источников электропитания постоянного тока ООО «НТЦ АКТОР» и их аналоги зарубежного производства

Диапазон регулировки выходного напряжения 0–50 В					
Максимальное значение выходного тока, А	50	100	300	500	1000
ИЭ производства ООО «НТЦ АКТОР»	ИП220-50/40-КР	ИП380-50/100-КР	ИП380-50/300-КР	ИП380-50/500-КР	ИП380-50/1000-КР
Погрешность воспроизведения выходного напряжения	$\pm(1\% + 0,5\% \times (U_{\max} - U_{\text{уст}})/U_{\max})$				
Пульсации напряжения пик-пик / rms	100 мВ/50 мВ	100 мВ/50 мВ	100 мВ/50 мВ	200 мВ/75 мВ	200 мВ/75 мВ
Погрешность измерения выходного тока	$\pm(1\% + 0,5\% \times (I_{\max} - I_{\text{изм}})/I_{\max}) + 1 \text{ ед. мл. разряда}$				
Модуляция частотой в диапазоне*	5 Гц – 15 кГц				
Амплитуда модуляции*	до 5 В				
Программирование последовательностей (сценариев)	4 функции, программируемые пользователем, управление сценариями СПО ADControl (ОС Windows, ОС Linux)				
Интерфейс**	RS-485 2wire, Ethernet (протоколы ModBus, ModBus TCP IP, VISA TCP IP SCPI-команды)				
Аналоги зарубежного производства	PSW7 80-40.5 PSU7 60-25 GEN50-30	EA-PSI 9040-120 GEN60-85 SM66-AR-110	EA-PS 9080-340 GSP50-300 RP7945A	EA-PS 9080-510 SM 70-CP-450P324	EA-PSB 10060-1000 RP7943A

**Таблица 1** (продолжение)

Диапазон регулировки выходного напряжения 0–100 В				
Максимальное значение выходного тока, А	20	50	100	200
ИП производства ООО «НТЦ АКТОР»	ИП220-100/20-КР	ИП380-100/50-КР	ИП380-100/100-КР	ИП380-100/200-КР
Погрешность воспроизведения выходного напряжения	$\pm(1\% + 0,5\% \times (U_{\max} - U_{\text{уст}})/U_{\max})$			
Пульсации напряжения пик-пик / rms	100 мВ/50 мВ	100 мВ/50 мВ	200 мВ/75 мВ	200 мВ/75 мВ
Погрешность измерения выходного тока	$\pm(1\% + 0,5\% \times (I_{\max} - I_{\text{изм}})/I_{\max}) + 1 \text{ ед. мл. разряда}$			
Модуляция частотой в диапазоне*	5 Гц – 15 кГц			
Амплитуда модуляции*	до 5 В			
Программирование последовательностей (сценариев)	4 функции, программируемые пользователем, управление сценариями СПО ADControl (ОС Windows, ОС Linux)			
Интерфейс**	RS-485 2wire, Ethernet (протоколы ModBus, ModBus TCP IP, VISA TCP IP SCPI-команды)			
Аналоги зарубежного производства	PSB7 1800M GEN100-15	GEN100-33	EA-PS 9080-100 GEN100-100 SM70-90	EA-PS 9500-10 RP7945A

**Таблица 1** (продолжение)

Диапазон регулировки выходного напряжения 0–500 В		
Максимальное значение выходного тока, А	4	10
ИП производства ООО «НТЦ АКТОР»	ИП220-500/4-КР	ИП380-500/10-КР
Погрешность воспроизведения выходного напряжения	$\pm(1\% + 0,5\% \times (U_{\max} - U_{\text{уст}})/U_{\max})$	
Пульсации напряжения пик-пик / rms	200 мВ/75 мВ	200 мВ/75 мВ
Погрешность измерения выходного тока	$\pm(1\% + 0,5\% \times (I_{\max} - I_{\text{изм}})/I_{\max}) + 1 \text{ ед. мл. разряда}$	
Модуляция частотой в диапазоне*	5 Гц – 15 кГц	
Амплитуда модуляции*	до 5 В	
Программирование последовательностей (сценариев)	4 функции, программируемые пользователем, управление сценариями СПО ADControl (ОС Windows, ОС Linux)	
Интерфейс**	RS-485 2wire, Ethernet (протоколы ModBus, ModBus TCP IP, VISA TCP IP SCPI-команды)	
Аналоги зарубежного производства	GEN600-2.6 SM400-AR-8	GEN500-10 SM660-AR-11 GSP300-51 RP7961A GEN500-20

Примечания. \*требуется дополнительный модуль ввода напряжения модуляции, исполнение КРС.

\*\* Ethernet — опция, устанавливается по требованию заказчика.

**Источники электропитания переменного тока** характеризуются количеством фаз выходного напряжения, количеством независимых выходных каналов, номинальными значениями, диапазонами и способами регулирования значений канальных выходных напряжений и их частоты, а также значениями коэффициентов несинусоидальности, максимальными значениями канальных выходных токов, возможностью регулировать сдвиг фаз трехфазных выходных напряжений, возможностью автоматизированно реализовывать заданные пользователем последовательности изменений выходных параметров (сценарии), наличием стандартных интерфейсов для управления от внешнего персонального компьютера, наличием СПО для создания с их участием автоматизированных контрольно-испытательных и измерительных информационных систем.

В таблице 1 приведены характеристики источников электропитания постоянного тока, а в таблице 2 — переменного тока лабораторного исполнения производства ООО «НТЦ АКТОР» и их аналогов иностранного производства (GW Instek, TDK Lambda,

Keysight (Agilent), EA Elektro-Automatik, Delta Electronika, Chroma и др.). В таблицах показана лишь часть продукции ООО «НТЦ АКТОР» и некоторые зарубежные источники электропитания. При необходимости возможно изготовление предприятием источников электропитания с другими техническими характеристиками по техническим требованиям заказчика, а также оказание помощи потенциальному клиенту путем согласованного с ним подбора решения по замене зарубежного образца. Как показывает опыт разработки и поставки различного испытательного оборудования, в некоторых случаях возможна замена одного изделия на комплект из нескольких. Например, двунаправленный источник электропитания EA Elektro-Automatik можно заменить совокупностью традиционных отечественных источника электропитания и электронной нагрузки. В других случаях для выполнения полноценного импортозамещения достаточно обеспечить совместную работу нескольких отечественных источников электропитания. Некоторые виды источников электропитания, выпускаемых ООО «НТЦ АКТОР», внесены в Государ-

ственный реестр средств измерений, остальные могут быть аттестованы как испытательное оборудование по ГОСТ Р 8.568–2017 либо ГОСТ РВ 0008–002–2013. Внешний вид источников электропитания различных производителей представлен на рис. 1.

Еще одним реальным и перспективным направлением импортозамещающей деятельности ООО «НТЦ АКТОР» можно считать создание **аэродромных источников электропитания** для решения различных объемных и сложных задач, все больше возникающих у производителей авиационной техники — вертолетов, самолетов, БПЛА. Эти источники, во многом поставленные зарубежными производителями в предыдущий период, создают обширное поле деятельности для ООО «НТЦ АКТОР» по их замене на отечественные. У предприятия есть положительный опыт работ в этом направлении, как есть и планы усовершенствования данного вида продукции. На рис. 2 показан один из ранее созданных аэродромных источников электропитания переменного тока с выходной мощностью 32 кВ·А для аэродромного обслуживания вертолета МИ-38.

Таблица 2. Характеристики источников питания переменного тока ООО «НТЦ АКТОР» и их аналоги зарубежного производства

Наименование	ПНБА11-2/40/ 1200-КР	ПНБА 31-3/40/ 1200-КР	ПНБА 31-5/40/ 1200-КР	ПНБА13- 2/40/1200-КР	ПНБА33-3/40/ 1200-КР	ПНБА33-6/40/ 1200-КР	ПНБА33-10/40/ 1200-КР	
Выходная мощность, В·А	2000	3000	5000	2000	3000	6000	10000	
<b>Выходное напряжение фазное/линейное</b>								
Диапазон	5–40 В — 1 фаза			(5/8,6–40/70) В — 3 фазы				
Погрешность	$\pm(0,5\% + 0,5\% \times (U_{\max} - U_{\text{изм}})/U_{\max})$							
Дискретность установки, В	0,1			0,1				
<b>Частота выходного напряжения</b>								
Диапазон, Гц	15–1200					15–1200		
Погрешность, Гц				$\pm 0,1$				
Дискретность установки, Гц	0,5			0,5				
<b>RMS выходной ток (по фазе)*</b>								
Диапазон, А	0–55,5	0–83,3	0–128,8	0–18,5	0–27,7	0–55,5	0–92,6	
Погрешность	$\pm(0,5\% + 0,5\% \times (I_{\max} - I_{\text{изм}})/I_{\max})$							
Коэффициент несинусоидальности выходного напряжения	Не более 1%							
Модуляция частотой в диапазоне*	5 Гц — 15 кГц							
Амплитуда модуляции*	до 5 В							
Программирование последовательностей (сценариев)	4 функции, программируемые пользователем, управление сценариями СПО ADControl (ОС Windows, ОС Linux)							
Интерфейс**	RS-485 2wire, Ethernet (протоколы ModBus, ModBus TCP IP, VISA TCP IP SCPI-команды)							
Аналоги зарубежного производства	AC6803A	AC6804B	AC6804B	AC6803B	Chroma 4663-3	Chroma 4490-3	Chroma 4490-3	

Таблица 2 (продолжение)

Наименование	ПНБА11-2/ 160/1200-КР	ПНБА31-3/ 160/1200-КР	ПНБА31-6/ 160/1200-КР	ПНБА13-2/ 160/1200-КР	ПНБА33-4/ 160/1200-КР	ПНБА33-8/ 160/1200-КР	ПНБА33-12/ 160/1200-КР	ПНБА33-16/ 160/1200-КР
Выходная мощность, В·А	2000	3000	6000	2000	4000	8000	12000	16000
<b>Выходное напряжение фазное/линейное</b>								
Диапазон	40–165 В — 1 фаза			(40/70–165/285) В — 3 фазы				
Погрешность	$\pm(0,5\% + 0,5\% \times (U_{\max} - U_{\text{изм}})/U_{\max})$							
Дискретность установки, В	0,1В			0,1				
<b>Частота выходного напряжения</b>								
Диапазон, Гц	15–1200			15–1200				
Погрешность, Гц				$\pm 0,1$				
Дискретность установки, Гц	0,5			0,5				
<b>RMS выходной ток (по фазе)*</b>								
Диапазон, А	0–17,4	0–26 А	0–52,2	0–5,8	0–11,6	0–23,2	0–34,8	0–46,4
Погрешность	$\pm(0,5\% + 0,5\% \times (I_{\max} - I_{\text{изм}})/I_{\max})$							
Коэффициент несинусоидальности выходного напряжения	Не более 1%							
Модуляция частотой в диапазоне*	5 Гц — 15 кГц							
Амплитуда модуляции*	до 5 В							
Программирование последовательностей (сценариев)	4 функции, программируемые пользователем, управление сценариями СПО ADControl (ОС Windows, ОС Linux)							
Интерфейс**	RS-485 2wire, Ethernet (протоколы ModBus, ModBus TCP IP, VISA TCP IP SCPI-команды)							
Аналоги зарубежного производства	AC6803B	AC6804B	AC6804B	AC6803B	Chroma 4663-3	Chroma 4490-3	NSG1007	NSG1007

Таблица 2 (продолжение)

Наименование	ПНБА11-2/300/ 1200-КР	ПНБА31-4/300/ 1200-КР	ПНБА13-2/300/ 1200-КР	ПНБА33-4/300/ 1200-КР	ПНБА33-8/300/ 1200-КР	ПНБА33-16/300/ 1200-КР		
Выходная мощность, не более, В·А	2000	4000	2000	4000	8000	16000		
<b>Выходное напряжение фазное/линейное</b>								
Диапазон	10–300 В — 1 фаза	(10/17,3–300/520) В — 3 фазы						
Погрешность	$\pm(0,5\% + 0,5\% \times (U_{\max} - U_{\text{изм}})/U_{\max})$ , в диапазоне 70–300 В							
Дискретность установки, В	0,1							
<b>Частота выходного напряжения</b>								
Диапазон, Гц	15–1200							
Погрешность, Гц	$\pm 0,1$							
Дискретность установки, Гц	0,5							
<b>RMS выходной ток (по фазе)*</b>								
Диапазон, А	0–9	0–18	0–3	0–6	0–12	0–24		
Погрешность	$\pm(0,5\% + 0,5\% \times (I_{\max} - I_{\text{изм}})/I_{\max})$							
Коэффициент несинусоидальности выходного напряжения	Не более 1%							
Модуляция частотой в диапазоне*	5 Гц — 15 кГц							
Амплитуда модуляции, В*	до 5							
Программирование последовательностей (сценариев)	4 функции, программируемые пользователем, управление сценариями СПО ADControl (ОС Windows, ОС Linux)							
Интерфейс**	RS-485 2wire, Ethernet (протоколы ModBus, ModBus TCP IP, VISA TCP IP SCPI-команды)							
Аналоги зарубежного производства	AC6803B	AC6804A APS-77200	AC6803B	Chroma 4663-3	Chroma 4490-3	NSG1007		

Примечание. \*требуется дополнительный модуль ввода напряжения модуляции, исполнение КРС.

\*\*Ethernet — опция, устанавливается по требованию заказчика.



**Рис. 2.** Аэродромный источник электропитания переменного тока с выходной мощностью 32 кВ·А для аэродромного обслуживания вертолета МИ-38

**Эквиваленты (имитаторы) электрических нагрузок** с дискретно изменяемыми ручным или автоматизированным способом значениями рассеиваемой ими электрической мощности и с заданным шагом изменения предназначены для проверки источников электропитания, систем электроснабжения и генераторов электроэнергии постоянного и переменного (одно- и трехфазного) тока при частоте 50 или 400 Гц. Известные аналогичные и подобные эквиваленты электрических нагрузок выпускаются такими зарубежными фирмами, как NH Research, Chroma, и другими. ООО «НТЦ АКТОР» изготавливает эквиваленты электрических нагрузок по техническим требованиям заказчика или по техническим требованиям, задаваемым КИТС, воспроизводящими ПКЭ СЭС и автономных источников электроэнергии. Базовыми элементами электрической нагрузки являются малоиндуктивные (активные) резисторы типа РНМ собственной разработки. Диапазон мощностей нагрузок 200 Вт — 30 кВт. ООО «НТЦ АКТОР» также создает эквиваленты электрических нагрузок, не рассеивающих электрическую мощность, с рекуперацией части свободной электрической энергии для ее различного повторного применения.

В обозначении устройства содержатся следующие данные:

БН — блок нагрузок

ПрТ — переменный ток

15 — максимальная мощность, кВ·А (кВт для постоянного тока), рассеиваемая в непрерывном режиме работы

1 — количество фаз по входу (для переменного тока)

180 — максимальное напряжение, В (среднее по постоянному току или фазное действующее значение по переменному току)

100 — максимальный ток, А (средний по постоянному току или фазное действующее значение по переменному току)

К — конструктивно-климатическое исполнение (лабораторное)

Р — регулировка параметров

**Комплексы имитационных технических средств (КИТС)** зарубежного производства, как правило, в Россию не поставляются. В недалеком прошлом отдельные отечественные предприятия выполняли комплектование таких изделий с применением в них практически всех составных функциональных частей зарубежного производства, разрабатывая свое комплексное СПО, что сегодня не решает задачу поставки КИТС в целом в Россию. В каче-



**Рис. 3.** Эквивалент электрической (активной) нагрузки переменного тока БН-ПрТ-15-1/180/100-КР с рассеиванием электрической мощности производства ООО «НТЦ АКТОР»

стве примеров КИТС, созданных таким способом, можно привести испытательные системы переменного тока: трехфазных Profiline 2145, однофазных Profiline 2103 производства компании Teseq и другие.

Следует отметить, что КИТС различных назначений являются наиболее прогрессивно развивающимся видом продукции ООО «НТЦ АКТОР». Воспроизводящие ПКЭ СЭС и автономных источников электроэнергии постоянного и переменного (одно- и трехфазного) тока, КИТС обеспечивают различные виды проверок и испытаний РЭА для различных направлений применения: наземного (стационарной и подвижной), морского, авиационного, а также проведение технологических тренировок РЭА и ее основных функциональных частей. Возможно применение КИТС в составе других автоматизированных тестовых систем более высокого уровня, в том числе для обеспечения выполнения задач проверки РЭА критических объектов на соответствие требованиям к ее функциональной безопасности.

На рис. 4 представлен КИТС, воспроизводящий ПКЭ двух авиационных бортовых систем электроснабжения (СЭС) постоянного тока: 27 и 270 В и обеспечивающий проведение проверок и испытаний:

- систем электропитания бортовой РЭА и их функциональных частей, электроснабжение которых обеспечивается от любой из двух бортовых СЭС;
- систем электропитания бортовой РЭА, электроснабжение которых обеспечивается от двух разных бортовых СЭС.

КИТС воспроизводят виды и значения ПКЭ: а) СЭС постоянного тока:

- номинальные значения;
- установившиеся отклонения от номинальных значений (регламентированные и сверхпределные значения);



**Рис. 4.** КИТС для проверки и испытаний авиационной РЭА

- переходные отклонения от номинальных значений (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - пульсации напряжения (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - наложение высоковольтных импульсов напряжения (регламентированные и сверхпредельные значения);
- 6) СЭС переменного тока:
- номинальные значения;
  - установившиеся отклонения от номинальных значений (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - переходные отклонения от номинальных значений (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - небаланс напряжений трехфазных СЭС (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - изменение сдвига и чередования фаз трехфазных СЭС (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - девиация частоты (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - амплитудная модуляция напряжения (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - искажение синусоидальной формы напряжения (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - наложение высокочастотных пульсаций (регламентированные и сверхпредельные значения);
  - наложение высоковольтных импульсов напряжения (регламентированные и сверхпредельные значения).

Регламентированные виды и значения ПКЭ, воспроизводимых КИТС, соответствуют:

а) для РЭА наземных объектов (стационарных и подвижных):

- ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения;
- ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний;
- ГОСТ Р В 20.39.309-98 Комплексная система общих технических требова-

ний. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования;

- ГОСТ РВ 51937-2002 Системы электроснабжения передвижных радиоэлектронных объектов и объектов военной техники связи автономные. Типы. Технические требования;
- ГОСТ В 23653-79 Источники и преобразователи электрической энергии автономных систем электроснабжения средств военной техники. Нормы качества электрической энергии;
- ГОСТ В 21134-75 Системы электроснабжения средств военной техники автономные. Нормы качества электрической энергии;
- ГОСТ В 21999-86 Системы электроснабжения военных гусеничных машин. Нормы качества электрической энергии и методы контроля.

б) для РЭА морских объектов:

- ГОСТ РВ 2090-004-2008 Системы электроэнергетические корабельные. Общие технические требования;
- ГОСТ РВ 2090-006-2008 Устройства и изделия электротехнические корабельные. Общие технические требования;
- 14.326.023М. Методика проверки электрооборудования на соответствие требованиям по ИКП – 1992 г., ЦНИИСЭТ.

в) для РЭА авиационных объектов (наземных и бортовых):

- ГОСТ 19705-89 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии;
- ГОСТ Р 54073-2017 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии;
- Квалификационные требования КТ-160Г.

В качестве примера проведения работ по импортозамещению на предприятии ООО «НТЦ АКТОР» в настоящее время приведем сведения о создании двух комплектов стендового оборудования (КСО): постоянного (КСО-ПТ) и переменного трехфазного (КСО-ПрТ) тока со значением выходной мощности 30 кВт и 30 кВ·А соответственно. Оба КСО в совокупности представляют собой универсальный источник электроэнергии бортовых сетей постоянного и переменного тока (УИЭ СППТ), обеспечивающий электропитанием проверяемые различные системы корабельного бази-

рования со значениями ПКЭ, соответствующими ГОСТ РВ 2090-004-2008.

Поводом для выполнения данной работы стало обращение в ООО «НТЦ АКТОР» одного из ведущих предприятий морского направления о необходимости заменить ранее приобретенный для этих целей универсальный испытательный комплекс и мультифункциональный источник питания постоянного/переменного тока NETWAVE 30 компании NEMTEST с аналогичными значениями выходной мощности по постоянному и переменному току.

Следует отметить ряд преимуществ, которые становятся очевидными в нем и большинстве изделий конкретного исполнения по отношению даже к самым универсальным — исключается множество невостребованных функций, оптимизируются диапазоны значений параметров, добавляются некоторые отсутствующие возможности и максимально учитываются конструкционные особенности и особенности эксплуатации на конкретном предприятии, что дает выигрыш в итоговой стоимости отечественного изделия, упрощает выполнение гарантийных и постгарантийных обязательств, исключает зависимость от проблем у зарубежных производителей.

Эти обстоятельства настолько важны при проведении работ по импортозамещению устройств силовой электроники, что соавторы предполагают опубликовать более подробные данные по достигнутым результатам, учитывая возможный масштаб распространения в России как NETWAVE 30, так и его модификаций.

Вот некоторые главные выводы по результатам работы российских производителей в направлении импортозамещения:

1. На фоне ограничений поставок средств силовой электроники в Россию существует отечественная техника, способная успешно заменить зарубежную.
2. Продукция ООО «НТЦ АКТОР», как правило, дешевле аналогичной зарубежной. Предприятие постоянно работает над улучшением технических и эксплуатационных характеристик, решением вопросов по регистрации и аттестации своей продукции, а также необходимого поддержания ее эксплуатации у потребителей.
3. Введенные западными странами санкции и ограничения лишь усиленно стимулируют развитие самой разнообразной техники российского производства.

Москва, 105275  
ул. Уткина Дом 40

ООО ТЕХНО



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

## XY-400W

Станция для интенсивных теплоемких работ, для производства светодиодных панелей, для работы с многослойными печатными платами. Паяльник мощностью **400 Ватт!** Температурный диапазон от 100 -500°C Температурная компенсация ±50°C Режим энергосбережения

реклама

ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ  
опытное и серийное производство,  
проектирование, монтаж

КОНТРАКТНАЯ РАЗРАБОТКА  
И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ

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

# Руководство по быстрой зарядке аккумуляторных батарей.

Часть 2

**В первой части статьи были изучены некоторые проблемы, связанные с проектированием систем быстрой зарядки аккумуляторов. Установка датчика заряда в аккумуляторной батарее позволяет производителям оборудования (OEM) разрабатывать интеллектуальные зарядные устройства, которые повышают гибкость системы, минимизируют рассеиваемую мощность, обеспечивают безопасный процесс заряда/разряда и улучшают общие потребительские свойства. Во второй части статьи рассматриваются особенности реализации системы быстрой зарядки с параллельными батареями с использованием оценочных наборов и платы Raspberry Pi.**

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

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

**Перевод:  
Евгений Карташев**

## Оценка архитектуры 1S2P

Изучить особенности системы зарядки и протестировать ее функциональность можно с помощью различных оценочных комплектов. Как правило, они содержат все необходимые аппаратные и программные средства, а также инструменты на основе пользовательских интерфейсов GUI и API, необходимые для конфигурирования системы.

Однако оценка сложных систем, работающих с параллельными аккумуляторными ячейками, оказывается намного сложнее. Такие устройства имеют несколько различных блоков, характеристики которых необходимо четко определить. Разработчикам требуется написать программный код для считывания сигналов, генерируемых различными узлами системы, их анализа и принятия соответствующих мер.

Для примера рассмотрим систему быстрой зарядки двух параллельных ячеек Li+ с использованием MAX17330 — такая возможность указана в техническом описании микросхемы. Для реализации системы требуются две IC MAX17330, каждая из которых управляет одним элементом Li+, и понижающий преобразователь (такой как MAX20743) с возможностью изменения выходного напряжения в режиме реального времени.

Микроконтроллер необходим для настройки и управления зарядкой аккумулятора, а также для обеспечения связи между двумя микросхемами. Для тестирования выбрана оценочная плата Raspberry Pi, программируемая на языке Python и широко используемая для оценки подобных систем. Плата

Raspberry Pi управляет связью по протоколу I<sup>2</sup>C и регистрирует основные системные параметры, полезные для оценки и отладки, включая ток заряда, напряжение батареи и уровень заряда батареи (SOC). Эти значения сохраняются в файле Excel для обеспечения возможности автономного анализа.

## Тестирование архитектуры 1S2P

Рассмотрим процесс тестирования зарядного устройства и датчика уровня заряда (MAX17330), а также оценим реальную производительность, которую может обеспечить система параллельной зарядки. Для повышения ее гибкости и управляемости устройство программируется микроконтроллером с использованием протокола I<sup>2</sup>C.

На рис. 1 показана архитектура системы 1S2P и соединения, необходимые для оценки процесса заряда двух параллельных ячеек. Плата Raspberry Pi управляет тремя комплектами EVKIT, включая один MAX20743EVKIT (понижающий преобразователь) и два MAX17330EVKIT (зарядное устройство + датчик заряда). Полученные данные сохраняются в файле Excel.

Доступно ПО MAX17330 EV Kit с графическим интерфейсом (GUI), которое можно загрузить со страницы MAX17330 на вкладке «Tools and Simulations». Программное обеспечение используется для создания файлов инициализации (.INI) для MAX17330 с помощью мастера настройки (выбирается на вкладке Device). Файл INI содержит информацию об инициализации регистра устройства в формате «регистр/значение», с его помощью

микроконтроллер настраивает MAX17330 регистр за регистром.

В спецификации MAX17330EVKIT подробно описаны шаги, необходимые для создания файла инициализации. Конфигурация на рис. 2 применяется в начале параллельной зарядки, после чего включается процесс пошагового заряда (рис. 3). На рис. 4 показан ожидаемый профиль данного процесса, основанный на конфигурации, соответствующей рис. 3.

Преобразователь MAX20734 предназначен для регулировки сигнала, подаваемого на два модуля MAX17330EVK, когда это необходимо. Он изменяет выходное напряжение в соот-

ветствии со значением внутреннего регистра по адресу 0x21. Конвертером можно управлять по шине I<sup>2</sup>C; для этого используется специальный класс в Python.

Как показано на рис. 5, делитель выходного напряжения MAX20743EVKIT модифицирован для диапазона выходного сигнала 3–4,6 В (с использованием резисторов R<sub>6</sub> = 4К7 и R<sub>9</sub> = 1К3).

На основе таблицы 1 можно построить кривую:

$$\text{Register} = 0 \times 014e + \left( \frac{x - 3}{0,1 \times 11} \right)$$

где x — напряжение, которое мы хотим подать на выход. Такой подход дает небольшую погрешность, однако это хороший способ определить желаемое значение регистра по величине сигнала.

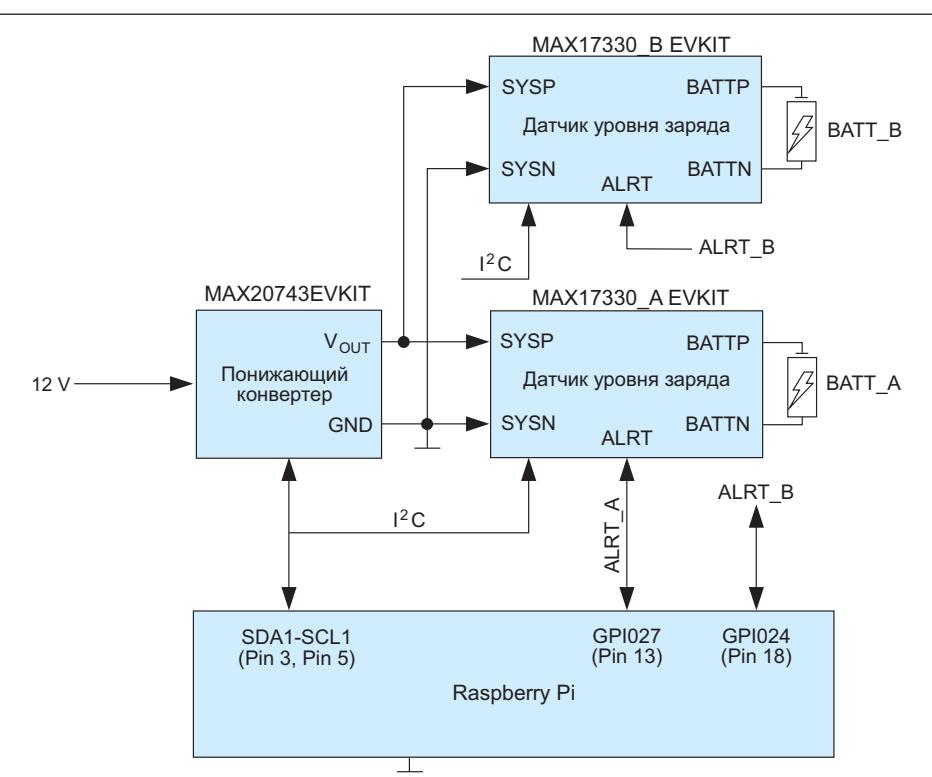
## Включение и инициализация

При первом подключении MAX17330 к аккумулятору значения регистра по умолчанию переводят микросхему в спящий режим. Для вывода устройства из этого состояния предусмотрена кнопка PKWK: она временно блокирует защиту MOSFET и, таким образом, активирует оба MAX17330EVKIT. Затем плата Raspberry Pi должна взаимодействовать со всеми тремя узлами по шине I<sup>2</sup>C. Следует очень аккуратно инициализировать аппаратное оборудование I<sup>2</sup>C, чтобы избежать конфликтов адресов.

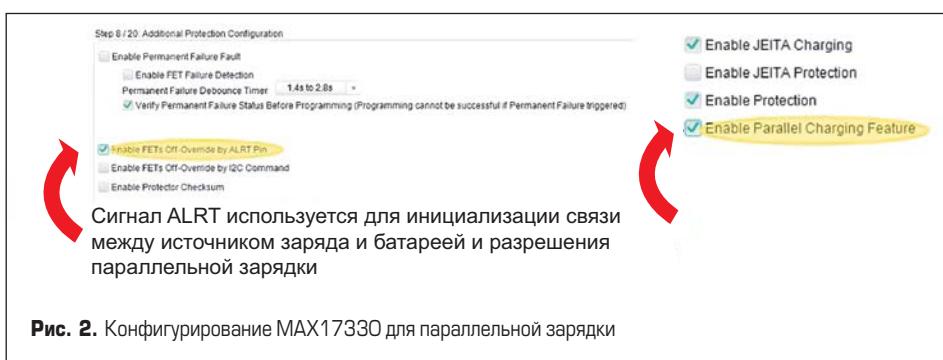
По умолчанию два MAX17330EVKIT используют один и тот же адрес I<sup>2</sup>C, соответствующие данные регистров указаны в таблице 2. Первым шагом является изменение адреса одного из двух датчиков заряда. MAX17330 имеет как энергозависимые, так и энергонезависимые (NV) регистры, причем вторые обозначаются префиксом «n». Это приводит к формированию пары адресов узлов: 6Ch (энергозависимые регистры) и 16h (регистры NV).

**Таблица 1.** Выходное напряжение MAX20743, формируемое по значению регистра 0x21

0x21 Значение регистра	Напряжение, В
0x014E	3
0x0150	3,05
0x0158	3,1
0x015C	3,15
0x0162	3,2
0x0166	3,25
0x016E	3,3
0x0172	3,35
0x0178	3,4
0x017C	3,45
0x0182	3,5
0x0188	3,55
0x018E	3,6
0x0192	3,65
0x019E	3,7
0x01A4	3,75
0x01A9	3,8
0x01AE	3,85
0x01B4	3,9
0x01BA	3,95
0x01BF	4
0x01C4	4,05
0x01CB	4,1
0x01D1	4,15
0x01D6	4,2
0x01DC	4,25
0x01E2	4,3
0x01E8	4,35
0x01ED	4,4
0x01F3	4,45
0x01F8	4,5
0x01FE	4,55
0x0204	4,6



**Рис. 1.** Архитектура оценки системы зарядки 1S2P с использованием Raspberry Pi



**Рис. 2.** Конфигурирование MAX17330 для параллельной зарядки



**Рис. 3.** Разрешение пошагового заряда

Таблица 2. Регистры MAX17330

Регистр	Блок	Описание	Двухпроводной адрес узла	Двухпроводной протокол	Двухпроводной внешний адрес
00h					
01h – 04h	Lock 2	блок данных модели датчика M5 EZ	6 каналов	PC	00h – 4Fh
05h – 0Ah		Резервные			
0Bh	Lock 2	блок данных модели датчика M5 EZ (продолжение)	6 каналов	PC	B0h – BFh
0Ch	SHA	Память SHA	6 каналов	PC	C0h – CFh
0Dh	Lock 2	блок данных модели датчика M5 EZ (продолжение)	6 каналов	PC	D0h – DFh
0Eh – 0Fh		Резервные			
10h – 17h		Блок данных SBS	16 каналов	SBS	00h – 7Fh
18h – 19h	Lock 3	блок NM модели датчика M5 EZ			
1Ah – 1Bh	Lock 1	блок энергонезависимой памяти для регистрации срока службы и настройки	16 каналов	PC	80h – EFh
1Ch	Lock 4	блок энергонезависимой памяти			

Таблица 3. Формат регистра nPackCfg (185h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	S_Hib	THCfg	THType	000	0	ParEn	PCSid			0001					

Таблица 4. Формат регистра I2CCmd (128h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
				0						GoToSID		0			IncSID

Таблица 5. Установки I2C ALRT

GoToSID	Alert High				Alert Low			
	Первичный/Вторичный адрес				Первичный/Вторичный адрес			
0b00	ECh/96h				6Ch/16h			
0b01	64h/1Eh				ECh/96h			
0b10	E4h/9Eh				64h/1Eh			
0b11	6Ch/16h				E4h/9Eh			

Таблица 6. Формат регистра nProtCfg (1D7h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
ChgWDTEn	nChgAutoCtrl	FullEn	SCTest		CmOvrdEn	ChgtestEn	PrequalEn
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Reserved	PFEEn	DeepShpEn	OvrdEn	UVRdy	FetPFEEn	BlockDisCEn	DeepShp2En

Существует два способа изменить адреса устройств на MAX17330:

- Установка регистра nPackCfg NV с использованием поля I2CSid. Это изменение можно задать с помощью мастера настройки (табл. 3).
- Регистр I2CCmd позволяет динамически изменять состояние шины I2C (табл. 4).

Для упрощения задачи реализуется второй способ изменения адреса, при этом один и тот же INI-файл можно было использовать для инициализации обоих устройств. Генерация установок, общих для двух устройств, упрощает настройку и устраняет вероятность ошибки пользователя, когда адрес необходимо вводить вручную.

Поскольку два MAX17330 используют одну и ту же шину I<sup>2</sup>C, данная процедура требует, чтобы сигнал ALRT одного устройства имел низкий уровень, а второго — высокий. В таблице 4 из спецификации MAX17330 показано, как регистр I2CCmd может динамически изменять адреса устройства на основе pin-кода ALERT GPIO. В этом случае поля GoToSID и InCSID используются для изменения адреса I<sup>2</sup>C:

Set ALRT\_A низкий уровень

Set ALRT\_B высокий уровень

Write I2CCmd = 0x 0001

→ MAX17330\_A адрес остается 6Ch/16h

→ MAX17330\_B адрес меняется ECh/96h

После того как каждое устройство получит свой собственный уникальный адрес, можно управлять всей системой. Далее показан сценарий работы микроконтроллера для завершения настройки I<sup>2</sup>C, являющийся частью инициализации системы.

Load.INI file

Assert ALRT\_A и ALRT\_B — задание открытия пути между SYSP и BATTP

Read VBATT\_A и VBATT\_B

VMAX = max (VBATT\_A, VBATT\_B)

Set VOUT = VMAX + 50 mV

Release ALRT\_A и ALRT\_B

Set nProtCfg.OvrdEn = 0 для использования ALRT в качестве выхода (табл. 6)

4,20  
Полное  
напряжение  
4,16 V STEPVOLT1  
4,12 V STEPVOLT0

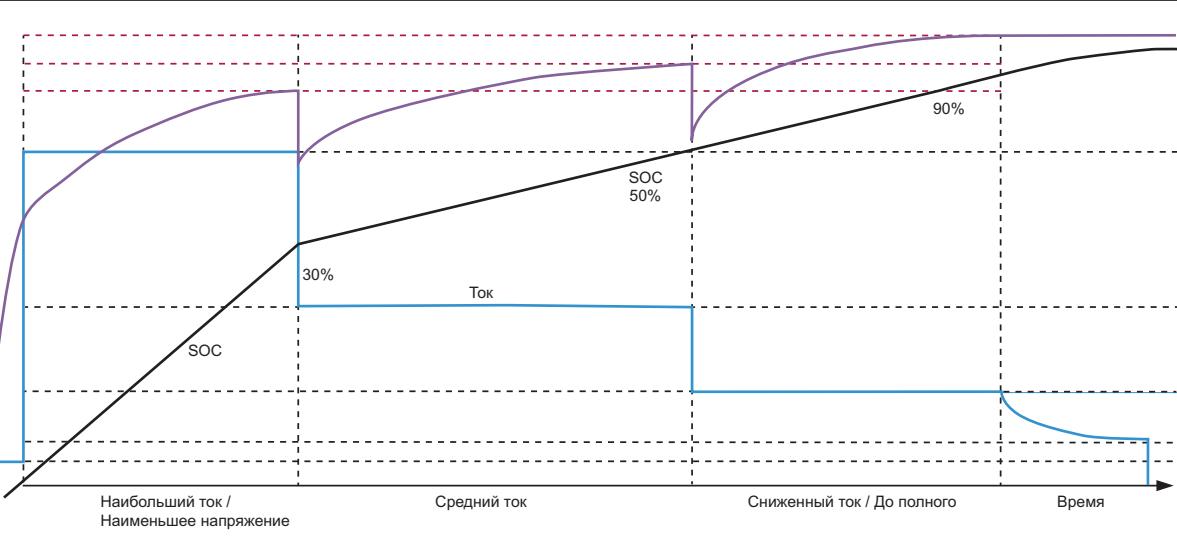
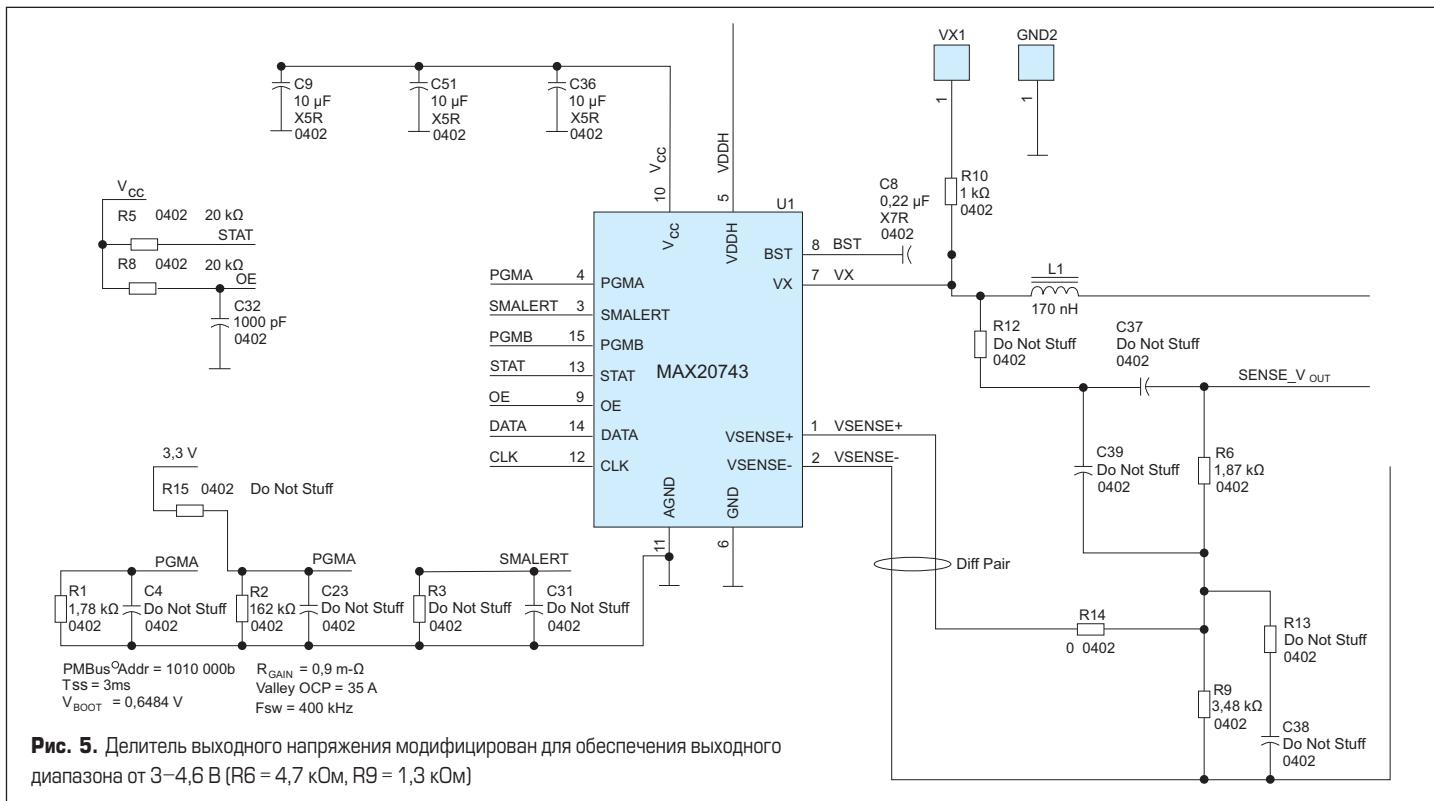


Рис. 4. Ожидаемый профиль ступенчатой зарядки, основанный на конфигурации, показанной на рис. 3



Для вступления изменений в силу некоторые регистры в энергонезависимом пространстве требуют перезапуска встроенного ПО, для чего требуется выполнить следующий шаг:

*Assert Config2.POR\_CMD — перезапуск ПО (табл. 7)*

Далее следует включить прерывания от зарядных устройств:

*Set (Config.Aen and Config.Caen) = 1 (табл. 8)*

Теперь устройство инициализировано.

### Протоколирование данных и прерываний

Для работы системы необходимо считывать регистры для записи данных и проверять, было ли генерировано прерывание в строках ALERT GPIO. С этой целью используется следующий скрипт:

```
Set 500 ms Timer
VMIN = min (VBATT_A, VBATT_B)
Vsys_min = nVEmpty[15:7]
```

Таблица 7. Формат регистра Config2 (0A8h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
POR_CMD	0	AtRtEn		0	0	0	0
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
dSOCen	TalrtEn	0	1	DRCfg	CPMode	BlockDis	

Таблица 8. Формат регистра Config (00Bh)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
0	SS	TS	VS	0	PBEn	DisBlockRead	ChgAutoCtrl
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SHIP	COMMSH	FastDCen	ETHRM	FTHRM	Aen	Caen	Paen

Таблица 9. Формат регистра FProtStart (0DAh)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
X							

Таблица 10. Формат регистра Status (000h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
PA	Smx	Tmx	Vmx	CA	Smn	Tmn	Vmn
dSOCi				Imx	AllowChgB	X	Bst
lmn						POR	X

Таблица 11. Формат регистра Config2 (0A8h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
POR_CMD	0	AlrtEn		0	0	0	0
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
dSOCen	TalrtEn	0	1	DRCfg	CPMode	BlockDis	

*CrossCharge = False (для одного микроконтроллера).*

*If (VMIN < Vsys\_min) → CrossCharge = True*

Оценивает, превышает ли минимальное напряжение батареи минимальное рабочее напряжение системы.

*If FProtStat.IsDis = 0*

Обнаружение сигнала зарядки

*Clear Status.AllowChgB*

Указывает наличие зарядного устройства для всех аккумуляторов

*If (VBATT > VMIN + 400 mV and !Cross Charge)*

Определяет, какую батарею следует заблокировать, чтобы избежать перекрестной зарядки (cross-charging)

*Config2.BlockDis = 1*

или

*Config2.BlockDis = 0*

Разрешает разряд, если уровень разряженной батареи намного ниже, чем уровень заряженной батареи (табл. 9, 10 и 11).

Когда сигнал ALRT будет получен от MAX17330, хост выполнит следующее:

Считывание данных регистра состояния. Если задано состояние CA:

*Чтение регистра ChgStat*

*If ChgStat.Dropout = 1 → увеличение VOUT  
If (ChgStat.CP or ChgStat.CT) = 1 → уменьшение VOUT*

Очистка статуса СА (табл. 12 и 13).

На рис. 6 показан график параллельной зарядки, полученный на основе записанных данных (файл Excel). Обратите внимание на то, как он соответствует профилю пошаговой зарядки.

Опционально, при переходе устройства из фазы постоянного тока (CC) в фазу постоянного напряжения (CV), сигнал, генерируемый понижающим преобразователем, может быть уменьшен следующим образом:

If VBATT = Напряжение заряда

Read ChgStat Register

If ChgStat.CV = → снижение VOUT

do VPCK = Напряжение заряда + 25 мВ

Таким образом, перечислены все этапы, необходимые для реализации конфигурации заряда 1S2P. В разделе MAX17330-usercode.zip приведен код Python для настройки понижающего преобразователя (MAX20743), а также зарядного устройства и датчика уровня заряда (MAX17330). Он также включает в себя журнал данных Excel для записи важных параметров зарядки и оценки поэтапного профиля зарядки. По сигналам ошибки, генерируемым MAX17330, микроконтроллер поддерживает линейное зарядное устройство MAX17330 на уровне, близком к отключению. Благодаря этому минимизируется рассеиваемая мощность и, следовательно, обеспечивается высокий зарядный ток.

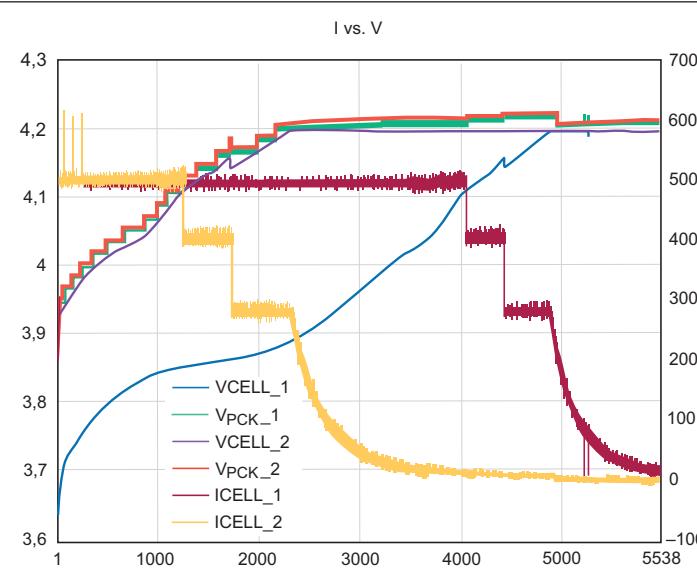
Аккумуляторный блок, использующий MAX17330, записывает и сохраняет параметры батареи, необходимые главному микроконтроллеру для эффективной быстрой зарядки. Это позволяет производителям оборудования заменить стандартное зарядное интегральное устройство более простым и дешевым понижающим преобразователем без ущерба для производительности или надежности.

**Таблица 12.** Формат регистра Status (000h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
PA	Smn	Tmx	Vmx	CA	Smn	Tmn	Vmn	dSOCi	Imx	AllowChgB	X	Bst	Imn	POR	X

**Таблица 13.** Формат регистра Status (000h)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Drop-out	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	CP	CT	CC	CV



**Рис. 6.** Кривые параллельного заряда.

## Заключение

Время заряда батареи является одним из наиболее важных факторов, влияющих на пользовательские характеристики системы. Благодаря применению интегрального понижающего преобразователя, такого как MAX17330, мож-

но эффективно управлять высоким током для сокращения времени заряда. Возможность сильноточной параллельной зарядки с помощью двух MAX17330 позволяет оперативно обслуживать несколько аккумуляторов, сохранив высокие показатели надежности.

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

## Источники питания со сверхнизким профилем от MEAN WELL



Компания MEAN WELL анонсирует новую серию источников питания со сверхнизким профилем – LOP-400/500/600. Новая серия LOP-400/500/600 с размерами 5×3" и номинальной мощностью 400, 500 и 600 Вт стала логическим продолжением серии LOP-200/300 с размерами 4×2". В новой серии представлены надежные, качественные, эффективные и безопасные встроенные источники питания PCB-типа с отличными характеристиками по электромагнитной совместимости. Они предназначены для работы в системах класса I или II и обеспечивают высокую производительность и экономичное

решение для различных электронных приборов и устройств.

По сравнению с сериями EPP/RPS-300/400/500, основными отличиями LOP-400/500/600-серии являются низкопрофильный дизайн (высота 27,5~33,5 мм), более широкий диапазон напряжений 12~54 В, увеличение мощности до 600 Вт при занимаемой площади 5×3". Источники питания обеспечивают 150%-ную загрузку за 3 с, имеют расширенный диапазон рабочей температуры -40...+80 °C, соответствуют регламентам OVCIII, 2×MOPP и BF для применения в медицинских приборах. Устройства серии LOP-400/500/600 отвечают требованиям нескольких стандартов безопасности в различных областях, включая 62 368-1-/60 601-1/61 558-1/60 335-1.

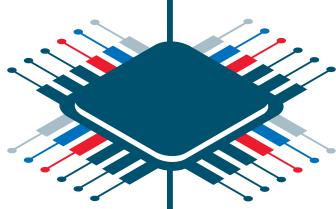
LOP-400/500/600 имеет широкий спектр применений, подходящих для использования в ИТ/телеkom-оборудовании, медицинском и промышленном оборудовании, в системах безопасности, домашней автоматизации и других индустриальных решениях.

Серия LOP-400/500/600 имеет следующие ключевые преимущества:

- универсальный вход: 80~264 В переменного тока;
- встроенный ККМ;
- режим ожидания без нагрузки <0,5 Вт;
- встроенный дополнительный канал источника питания (AUX): 12 В /0,5 А постоянного тока;
- международные сертификаты в различных областях применений: ITE, медицинские (2×MOPP типа BF), промышленные, бытовые;
- обеспечение пиковой мощности 150% в течение 3 с;
- подходит для систем класса I или класса II;
- диапазон рабочей температуры: -40...+80 °C;
- максимальный КПД: 95%;
- функции защиты: короткое замыкание, перегрузка, перенапряжение, перегрев;
- чрезвычайно низкий ток утечки: < 500 мА на «землю», < 70 мА на контакт;
- может работать на высоте до 5000 м;
- гарантия: 3 года.

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

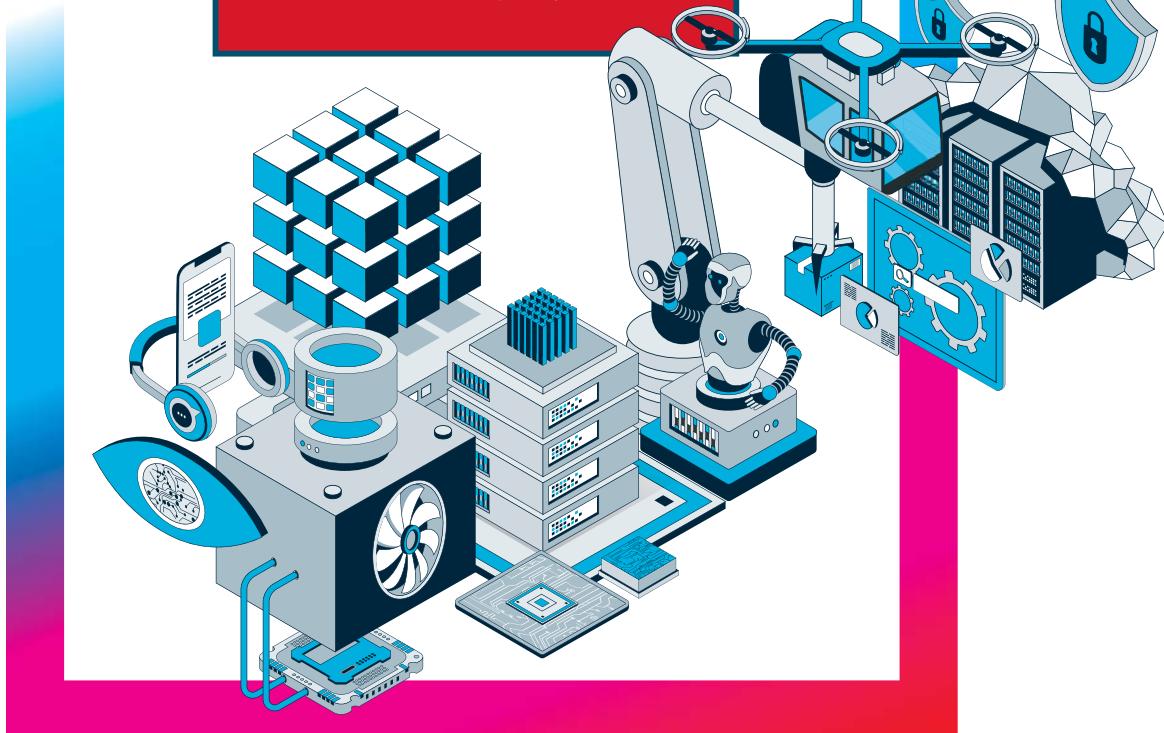
[rus-elektronika.ru](http://rus-elektronika.ru)



# ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ

Международная  
ВЫСТАВКА-ФОРУМ

26|27|28  
НОЯБРЯ  
2024      МОСКВА  
Крокус Экспо



**Забронируйте стенд:**

+7 (812) 401 69 55, [electron@mvk.ru](mailto:electron@mvk.ru)



Организатор:



Официальная поддержка:



Партнеры:



# RUichi

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОДУКЦИЯ



- БОЛЕЕ 10 000 НАИМЕНОВАНИЙ
- СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ВСЕХ ИЗДЕЛИЙ И ПОД ЗАКАЗ
- ВСЯ ПРОДУКЦИЯ СЕРТИФИЦИРОВАНА ПО РОССИЙСКИМ СТАНДАРТАМ КАЧЕСТВА
- ГАРАНТИЙНЫЙ СРОК НА ПРОДУКЦИЮ - 12 МЕСЯЦЕВ

+7 (495) 364-31-24  
 sales@ruichi.ru  
 www.ruichi.ru

