

ТЕМАТИЧЕСКОЕ
ПРИЛОЖЕНИЕ
К ЖУРНАЛУ
КОМПОНЕНТЫ
И ТЕХНОЛОГИИ

12+

WWW.POWER-E.RU

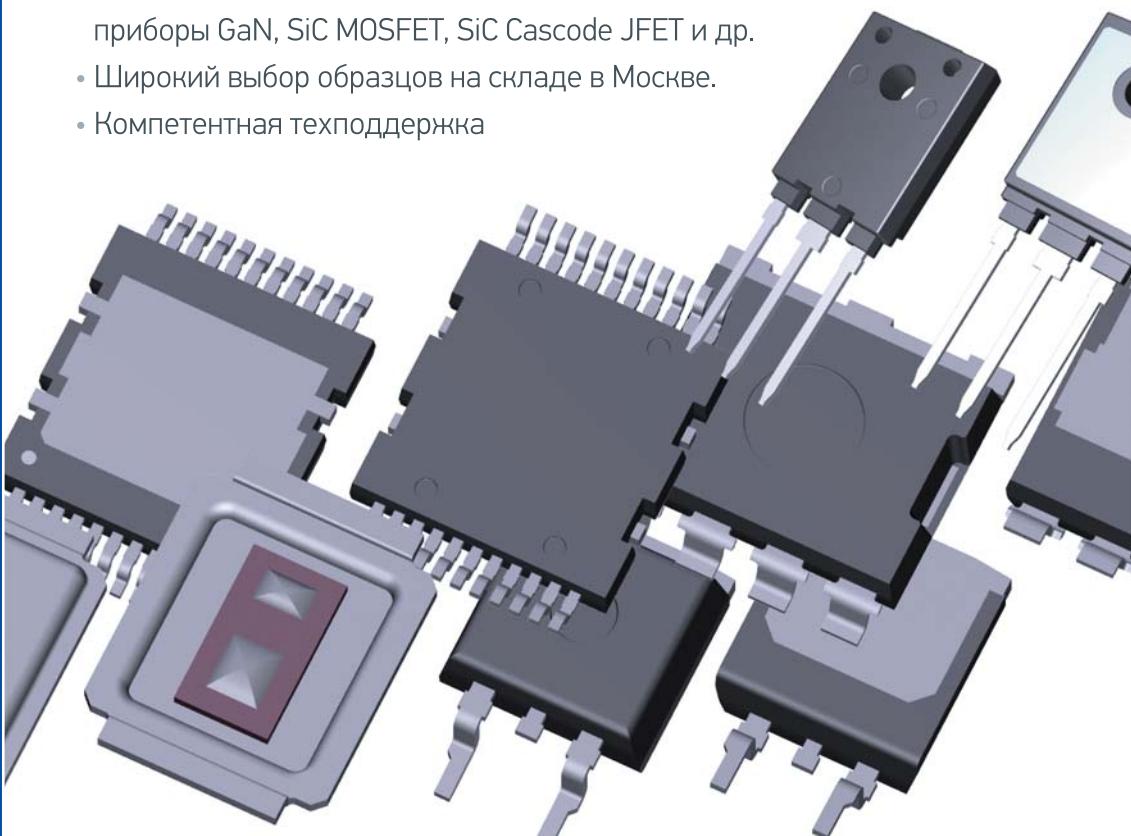
№ 1'2025
МАРТ

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ISSN 2079-9322

Дискретные компоненты для силовой электроники

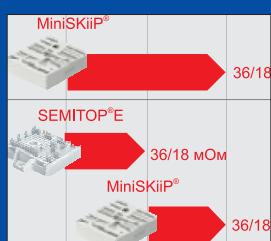
- Широкий выбор доступных дискретных компонентов для силовой электроники,
- Различные IGBT, MOSFET, в том числе инновационные приборы GaN, SiC MOSFET, SiC Cascode JFET и др.
- Широкий выбор образцов на складе в Москве.
- Компетентная техподдержка



symmetron.ru



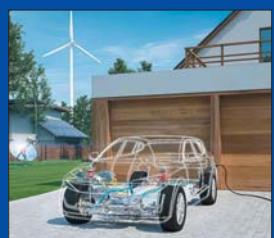
Цифровые датчики
напряжения —
очередной шаг развития



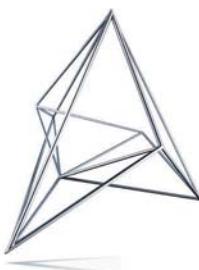
SiC-модули
в моторных приводах:
картина в целом



Применение источников
питания в бортовой системе
летательных аппаратов:
архитектура, требования
и особенности



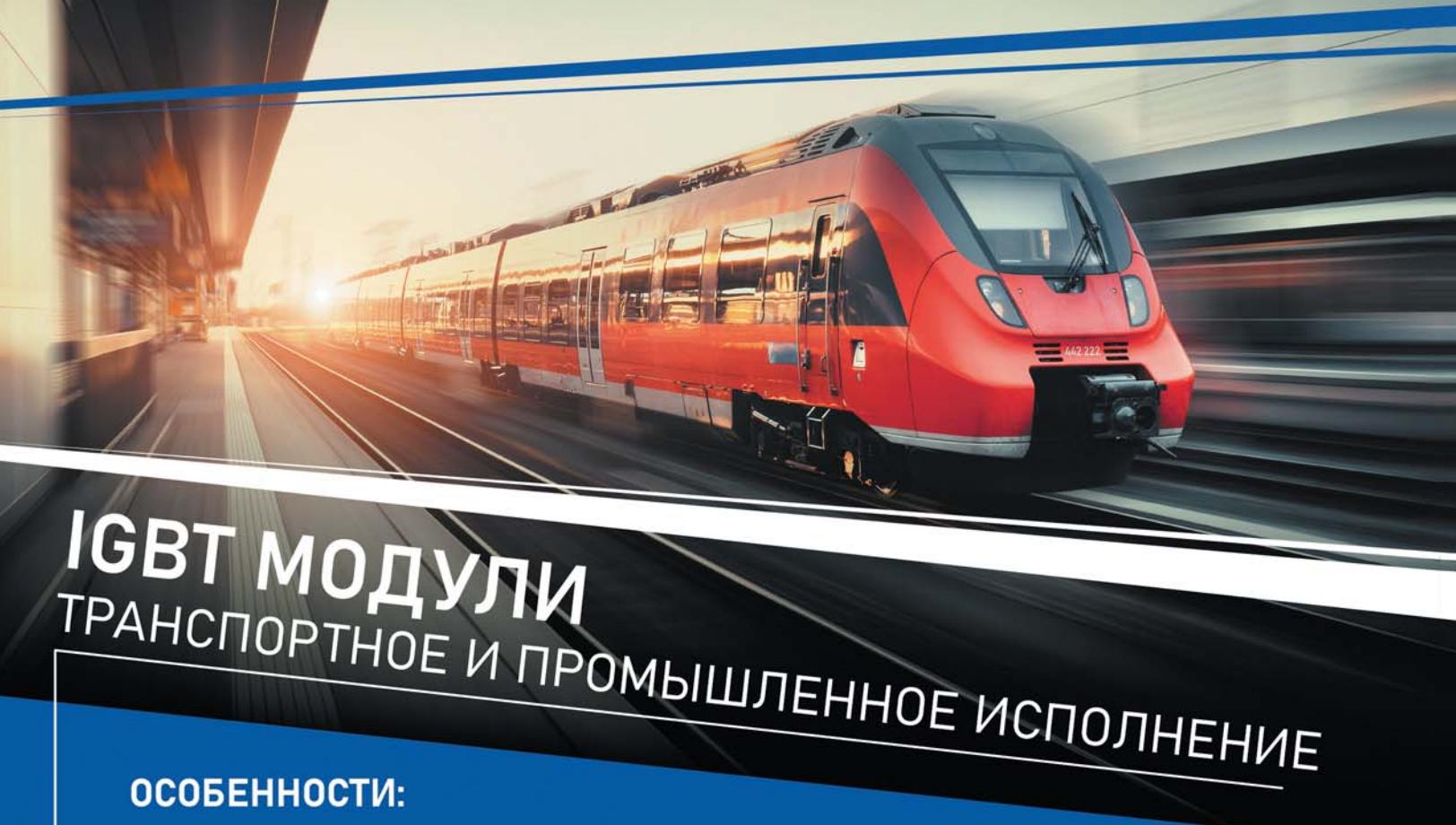
Применение драйверов
с динамическим
управлением затвором
повышает эффективность
привода электромобиля



Symmetron

Указанные в статье на стр. 12 приборы доступны к приобретению
в качестве образцов со склада в Москве: power@symmetron.ru





IGBT МОДУЛИ

ТРАНСПОРТНОЕ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

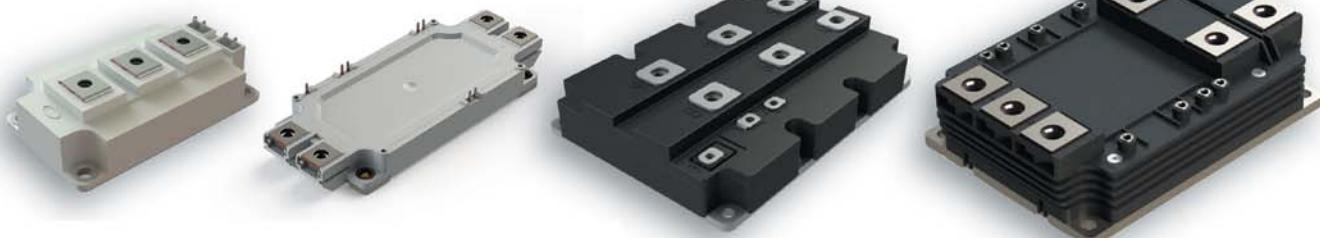
ОСОБЕННОСТИ:

- ▷ Российское производство
- ▷ Отечественный аналог продукции зарубежных производителей
- ▷ Подбор полупроводниковых приборов для режимов эксплуатации клиента
- ▷ Возможность разработки по индивидуальным требованиям потребителя
- ▷ Наличие страхового запаса продукции под клиента
- ▷ Поставка с драйвером управления*

*по запросу

ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- ▷ НАПРЯЖЕНИЕ: 1200В, 1700В, 3300В
- НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК: от 450А до 3600А



 **EXPO ELECTRONICA**



15-17 апреля 2025 Москва МВЦ "Крокус Экспо"
Запись на встречу с представителем компании

 **ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС**



+7 (4862) 44-04-56
www.proton-electrotex.com

реклама



BEIJING ELECTRONIC SOLUTIONS TECHNOLOGY

ЭКБ для ответственного применения
Гарантиированная поставка в течении всего срока жизни проекта
Качество продукции подтверждено широким применением в
производстве высоконадёжной электроники в КНР
Уровни качества B, N, G, YB, CAST H

ОТКРЫТИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА В РОССИИ

DC/DC-

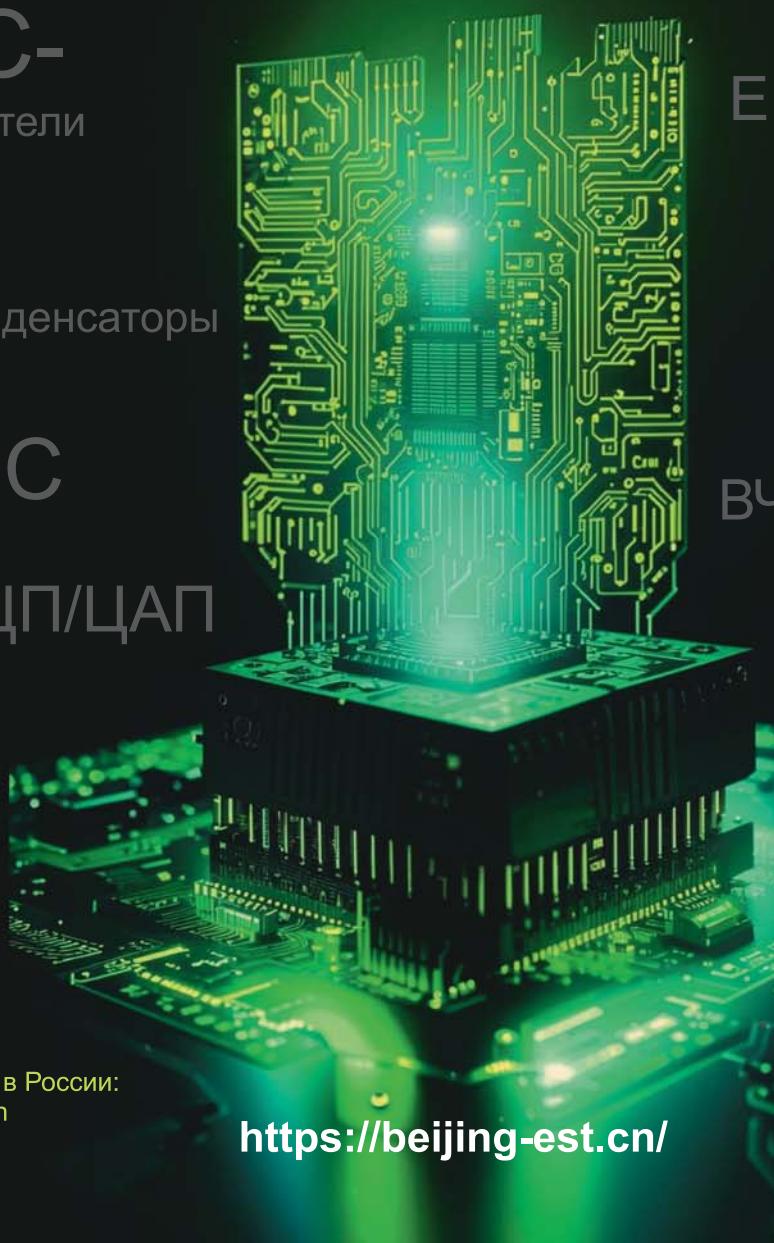
Преобразователи

Суперконденсаторы

ПЛИС

АЦП/ЦАП

Микросхемы
управления
питанием



Радиационно-стойкие дискретные компоненты

EMI-Фильтры

Память

ВЧ-компоненты

Кварцевые
резонаторы
генераторы

EXPO
ELECTRONICA

Посетите наш стенд B4037
Павильон 3, зал 14
В рамках выставки пройдет
серия семинаров на стенде
Подробности на сайте

sales@beijing-est.cn

Представительство в России:

russia@beijing-est.cn

+7-977-366-72-43

<https://beijing-est.cn/>

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: (37-5717) 297-3350, 297-3362

Подписной индекс

Агентство «Урал-Пресс» 88471

Дата выхода в свет 21.03.25
Тираж 3000 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 Белый ветер
115054, Москва, ул. Щипок, д. 28,
тел.(495) 651-84-56

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) доступны полные
тексты статей. Статьи из номеров журнала
текущего года предоставляются на платной основе.

В номере:

Силовая элементная база

Андрей Селеменев

Четвертое поколение силовых
автотранзисторных диодных мостов
АО «Оptron-Ставрополь» 4

Ричард Блэйки

Определение номинального тока силового индуктора 6

Йохен Хюскенс

Высоковольтные GaN:
быстрая коммутация и эффективность 9

Артём Федоровский

SiC JFET от компании Onsemi 12

Мартин Шульц

Новые возможности силовых модулей
с «прямым» жидкостным охлаждением 16

**Николай Гребенщиков, Григорий Портной,
Константин Разумовский, Николай Фотов**

Цифровые датчики напряжения —
очередной шаг развития 19

Приводы

Пол Дрексхейдж, Карстен Шнайдер

SiC-модули в моторных приводах: картина в целом 22

Источники питания

Пол Дрексхейдж

ANPC-конвертор в эффективных
системах хранения энергии 25

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

**Стеван Веттенгель, Андреас Хоффманн, Йонас Кинаст,
Ларс Линденмюллер, Штеффен Бернет**

Модульный источник импульсного тока 100 кА
с программируемой формой импульсов 28

Норик Петросян, Паргев Манукян

Повышающий преобразователь постоянного тока
в непрерывном режиме проводимости тока 31

Тигран Гайказъян

Применение источников питания в бортовой системе
летательных аппаратов: архитектура, требования и особенности 34

Транспорт

Юрий Таланин

Магнитный электродвигатель-генератор в электромобиле 38

Вольфганг Рамбоу

Упрощенная методика расчета конденсаторов DC-шины
привода электрического транспортного средства 40

Трэвис Александр

Применение драйверов с динамическим управлением затвором
повышает эффективность привода электромобиля 46

ЭМС

Том Тиллман

Применение фильтров EMI в промышленном оборудовании
и медицинской технике 50

Измерительная аппаратура

Дмитрий Серков

Высокоэффективная настольная
электронная нагрузка серии АКИП-1392 54

Четвертое поколение силовых автотракторных диодных мостов

АО «Оптрон-Ставрополь»

Силовые автотракторные диодные мосты — это специфичная и сложная группа полупроводниковых выпрямителей, применяющихся в автотракторных генераторах переменного тока и предназначенных для преобразования переменного тока в постоянный и питания различных электронных систем автомобилей и тракторов. Прошлые поколения автотракторных диодных мостов имеют схожие конструкции с запрессованными корпусными ограничительными диодами типа ОД 104-40; BN60M; Krauf AZB1034UT в алюминиевые основания, соединенные между собой изоляционными пластиковыми втулками. Конструкции автотракторных диодных мостов 1-, 2- и 3-го поколений имеют ряд недостатков: малый максимально допустимый средний прямой ток, высокое импульсное прямое напряжение диодов, сложности с операциями запрессовки диодов в алюминиевые пластины (основания), а также дальнейшее разрушение конструкции диодного моста из-за выпадения диодов из отверстий для запрессовки, что вызвано постоянными воздействиями вибрационных нагрузок и температурных колебаний.

Андрей Селеменев

a.selemelev@optron-stavropol.ru

Отдел исследований и разработок АО «Оптрон-Ставрополь» разрабатывает серию автотракторных диодных мостов нового поколения напряжением 14–28 В, рассчитанных на токи до 240 А. Были разработаны и собраны первые образцы диодных мостов БВО1-240-2 (рис. 1) для автогенераторов. Произведенные диодные мосты аналогичны по габаритно-присоединительным размерам диодным мостам БВО02-105; БВ03-105; БВ04-

105; БВ05-105 и всем модификациям данных мостов. Это позволяет производить замену таких диодных мостов без каких-либо доработок.

Сборка диодных мостов БВО1-240-2 выполнялась с использованием групповой пайки (29 паяных соединений) в едином технологическом процессе: диод бескорпусной 8 шт., с использованием 16 электродов-рассекателей, на пяти керамических платах (AlN), установленных на одном алюминиевом

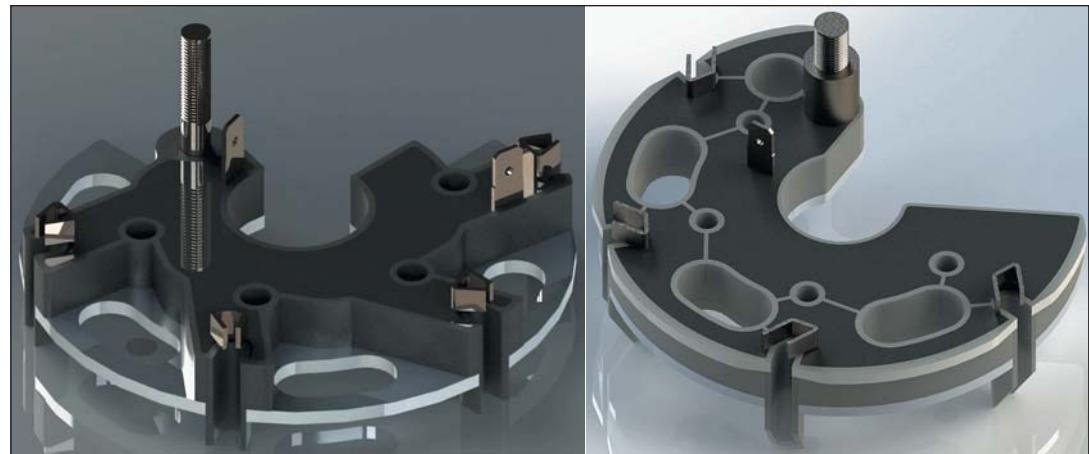


Рис. 1. Рендеры первых рабочих образцов серии, 4-го поколения автотракторных диодных мостов

Таблица. Сравнительные параметры диодов

Наименование параметров	Бескорпусные диоды производства АО «Оптрон-Ставрополь»	ОД 104-40	BN60M	Krauf AZB1034UT
$I_{пр.ср. макс}, A$	60	40	60	50
$I_{пр. и нп.}, A$	400	400	400	400
$I_{обр.}, мА$	0,25	0,25	0,25	0,25
$U_{побр.}, В$	18–24	18–24	18–24	18–24
$U_{обр. и п.п.}, В$	28	27	28	28
$U_{пр.и.}, В$	0,9	1,3	1,35	1,35
Диапазон рабочей температуры, °C	−60...+160	−60...+160	−60...+160	−60...+160

**Рис. 2.** Бескорпусной диод производства АО «Оптрон-Ставрополь»

основании, с использованием металлических шин. Для пайки на алюминий и керамику была применена толстопленочная технология металлизации на места паянных соединений с использованием трафаретов.

Бескорпусной диод состоит из двух пластин электродов-рассекателей разного диаметра, между которыми находится кремниевый диффузионный, диодный кристалл (рис. 2). Все элементы собраны и спаяны с помощью серебросодержащего припоя. В ходе сборки бескорпусных диодов были использованы кремниевые ограничительные диодные, диффузионные кристаллы собственной разработки и производства. Устройства имеют лучшие электрические параметры по сравнению с диодами типа ОД 104-40; BN60M; Krauf AZB1034UT (таблица).

Разработанные бескорпусные диоды позволяют упростить проектирование и унифицировать дальнейшее производство разных типов автотракторных диодных мостов для разных модификаций автотракторных генераторов, выпускающихся в Российской Федерации и странах Таможенного союза.

Герметизация готового изделия делится на этапы:

- посадка пластиковой опалубки корпуса на алюминиевое основание с использованием компаунда VSH-1 (производство ООО «Вирсеми»);
- защита кристаллов и формирование буферного слоя компаундом VSH-1 (производство ООО «Вирсеми»);
- конечная герметизация методом заливки эпоксидным компаундом VSC-150 (производство ООО «Вирсеми»).

Были проведены испытания на работоспособность разработанного диодного моста путем установки на автогенератор (рис. 3), установки генератора и диодного моста на испытательный стенд, имитирующий работу автомобиля. Испытания на работоспособность длились 8 ч, изменений от заявленных характеристик генератора не выявлено.

Уровень локализации разработки и производства 100% отечественный.

Технологии, комплектующие, оборудование и материалы, использующиеся при разработке и производстве силовых полупроводниковых приборов на АО «Оптрон-Ставрополь», являются отечественными и разработаны инженерным составом АО «Оптрон-Ставрополь». Все приборы имеют гарантийный срок эксплуатации от двух лет.

**Рис. 3.** Установка диодного моста БВ01-240-2 на автогенератор

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ

СОБСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО



800, 1200, 1600 V AC



60, 200, 400, 1200, 1700 V DC



1... 250 A



ЗАО «Протон-Импульс»
Разработка |
Испытания |
Серийное производство

+7 (4862) 303-324, доб. 304, 300, 353
energia@proton-impuls.ru

Определение номинального тока силового индуктора

Корректное определение номинального тока силового индуктора позволяет оптимально подобрать компоненты для конкретного применения. Новый онлайн-калькулятор от Würth Elektronik учитывает влияние размеров печатной платы при расчете номинального тока дросселей, используя динамические параметры из технической спецификации.

**Др. Ричард Блэйки
(Richard Blakey)¹**

Перевод: Иван Сергеев

Определение номинального тока индуктивности отличается у разных производителей пассивных компонентов, несмотря на принятие стандарта IEC 62024–2, в котором конкретно описана процедура измерения данного параметра. В результате у инженеров могут возникать неправильные представления о том, что такое номинальный ток и как его использовать. Является ли эта величина абсолютной, сопоставимы ли номинальные значения тока у разных производителей?

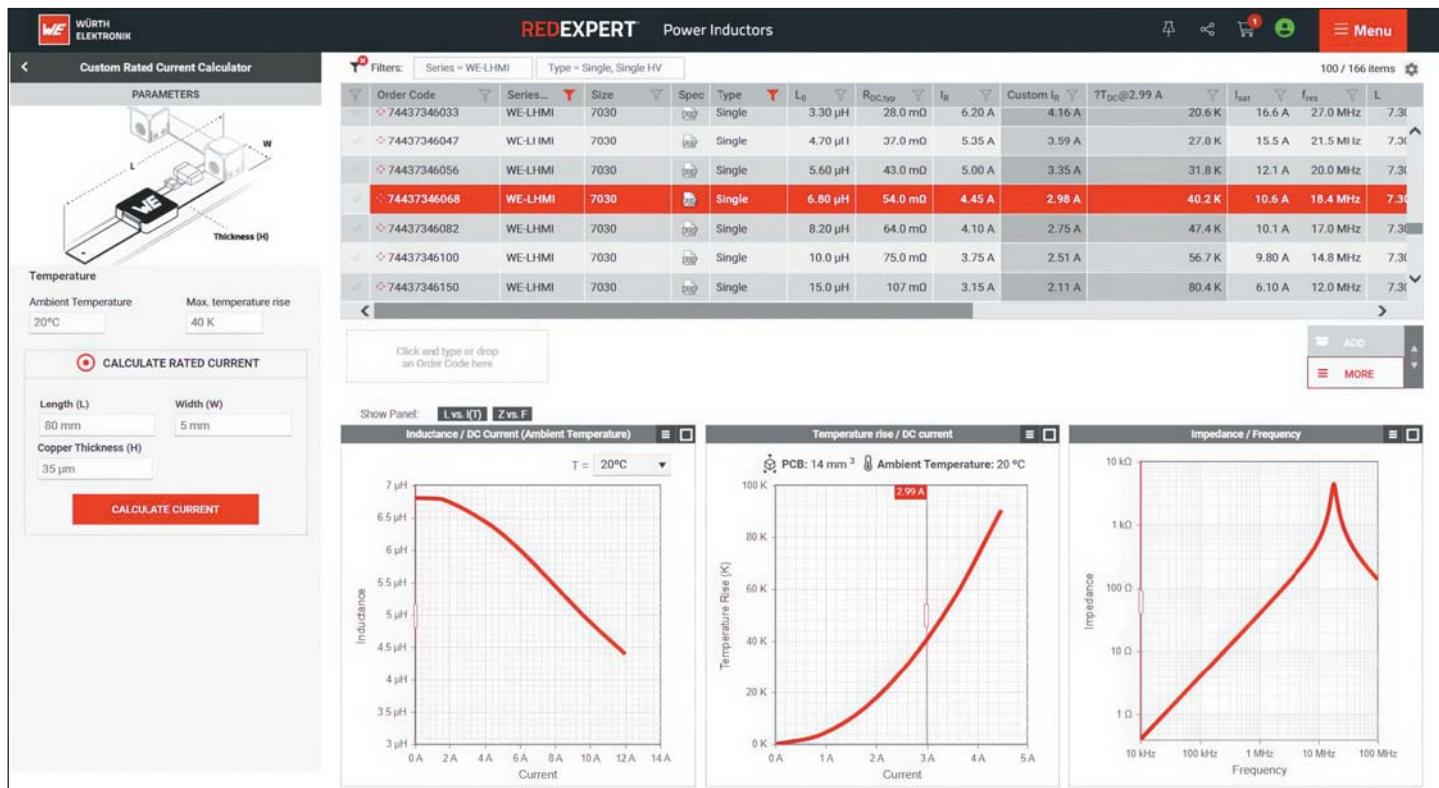
Точных ответов на данные вопросы нет. В итоге компоненты одних производителей на первый взгляд кажутся лучше, чем у других, хотя такое мнение может быть ошибочным. Технические специалисты должны понимать, как производители измеляют и определяют номинальные параметры своих продуктов, и не принимать цифры в спецификациях за абсолютную истину.

С учетом сказанного, компания Würth Elektronik разработала тепловую модель, позволяющую рассчитать номинальный ток силовых дросселей с учетом конкретных размеров печатной платы (PCB). Таким образом, разработчики могут изучать влияние особенностей конструкции PCB на нагрузочные характеристики компонентов.

Влияние размеров PCB на номинальный ток

Описание тепловых режимов силовых индукторов можно найти в руководстве по применению ANP096 — «What do rated current values mean?» («Что означают номинальные величины тока?») [1]. В этом документе объясняется, как размеры печатной платы влияют на повышение температуры дросселя. Подводя итог, можно сказать, что с увеличением ширины и толщины медных трасс (поперечное се-

¹Würth Elektronik



чение PCB) уменьшается тепловое сопротивление и улучшается отвод тепла от индуктора. По мере увеличения площади поверхности печатной платы снижается сопротивление к тепловой конвекции и тепловому излучению, что повышает эффективность отвода тепла.

При таком сценарии (увеличение размеров PCB) печатная плата будет отдавать больше тепла в окружающую среду, что снизит рабочую температуру дросселя. Это также означает, что на индуктивность можно подавать больший ток для достижения той же температуры, что и при использовании PCB меньшего размера. Таким образом, мы можем понять, как габариты печатной платы влияют на указанное в технических спецификациях значение номинального тока. Например, применение тестовых плат больших размеров может исказить нагрузочные характеристики дросселя, и эта информация не указывается в спецификации, что приводит к неправильному толкованию со стороны разработчиков. Сказанное продемонстрировано в документе ANP096 [1].

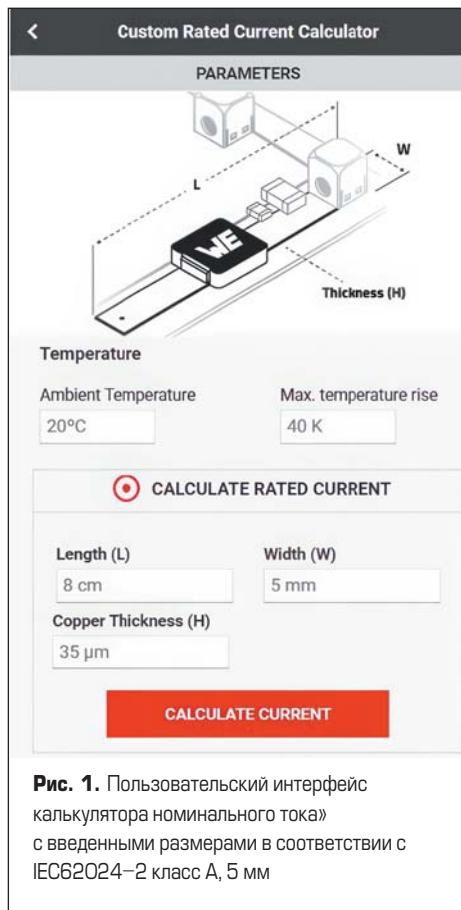


Рис. 1. Пользовательский интерфейс калькулятора номинального тока с введенными размерами в соответствии с IEC62024–2 класс А, 5 мм

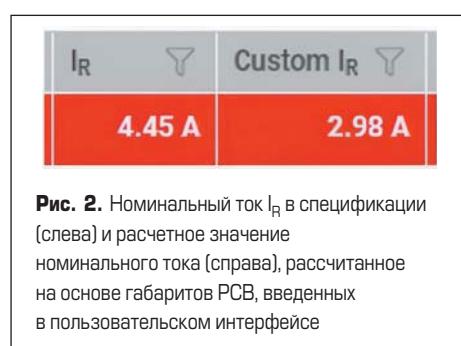


Рис. 2. Номинальный ток I_R в спецификации (слева) и расчетное значение номинального тока (справа), рассчитанное на основе габаритов PCB, введенных в пользовательском интерфейсе

Калькулятор номинального тока

Для определения номинального тока пассивных компонентов, установленных на печатных платах разного размера, компания Würth Elektronik выпустила онлайн-калькулятор тока (Rated Current Calculator), доступный на сайте RedExpert [2].

Такой инструмент позволяет пользователю указывать габариты PCB (рис. 1). После ввода этих данных, в таблицу параметров добавляется пользовательский столбец IR (рис. 2) в дополнение к обновляемой диаграмме повышения температуры, отражающей изменение размеров платы (рис. 3).

В расчетах используется статистическая модель, основанная на измерениях и верификации параметров компонентов, установленных на PCB разного размера. Таким образом, пользователь может видеть расчетное значение номинального тока силовых индукторов на разных платах. Это полезно для сравнения различных типов дросселей или для оценки номинального тока компонента, устанавливаемого на печатную плату методом пайки.

Отметим, что при использовании калькулятора для оценки номинального тока ин-

дуктора в конкретном приложении следует помнить, что другие компоненты также участвуют в распределении тепла по печатной плате. Интегральные схемы, конденсаторы, резисторы могут повышать температуру PCB, а применение радиаторов в свою очередь снижает ее нагрев.

Рассмотрим индуктор WE-LHMI, номинальный ток которого составляет 4,45 А (рис. 4). Это значение измерено на PCB по стандарту IEC 62024–2 IClass C. На графике показано повышение температуры при протекании постоянного тока через дроссель при установке на печатную плату IClass A 5 мм, IClass C, и IClass D. Кроме того, на рисунке отображены данные, полученные с помощью калькулятора номинального тока (пунктирные линии) из пользовательского интерфейса Red Expert, доступного онлайн. Как видно на рисунке, рассчитанные значения сопоставимы с данными, полученными в результате измерений.

На рис. 4 демонстрируется сравнение вычислений, сделанных калькулятором с относительной точностью, с измеренными величинами. Показано, что номинальный ток компонента существенно зависит от размеров печатной

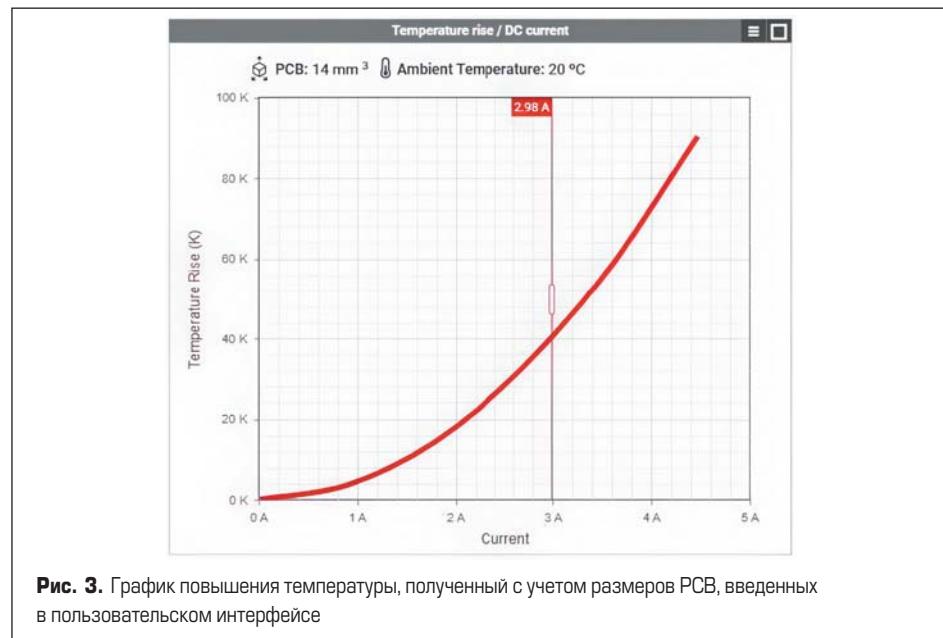


Рис. 3. График повышения температуры, полученный с учетом размеров PCB, введенных в пользовательском интерфейсе

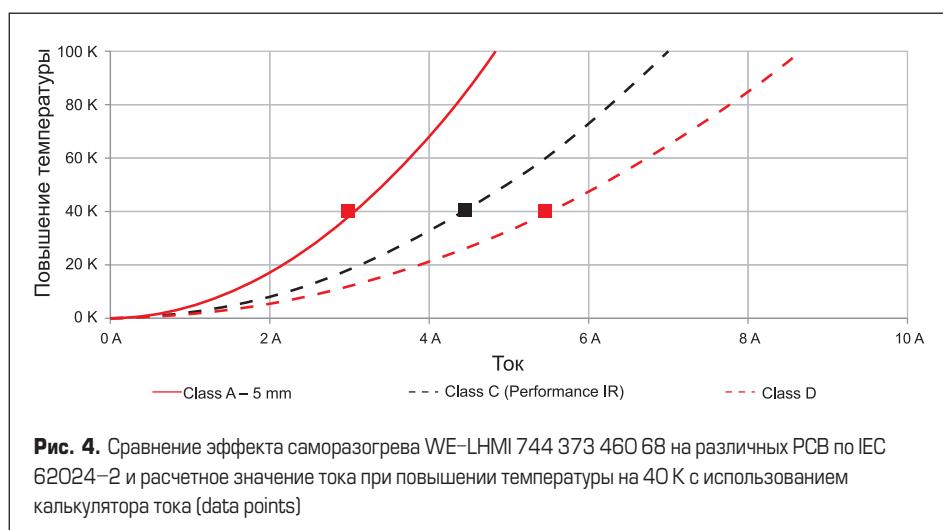


Рис. 4. Сравнение эффекта саморазогрева WE-LHMI 744 373 460 68 на различных PCB по IEC 62024–2 и расчетное значение тока при повышении температуры на 40 К с использованием калькулятора тока (data points)

платы, поскольку дроссель может работать даже при более высоких нагрузках, чем указано в технической спецификации. Кроме того, видно, что значение IRP можно использовать для сравнения и выбора индуктора перед созданием прототипа. Следует помнить, что это базовые параметры, учитывающие только DC-ток элемента без учета влияния других тепловыделяющих элементов на печатной плате. В реальных условиях также необходимо рассматривать потери на переменном токе и тепловое воздействие окружающих компонентов. Фактическое повышение температуры, наблюдаемое в конкретных приложениях, будет заметно варьироваться в зависимости от режимов работы.

Расчет номинального тока на основе размеров PCB

Значения номинального тока, указанные в технических спецификациях, служат ориентиром при выборе силовых индукторов. Однако повышение температуры дросселей зависит от размеров печатной платы, на которой они тестируются. Эти данные не всегда сопоставимы у разных производителей, что создает ложное представление о реальном значении номинального тока.

Сравнение аналогичных компонентов разных производителей на одних и тех же печатных платах показывает, что их тепловые характеристики практически аналогичны. С этой целью компанией Würth Elektronik разработан онлайн-калькулятор «Rated Current Calculator», позволяющий определить номинальный ток силовых дросселей на PCB любого размера по выбору пользователя. Это дает возможность оценить параметры компонентов в конкретных условиях применения или сравнить дроссели разных производителей.

Литература

- Blakey R., Gerfer A. What do rated current values mean? Application Note ANP096 from Würth Elektronik. www.we-online.com/ANP096
- RedExpert Rated Current Calculator. www.redexpert.we-online.com/redexpert/#/module/4/dr/ANP138
- Blakey R. Custom Rated Current Calculator. Application Note ANP138 from Würth Elektronik. www.we-online.com/ANP138

Высокомощные IGBT-модули в корпусе PrimePack от AMG Power



Компания AMG Power анонсировала выпуск IGBT-модулей с напряжением 1200 В и током 900 А, а также 1700 В и током 650 А, под заказными номерами AMG900G1200PP2 и AMG650G1700PP2. Эти модули выпускаются в корпусе PrimePack (торговая марка компании Infineon), что обеспечивает высокую плотность мощности, устой-

чивость к короткому замыканию и улучшенные тепловые характеристики.

Новые устройства AMG Power конкурируют с продуктами таких компаний, как Infineon, CRRC и Fuji Electric. Например, модуль AMG900G1200PP2 может заменить Infineon FF900R12IE4, который также рассчитан на 1200 В и 900 А, но отличается более высокой стоимостью. Модуль AMG650G1700PP2 может стать альтернативой Fuji Electric 2MBI650VXA-170E-50, который имеет схожие характеристики по напряжению и току, однако уступает в тепловых характеристиках.

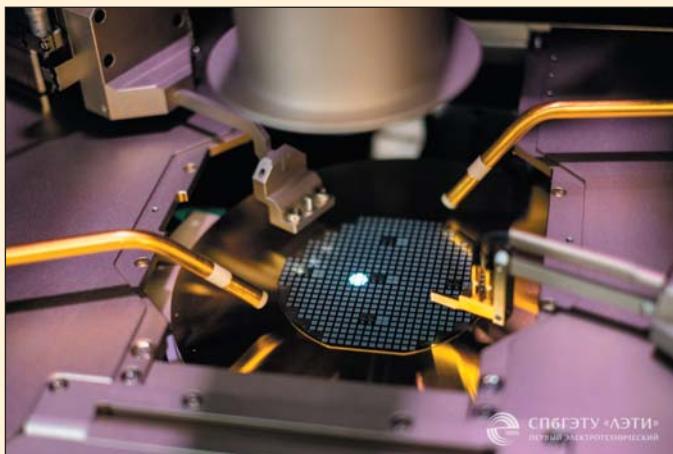
Возможные области применения:

- Высокомощные преобразователи: оба модуля оптимальны для использования в промышленных преобразователях энергии, где требуется высокая надежность и эффективность.

- Ветровые турбины: модули могут эксплуатироваться в системах управления генераторами ветровых турбин, где важна устойчивость к перепадам температуры и высокая мощность.
- Электроприводы: в системах управления двигателями, особенно в промышленных и транспортных приложениях, новые модули обеспечивают высокую производительность и долговечность.
- Инверторы высокой надежности: модули пригодны для использования в инверторах, где требуется высокая стабильность и минимальные потери энергии.
- Железнодорожный транспорт: в системах управления тяговыми двигателями электропоездов и трамваев, где необходима высокая мощность и надежность.

<https://macrogroup.ru/>

В ЛЭТИ создали прототип полевого транзистора на карбиде кремния



В Санкт-Петербургском университете «ЛЭТИ» создали прототип полевого транзистора на основе карбида кремния. В мире уже применяют эту альтернативу кремнию, который почти исчерпал свои возможности развития

в сторону легкости, компактности, быстродействия и способности работать в экстремальных условиях.

В ЛЭТИ разработали отечественный прототип полевого транзистора на основе карбида кремния (SiC) на 1,7 кВ. На основе этой технологии могут быть созданы новые компьютеры, планшеты, беспилотники, меборудование, мобильные телефоны и прочее, рассказали изданию учены. Разработка ведется в рамках программы развития по переходу на новую электронную компонентную базу (ЭКБ).

Устройства на их основе оптимальны для систем 5G-интернета, так как они работают на более высоких частотах. Транзисторы на SiC характеризуются чрезвычайно низкими потерями мощности при переключениях, работают действуют быстрее и надежнее кремния и имеют меньший размер кристалла для эквивалентного напряжения пробоя.

Их способность работать при темпер +200 °C, позволяет снизить требования к охлаждению и увеличить срок службы изделия.

В январе 2025 года стало известно, что НПО «Энергомодуль» выпустило не уступающие импортным аналогам первые образцы силовых модулей на кристаллах карбида кремния, разработанных в ГК «Элемент». Серийное производство карбидокремниевых транзисторов должно начаться в течение двух лет.

Высоковольтные GaN:

быстрая коммутация и эффективность

Традиционные кремниевые приборы практически достигли своих пределов в части улучшения параметров энергозэффективности и миниатюризации. Однако у них есть революционная альтернатива — транзисторы на основе нитрида галлия, в первую очередь ключи с высокой подвижностью электронов. Благодаря своим уникальным характеристикам они открывают новые возможности в силовой электронике.

**Йохен Хюскенс
(Jochen Hüskens)¹**

**Перевод:
Евгений Карташев**

Транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT) — относительно новое серийно выпускаемое устройство среди силовых ключей. В отличие от своего традиционного аналога из легированного кремния, HEMT представляет собой гетеропереходный прибор, построенный с использованием двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. Впервые представленные на рынке в конце 1990-х и начале 2000-х годов, HEMT используют уникальную зонную диаграмму, образованную за счет концептуального «электронного» газа с основными носителями (электронами) в нелегированном материале с низкой запрещенной зоной. Благодаря полученной в результате структуре эти приборы могут работать на предельно высоких частотах, из-за отсутствия «рассевающих» атомов легирующей примеси.

Характеристики HEMT-ключей в зависимости от использованных материалов могут быть адаптированы как для высокочастотных, так и для более мощных применений. Например, приборы из нитрида галлия (GaN), показанные на рис. 1, оптимальны для конверторов напряжения и других мощных систем благодаря чрезвычайно низкому сопротивлению открытого канала.

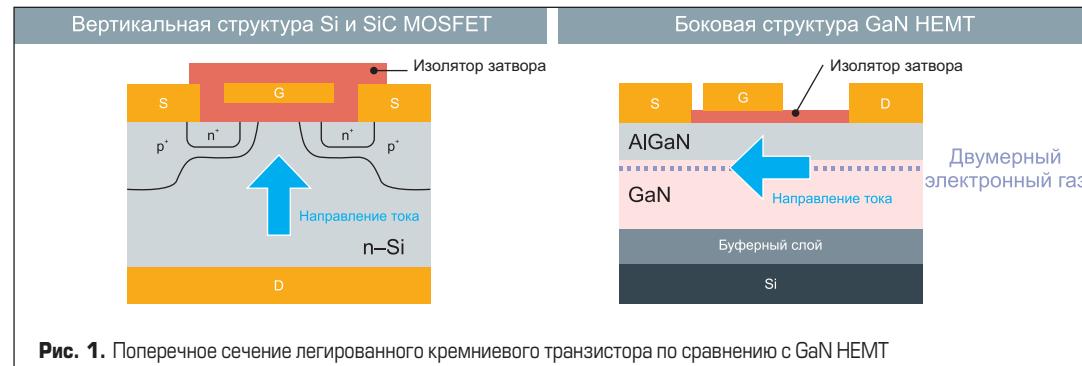
В приложениях высокой мощности, особенно на низких частотах, обычно используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). В последнее время в этом диапазоне завоевывают все большую популярность MOSFET на основе карбида

кремния (SiC), обеспечивающие частоту переключения вплоть до нескольких мегагерц. Как показано на рис. 2, при еще большей скорости коммутации и мощности ниже 1000 В·А, наиболее эффективны транзисторы с высокой подвижностью электронов. Примерами таких систем служат источники питания для серверов центров обработки данных, потребительские AC-адAPTERы, автомобильные DC/DC-конверторы на 48 В и драйверы лазерных лидаров (LiDAR).

Одной из самых серьезных проблем, связанных с широким внедрением и массовым производством GaN HEMT за последние два десятилетия, является сложность разработки соответствующего драйвера. Специфические требования к схеме и связанные с ними проблемы надежности не позволяли GaN HEMT-приборам завоевать популярность на рынке. Компания Rohm решила эту проблему, предложив серию специализированных интегральных драйверов затворов для упрощения проектирования и обеспечения высокой производительности. Благодаря этим разработкам GaN HEMT смогли утвердиться на рынке, и были созданы предпосылки для создания приборов с более высоким рабочим напряжением.

Область применения GaN HEMT

Основное преимущество GaN HEMT — большая частота переключения при умеренно высоком уровне мощности. Это сочетание определяет очень



¹Rohm Semiconductor.

специфический набор областей применения, которые с каждым днем становятся все более актуальными и завоевывают соответствующую долю рынка электронной промышленности. Наиболее распространенными примерами являются схемы управления двигателями, импульсные драйверы лазерных лидаров и нишевые радиочастотные выходные каскады.

Типовой электропривод состоит из нескольких последовательных преобразователей напряжения. Как показано на рис. 3, AC-сигнал источника питания сначала преобразуется в высоковольтное DC-напряжение, которое затем трансформируется обратно в AC-сигнал с переменной частотой и напряжением для управления двигателем. В приводе электромобиля первые блоки отсутствуют, и в качестве источника питания используется высоковольтная DC-шина.

Выходной силовой DC/AC-каскад, где частота переключения может колебаться в диапазоне 40–100 кГц, оптимален для транзисторов GaN HEMT. По сравнению с другими технологиями, такими как Si MOSFET и IGBT, каскады на GaN-транзисторах более эффективны, компактны и, как правило, менее затратны в реализации.

Еще одно применение GaN HEMT, получившее широкую известность на рынке, — это лазерные драйверы лидаров, используемых в системах автономного вождения. Для создания импульсов света лазер должен управляться от полупроводникового ключа. Качество его работы напрямую влияет на разрешение лидарного изображения и обычно характеризуется временем включения, пиковым током и потерями переключения. По сравнению с традиционными кремниевыми приборами, GaN HEMT обеспечивают чрезвычайно большую скорость коммутации и на 65% меньшие потери мощности. Это позволяет улучшить качество изображения лидара при одновременном повышении эффективности и упрощении отвода тепла.

Рынок GaN-приборов для радиочастотных применений в основном формируется за счет радарных систем, а также электроники для антенных применений. Радары обычно реализуются с использованием мощных широкополосных ламп бегущей волны (ЛБВ). Благодаря возможности работы с импульсными радиосигналами GaN HEMT быстро заменяют это ненадежное устройство с коротким сроком службы. Как и в предыдущих примерах, GaN HEMT-ключи обеспечивают более высокую надежность, повышенную эффективность и лучший высокочастотный отклик.

Дискретные высоковольтные GaN HEMT

Возможность коммутации высоковольтных сигналов напряжения имеет решающее значение как для габаритов устройства, так и для его эффективности. При той же мощности повышение напряжения приводит к снижению тока, что, в свою очередь, сокращает потери включения и позволяет уменьшить физические размеры прибора. В целом высоковольтный HEMT имеет более широкое применение во

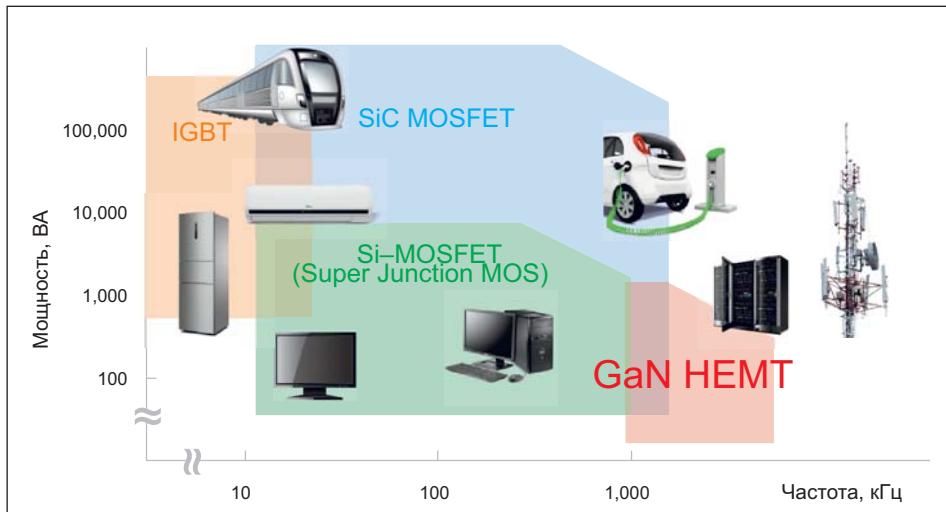


Рис. 2. Области применения (мощность и частота) IGBT, SiC MOSFET, Si-MOSFET (Super Junction MOS), GaN HEMT

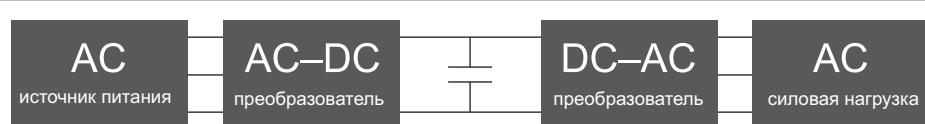


Рис. 3. Упрощенная блок-схема привода электродвигателя

всем спектре топологий источников питания, что обеспечивает конкурентные преимущества в части габаритов и производительности.

С этой целью Rohm продолжает совершенствование технологии HEMT, разработав дискретные GaN с напряжением до 650 В. Компания работает над снижением сопротивления канала этих приборов и выпускает их в более компактном и удобном для применения корпусе DFN. Транзисторы с рабочим напряжением 650 В отличаются предельно малым временем переключения и нулевым временем обратного восстановления. Линейка GaN-приборов от Rohm

имеет встроенную защиту затвора от ESD, что повышает их надежность, упрощает схему драйвера затвора и сводит к минимуму количество внешних компонентов.

Силовая секция HEMT

В дополнение к дискретным GaN HEMT компания Rohm предлагает специализированные силовые приборы с встроенным драйвером затвора. Силовой транзистор, драйвер, вспомогательные схемы, защита от ESD и схема контроля EMI объединены в одном корпусе.

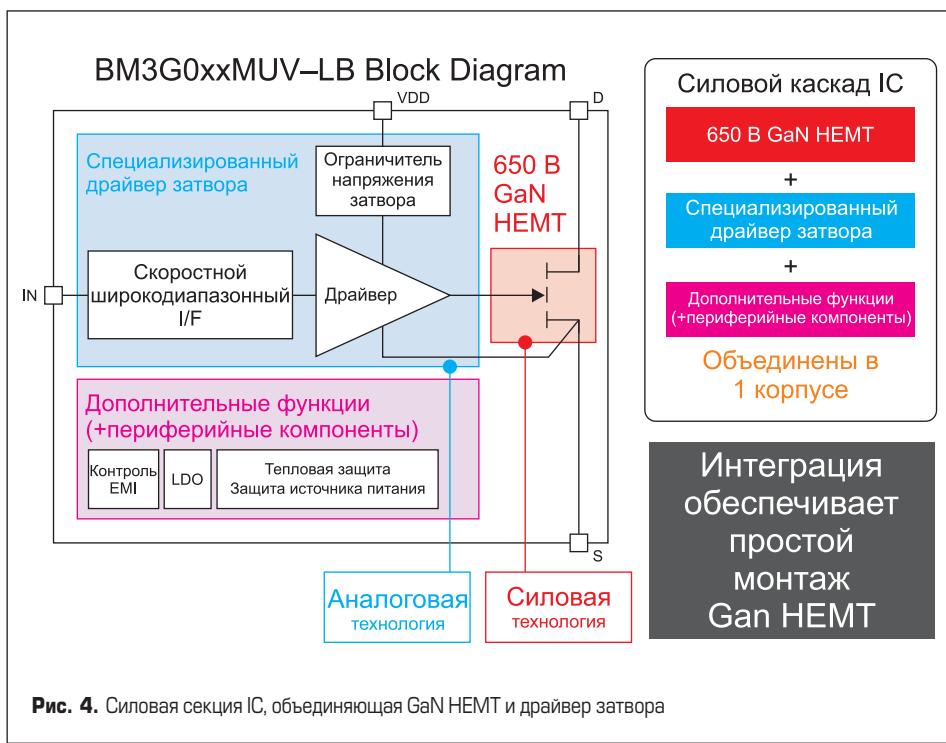
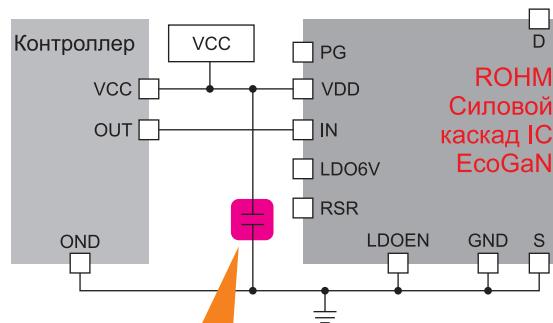
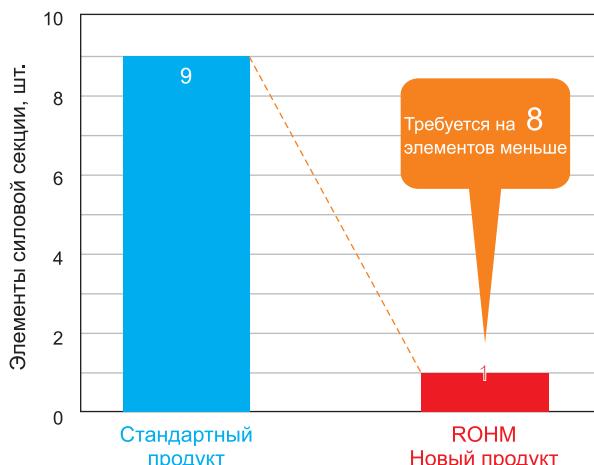


Рис. 4. Силовая секция IC, объединяющая GaN HEMT и драйвер затвора

Уменьшение габаритов изделия

Требуется только 1 внешний элемент силовой секции



Только 1 элемент силовой секции

Рис. 5. Сокращение номенклатуры за счет использования интегральной силовой секции

Это не только экономит пространство, но и повышает эффективность и устойчивость к воздействию окружающей среды, в том числе за счет тепловой защиты (рис. 4).

Флагманские приборы серии BM3G015MUV-LB и BM3G007MUV-LB отличаются широким диапазоном входного напряжения (2,5–30 В), очень низкой временной задержкой (15 нс), регулируемой скоростью нарастания и малым током потребления. Эти устройства подходят для построения различных топологий источников питания, включая обратноходовые, резонансные (LLC), ККМ с интерливингом и двухтактные ККМ. Силовой импульсный каскад (рис. 5) может быть реализован с помощью одного внешнего элемента, что повышает производительность и минимизирует физический объем. Это также улучшает тепловые характеристики и позволяет наилучшим образом использовать пространство PCB. Испытания показали, что применение данных IC дает возможность поднять выходную мощность стандартных схем источников питания до 20%.

Интегральные НЕМТ

Как и любые другие интеллектуальные силовые модули, интегральные приборы SiP Rohm (System in Package) объединяют несколько компонентов сложной системы, что позволяет сократить номенклатуру, упростить проектирование и увеличить функциональность. Приборы SiP предназначены для конкретных областей применения и содержат детали, выбранные и оптимизированные для определенной топологии схемы. Например, разработаны высоковольтные GaN-SiP для обратноходовых преобразователей напряжения (BM3GQ12A3MUV-LB и BM3GQ12A2MUV-LB) и блоков питания с ККМ (BM3GF01MUV-LB и BM3GF02MUV-LB). В этих модулях объединены силовой GaN НЕМТ, контроллер, драйвер затвора, резистивные сенсоры, вспомогательные усилители и LDO, а также другие функциональные элементы. Уменьшение количества дискретных деталей позволяет оптимизировать тепловые характеристики печатной платы, что в свою очередь повышает общую производительность системы.

Заключение

Достижения в области технологии EcoGaN от Rohm позволили создать широкий ассортимент силовых ключей НЕМТ и наметить план дальнейших разработок. Начиная с дискретных транзисторов на 650 В и заканчивая сложными силовыми приборами и модулями SiP, компания заложила основу для внедрения устройств НЕМТ во всем спектре высокочастотных источников питания. Ключи GaN

НЕМТ с рабочим напряжением 650 В соответствуют самому высокому в отрасли показателю качества FOM (Figure of Merit), обеспечивая беспрецедентное снижение потерь переключения по сравнению с обычными GaN и повышая эффективность источника питания. Компанией Rohm внедрен вертикально интегрированный процесс производства GaN, начиная с изготовления исходных пластин и заканчивая упаковкой конечного продукта.

По материалам сайта www.rohm.com

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

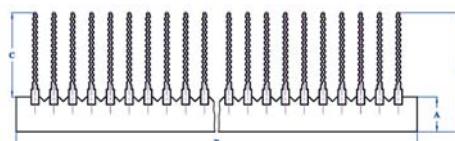
Новинка — сварные радиаторы

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



Новинка — охладители О57

по вашим размерам



реклама

SiC JFET от компании Onsemi

Бурное развитие индустрии облачных сервисов и рост количества различных дата-центров требует все большего объема электроэнергии. Очевидно, что в таких условиях наиболее востребованы решения, позволяющие снизить энергозатраты, а также увеличить плотность мощности. Одним из вариантов решения проблемы является увеличение КПД систем питания. В статье представлены перспективные приборы 4-го поколения SiC Cascode JFET от On Semiconductor, повышающие эффективность источников питания в целом и их отдельных узлов, в частности ККМ, использующих топологию Totem pole, что позволяет достичь в пике КПД 99,37% [1]. Рассмотрено применение этих компонентов в других приложениях, таких как твердотельные реле.

Артём Федоровский

artem.fedorovskij@symmetron.ru

Новые карбидокремниевые SiC JFET-приборы Onsemi обладают улучшенными характеристиками проводимости (пониженное сопротивление канала $R_{DS(on)}$) и переключения. Эти транзисторы оптимальны для применения в системах, где требуется управление сильноточной нагрузкой с низкой скоростью коммутации, например, в твердотельных реле и прочих системах коммутации мощности. Их эффективность обусловлена свойствами, присущими карбиду кремния, а также оптимизированной структурой JFET, обеспечивающей низкое сопротивление открытого канала и хорошие тепловые характеристики. Данные транзисторы пригодны для параллельного соединения, позволяющего эффективно управлять большими токами.

Приборы JFET являются нормально включенным, поэтому управление ими вызывает некоторые

трудности, что снижает их привлекательность и препятствует широкому распространению на рынке. Для решения этой проблемы специалисты компании предложили новую структуру, в которой JFET- и MOSFET-транзисторы соединены последовательно, особенности этой конструкции рассмотрены ниже.

Структура SiC Cascode JFET

Схема последовательного соединения JFET и низковольтного MOSFET показана на рис. 1, где видно, что выводы управления обоих ключей доступны. В затворе MOSFET установлен супрессор TVS для защиты изолирующего слоя затвора от внешних воздействий.

Такая комбинация обладает рядом преимуществ, что обусловлено доступностью затворов JFET и низ-

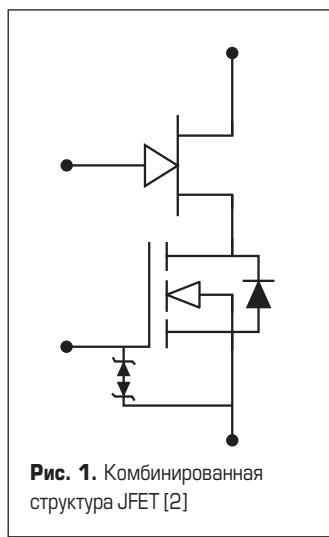


Рис. 1. Комбинированная структура JFET [2]

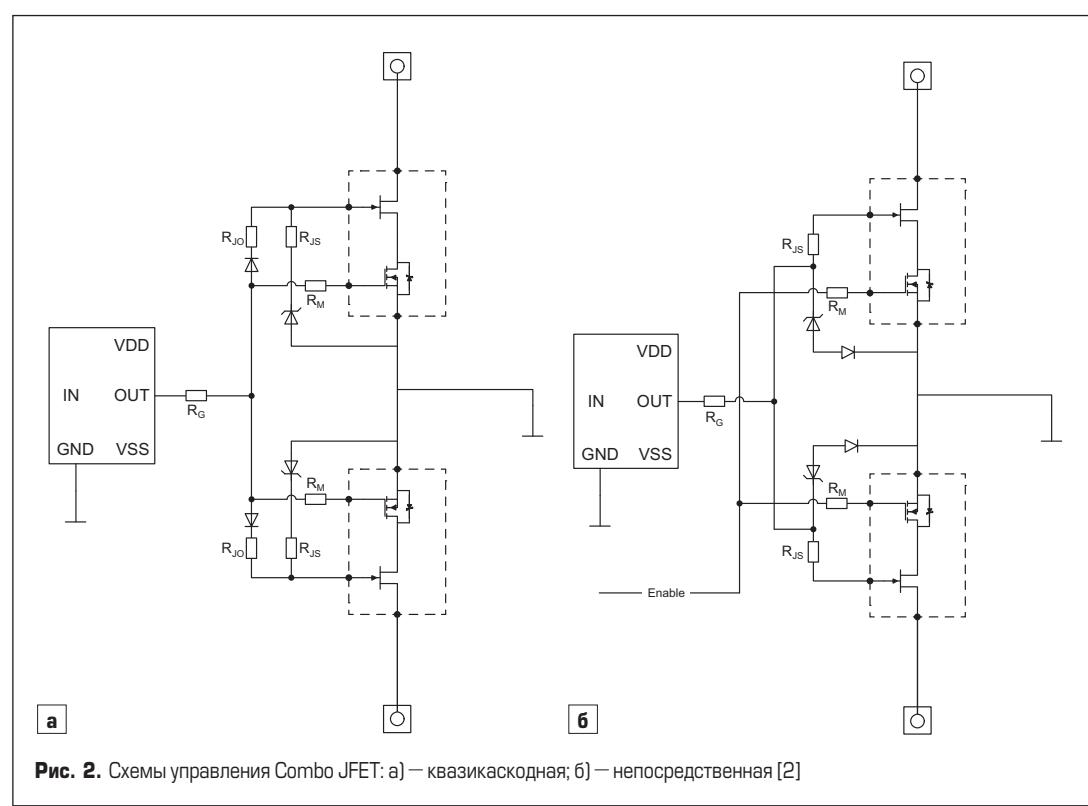


Рис. 2. Схемы управления Combo JFET: а) – квазикаскодная; б) – непосредственная [2]

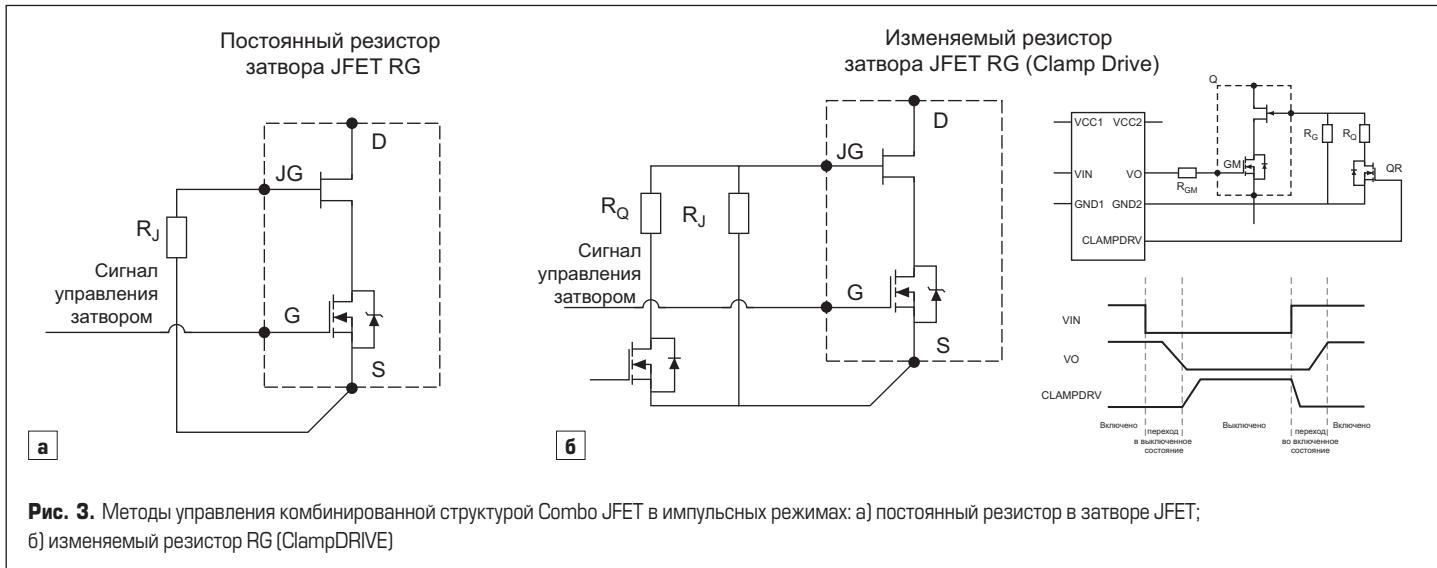


Рис. 3. Методы управления комбинированной структурой Combo JFET в импульсных режимах: а) постоянный резистор в затворе JFET; б) изменяемый резистор RG (ClampDRIVE)

ковольтного MOSFET. В частности, это обеспечивает снижение $R_{DS(on)}$ при перегрузке и упрощает схему управления затвором за счет внешнего каскодного соединения. Кроме того, можно регулировать скорость переключения с помощью сопротивления затвора JFET, а также контролировать температуру кристалла JFET путем измерения падения напряжения в цепи «затвор-исток».

Для управления структурой Combo JFET используются два основных метода: квазикаскодный и непосредственный. Такие способы управления, как правило, применяются в твердотельных реле.

Для применения этих приборов в импульсном режиме коммутации высоких токов, помимо двух указанных способов управления (рис. 2), разработана и рекомендована схема Clamp DRIVE. Также возможен простейший метод контроля затвора с одним затворным резистором JFET для настройки скорости коммутации, показанный на рис. 3 [2].

Основные преимущества SiC относительно Si-приборов

Эквивалентная схема каскодной структуры SiC Cascode JFET показана на рис. 4. Приборы

SiC JFET имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными кремниевыми ключами. Прежде всего, карбид кремния — это материал с широкой запрещенной зоной, что обеспечивает более высокое напряжение пробоя и возможность изготавливать тонкие чипы с лучшей блокирующей способностью, чем у Si.

Кроме того:

- Для данного класса напряжения и сопротивления канала SiC-приборы обеспечивают более высокие рабочие частоты, что позволяет уменьшить размер пассивных компонентов, снизить общие размеры и стоимость устройства.
- SiC-приборы с большими классами напряжения (1200 В и выше) способны переключаться на более высокой частоте с меньшими потерями мощности. Кремниевых приборов таких классов напряжения с аналогичными возможностями практически не существует.
- В любом определенном корпусе SiC-ключи имеют меньшее сопротивление канала $R_{DS(on)}$ и меньшие потери переключения по сравнению с Si.
- В системе такой же конструкции SiC-приборы обеспечивают более высокую эф-

ективность при улучшенных тепловых характеристиках и более высокой мощности, чем Si.

Указанные преимущества поддерживаются и компонентами серии Elite SiC cascode JFET — новыми, более мощными приборами, оптимизированными для различных областей применения. Архитектура SiC cascode JFET позволяет использовать стандартные устройства управления кремниевыми (Si) затворами. Это упрощает переход от Si- к SiC-транзисторам в существующих системах, что обеспечивает большую гибкость проектирования. Новые ключи могут работать с различными типами драйверов, включая стандартные устройства управления IGBT, Si SJ MOSFET и SiC MOSFET.

Рассмотрим графики из технических спецификаций новых приборов и проанализируем их применяемость в типовых приложениях, а также оценим возможность замещения других ключей, таких как Si IGBT и Si MOSFET. Анализ проведем на примере транзистора UJ4C075018K4S с $U_{ds} = 750$ В; $I_d = 81$ А в корпусе TO-247-4, который по совокупности основных параметров можно потенциально применять в составе импульсного источника питания (ИИП), работающего от однофазной сети.

Обратим внимание на параметр «Gate-source voltage» (напряжение управления) в таблице на рис. 5, показывающий, что прибор допускает работу при достаточно низких отрицательных значениях напряжения на затворе. Уровень сигнала выключения -20 В (типовой для Si) в отношении обычных SiC-приборов может быть критичным и влиять на надежность работы силового ключа.

Рассмотрим выходные характеристики прибора (рис. 6). Графики показывают, что пороговое напряжение на затворе V_{GS} для перехода транзистора в режим насыщения составляет порядка 9 В, а переход в режим отсечки происходит при V_{GS} около 5 В и ниже. Это подтверждает возможность управления прибором с помощью стандартных драйверов MOSFET/IGBT.

В то же время высокое допустимое напряжение на затворе позволяет им работать в уже существующих системах и потенциально ис-

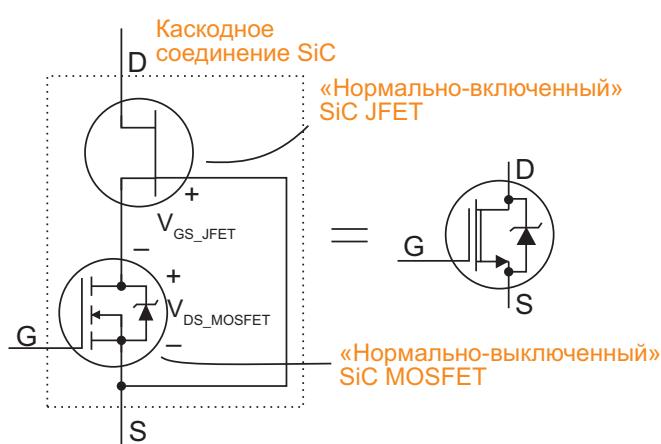


Рис. 4. Эквивалентная схема каскодной структуры SiC Cascode JFET [4]

Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Test Conditions	Value	Units
Drain-source voltage	V_{DS}		750	V
Gate-source voltage	V_{GS}	DC	-20 to +20	V
Continuous drain current ¹	I_D	$T_C = 25^\circ\text{C}$	81	A
		$T_C = 100^\circ\text{C}$	60	A
Pulsed drain current ²	I_{DM}	$T_C = 25^\circ\text{C}$	205	A
Single pulsed avalanche energy ³	E_{AS}	$L = 15 \text{ mH}, I_{AS} = 3.6 \text{ A}$	97.2	mJ
Power dissipation	P_{tot}	$T_C = 25^\circ\text{C}$	385	W
Maximum junction temperature	$T_{J,max}$		175	$^\circ\text{C}$
Operating and storage temperature	T_J, T_{STG}		-55 to 175	$^\circ\text{C}$
Max. lead temperature for soldering, 1/8" from case for 5 seconds	T_L		250	$^\circ\text{C}$

1. Limited by $T_{J,max}$ 2. Pulse width t_p limited by $T_{J,max}$ 3. Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$

Рис. 5. Таблица (скриншот) максимально допустимых параметров из технической спецификации [5]

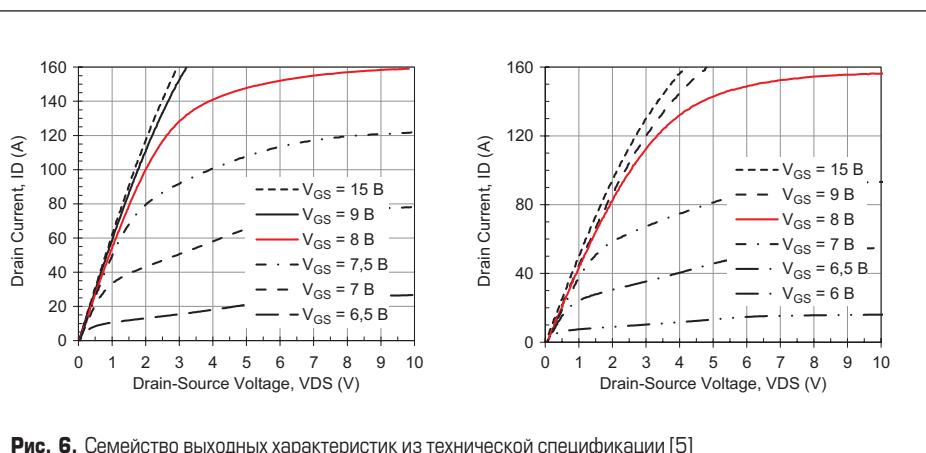


Рис. 6. Семейство выходных характеристик из технической спецификации [5]

пользоваться как замена SiC MOSFET. Далее рассмотрим динамические характеристики новых компонентов для более полного понимания возможности использования их вместо «классических» кремниевых приборов.

Строение кристалла и основные особенности

Ключевые отличия структур SiC MOSFET и каскодного SiC JFET Onsemi показаны на рис. 7.

Использование структуры SiC JFET устраняет необходимость в окисном слое затвора SiC MOSFET, что снижает сопротивление канала и приводит к уменьшению размера чипа. Меньший размер кристаллов SiC JFET является их ключевой особенностью, и его лучше всего продемонстрировать с помощью так называемого показателя качества (FOM) R_{dsA} , представляющего собой произведение сопротивления канала на активную площадь чипа: $R_{DS(on)} \times A^2$. Этот параметр показывает, что SiC JFET имеет меньшее сопротивление во включенном состоянии для определенного размера чипа. Другими словами, для получения заданного сопротивления канала $R_{DS(on)}$ в приборах SiC JFET используется SiC-кристалл меньшего размера. Лидерство Onsemi в отрасли по показателю FOM R_{dsA} нашло отражение в продуктах с низким сопротивлением $R_{DS(on)}$ в относительно небольших стандартных корпусах, таких как TOLL и D2PAK (табл. 1).

Таблица 1. Статические характеристики
дискретных приборов [2]

Название	$R_{DS(on)}$ мОм	Корпус	Номинальное напряжение
UG4SC075006K4S	6	TO-247-4	750
UG4SC075005L8S	5	TOLL	750
UG4SC075009K4S	9	TO-247-4	750
UG4SC075011K4S	11	TO-247-4	750
UG3SC120009K4S	9	TO-247-4	1200

SiC MOSFET

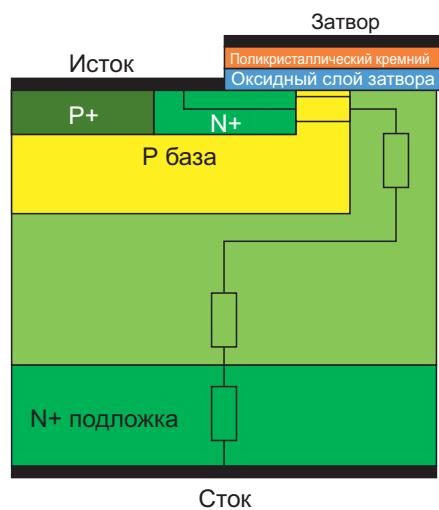


Рис. 7. Сравнение структур SiC MOSFET и SiC Cascode JFET [4]

SiC Cascode JFET

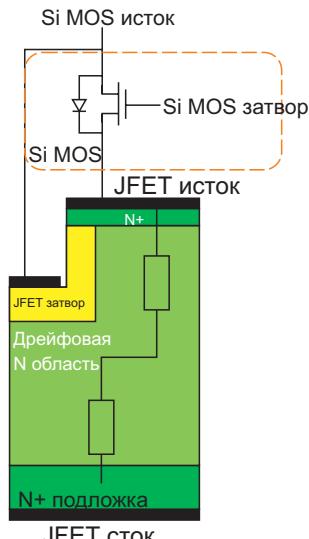


Таблица 2. Сравнение динамических характеристик

Тип прибора	$R_{DS(on)}$, мОм	Общий заряд затвора, нКл	Входная емкость, пФ	Выходная емкость, пФ	Время включения, нс	Время выключения, нс	Материал	Производитель
IPW65R019C7	19	215	9900	160	30	106	Si	Infineon
UJ4C075018K4S	18	37,8	1422	217	13	146	SiC	Ons
IMZA75R020M1HXKSA1	20	67	2217	149	13	29	SiC	Infineon
WMJ99N60F2	22	174	10480	317	121	618	Si	Wayon

Каскодная структура SiC JFET Elite имеет меньшую выходную емкость C_{oss} по сравнению с SiC MOSFET. Приборы с меньшей выходной емкостью быстрее переключаются при малом токе нагрузки и имеют меньшие времена задержки, обусловленные зарядом C_{oss} .

Миниатюризация размера кристаллов позволила улучшить и некоторые динамические характеристики. Для их более наглядной оценки выберем несколько приборов, близких по статическим характеристикам — со противлению открытого канала и максимальному напряжению сток-исток, и выполненных в одинаковом корпусе TO-247 с тремя и четырьмя выводами. Проведем сравнение компонентов нескольких производителей (Infineon, Wayon), изготовленных на основе разных полупроводниковых технологий — Si и SiC, с референтным транзистором UJ4C075018K4S.

Из таблицы 2 видно, что рассматриваемый прибор имеет лучшие показатели по входной емкости, заряду затвора и сопротивлению канала. Несколько большее время задержки выключения и выходная емкость обусловлены особенностями структуры. Однако преиму-

щества карбидокремниевых приборов относительно кремниевых очевидны.

Совместимость характеристик управления приборов SiC Cascode JFET с традиционными кремниевыми, а также карбидокремниевыми позволяет заменять их на новые ключи в существующих системах. При правильном подходе к проектированию это может заметно снизить потери на переключение, тепловыделение и, соответственно, повысить КПД всего устройства в целом.

Выводы

Анализ характеристик нового класса приборов от компании ON Semiconductor позволяет выделить две ключевые особенности этого класса приборов.

1. Улучшение показателя R_{dsA} кристаллов SiC Cascode JFE позволяет использовать более мощные чипы в корпусе меньшего размера. Примером этого является один из рассмотренных приборов — транзистор UG4SC075005L8S в корпусе TOLL, имеющий $R_{ds(on)}$ 5 мОм при напряжении V_{ds} 750 В. Такие приборы могут успешно применяться

в твердотельных реле большой мощности и других подобных устройствах.

2. Применение комбинированной каскодной структуры чипа позволило улучшить ряд важных характеристик, в частности входной емкости и заряда затвора. Это в свою очередь обеспечивает им хорошую управляемость и совместимость со стандартными драйверами затвора. Новые приборы могут надежно заменить традиционные кремниевые и карбидокремниевые ключи с минимальными изменениями в схемотехнике.

Литература

- www.onsemi.com/download/application-notes/pdf/and90324-d.pdf
- www.onsemi.com/download/application-notes/pdf/and90336-d.pdf
- www.onsemi.com/download/application-notes/pdf/and90329-d.pdf
- www.onsemi.com/company/news-media/blog/silicon-carbide-sic/en-us/why-are-sic-cascode-jfets-an-easy-si-to-sic-transition
- www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/uj4c075018k4s-d.pdf

Созданы алмазные пластины с бором для электроники будущего

Специалисты университета ЛЭТИ в Санкт-Петербурге вместе с компанией New Diamond Technology создали образцы алмазных пластин с добавлением бора, которые, по убеждению ученых, будут полезны для силовой электроники ближайшего будущего.

Одним из перспективных материалов для электроники является химически чистый (синтетический) алмаз. Несмотря на то, что он сам по себе является диэлектриком, благодаря возможности

внедрения высокой концентрации легирующих элементов, таких как азот, бор и фосфор, алмаз становится полупроводником. Особый интерес вызывают алмазные кристаллы с примесью бора, которые рассматриваются как основа для устройств опто- и микроэлектроники нового поколения.

«На данный момент получен образец, на основе которого можно изготавливать прототипы электронных устройств. Однако для внедрения

разработок в массовое производство необходимо достичь размеров алмазной монокристаллической подложки электронного качества от 2 дюймов и выше с плотностью дислокаций менее 103 в минус второй степени сантиметров. На это будут направлены наши дальнейшие исследования», — рассказал профессор кафедры микро- и наноэлектроники Василий Зубков.

<https://nauka.tass.ru>

Новый однофазный ИБП от «Систем Электрик» с учетом требований российского рынка



Российская компания «Систем Электрик» (Systeme Electric), представляет новый универ-

сальный однофазный ИБП Smart-Save Online SRT 5-10K IEC.

Smart-Save Online SRT 5-10K IEC предназначен для защиты электронного оборудования при нарушениях подачи электроэнергии, скачках напряжения и тока, колебаниях напряжения в электросети и крупных сбоях энергосистемы.

Среди ключевых особенностей Smart-Save Online SRT 5-10K IEC — онлайн-топология (нулевое время переключения и чистая синусоида на выходе) для наиболее сложных условий электроснабжения, монолитный компактный 5U-корпус, 10 выходных розеток для легкой и удобной коммутации.

Особое внимание уделено аккумуляторным батареям — картриджная замена облегчит эксплуатацию и обслуживание, температурная компенсация заряда увеличит срок службы АКБ, а автоматическое определение подключения внешних батарейных блоков позволит достичь их быстрого заряда.

Также Smart-Save SRT 5-10K IEC оснащены улучшенным цветным сенсорным дисплеем с интуитивно понятным интерфейсом и большим количеством коммуникационных портов для самых взыскательных пользователей.

<https://systeme.ru/>

Новые возможности силовых модулей

С «прямым» жидкостным охлаждением

Задача производителей силовой электроники состоит в повышении мощности при одновременном снижении затрат. Для достижения этих противоречящих друг другу требований приходится идти на компромиссы. Главная проблема состоит в том, что с ростом нагрузки увеличивается тепловой стресс в полупроводниковом приборе, сокращая срок его службы.

Др. Мартин Шульц¹

Перевод: Иван Сергеев

Очевидным решением становится выбор полупроводниковых технологий, имеющих меньшие потери, например, использование SiC-MOSFET-ключей вместо традиционных IGBT, однако этот вариант и стоит дороже. Еще один возможный способ решения проблемы — повышение эффективности системы охлаждения, однако изолирующие подложки накладывают физические ограничения на процесс теплопередачи. Как же устранить проблему? Отказаться от требований к изоляции!

Существующие решения

Большинство стандартных силовых полупроводниковых модулей имеют в своем составе изолирующую керамическую DBC (Direct Bonded Copper) подложку с медными токопроводящими шинами. На ней располагается один или несколько силовых чипов, поскольку структура верхнего слоя меди позволяет соединять цепи с различными потенциалами. Схематичное изображение такой конструкции приведено на рис. 1. В отличие от этого, силовые модули в дисковых (капсульных) корпусах часто комбинируются с электрически активными охлаждающими пластинами, как показано на рис. 2.

¹Littelfuse.

Керамический слой в конструкции, показанной на рис. 1, вносит основной вклад в тепловое сопротивление $R_{th(j-c)}$. Высококачественная керамика, такая как нитрид алюминия (AlN), обладает теплопроводностью в диапазоне до 180 Вт/(м·К). Однако она должна иметь толщину, обеспечивающую необходимую изоляцию, что дает высокое значение $R_{th(j-c)}$. Конструкция, представленная на рис. 2, отличается лучшими тепловыми характеристиками, поскольку здесь отсутствует электрическая изоляция между силовым полупроводником и теплоотводом. В такой системе необходимо использовать охлаждающую жидкость, не обладающую электропроводностью, например смесь деионизированной воды и гликоля, а также контролировать и поддерживать ее изоляционные свойства.

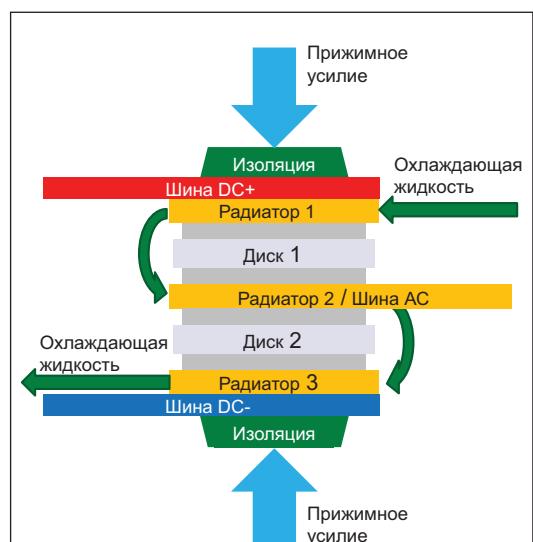


Рис. 2. Полупроводниковый прибор с активной охлаждающей платой

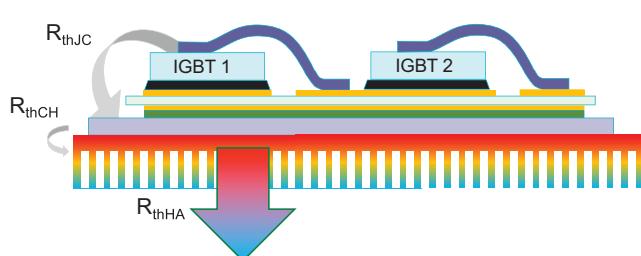


Рис. 1. Структура изолированного полупроводникового модуля

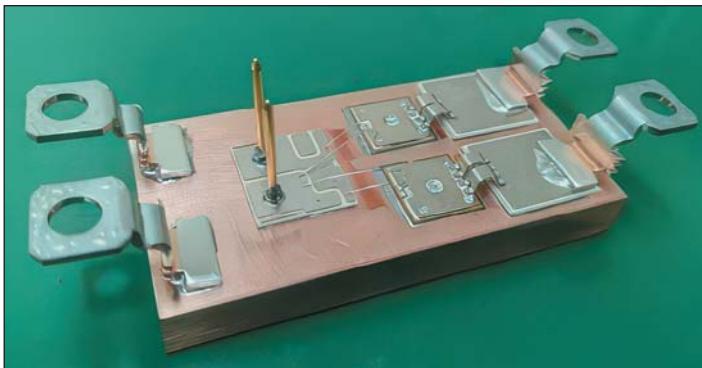


Рис. 3. Тестовый модуль с паяными соединениями

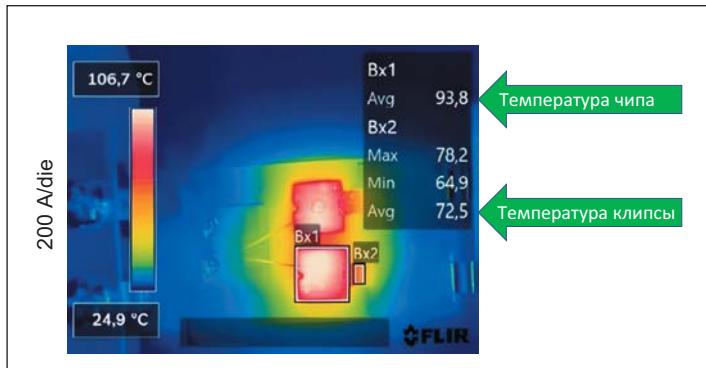


Рис. 4. Тепловой профиль модуля с паяными соединениями

Другие подходы

Для снижения теплового сопротивления DCB-подложки применен подход, при котором кристаллы IGBT установлены непосредственно на охлаждаемой жидкостью пластине размером 40×80 мм. Таким образом, базовая плата электрически соединяется с коллекторами IGBT. Подложка DCB используются для монтажа силового терминала эмиттера, а также выводов управления.

Чтобы преодолеть ограничения, связанные с нагрузочной способностью соединительных проводников, был создан тестовый прибор с усовершенствованной технологией сборки. В данном случае использованы кристаллы с напаиваемым слоем металлизации на лицевой поверхности, а проводники заменены специальными клипсами. Поскольку их невозможно соединить непосредственно с чипом, сначала к IGBT припаивается контактная площадка. Полученный тестовый образец показан на рис. 3.

Результаты измерений, выполненных при токе 200 А (на чип IGBT) с помощью термокамеры, представлены на рис. 4.

Очевидно, что все ограничения, связанные с использованием традиционных соединительных проводников, здесь сняты. Температура клипсы значительно ниже +100 °C при плотности тока, допустимой для кристалла, но превышающей возможности проводников.

Для исследований были использованы стандартные чипы IGBT с номинальным током 150 А. Современные промышленные условия тестирования предусматривают максимальную температуру охлаждающей среды +65 °C и максимальную температуру кристаллов +175 °C. Согласно проведенным измерениям, это дает максимальную плотность потерь мощности 380 Вт/см², которая должна быть рассеяна исследуемым полупроводниковым прибором. Отметим, что чип с номинальным током 150 А оставался в допустимых тепловых пределах даже при 200 А. При заданных тепловых режимах и температуре на входе +65 °C максимальное значение $T_{vj} = +175$ °C достигается при токе 250 А.

Проверка электрических режимов

Хотя основное внимание в ходе исследований уделялось тепловым характеристикам, были проверены и основные электрические параметры, результаты «двуихимпульсного» теста представлены на рис. 5.

Проверка показала, что коммутация IGBT и FWD происходит без критических переходных процессов, но из-за особенностей испытательной установки дополнительные детали не изучались. Хотя расположение чипов не было оптимизировано и не ожидалось, что переключение будет «идеальным», полученные результаты можно считать достаточно хорошими и пригодными для дальнейшей серийной разработки.

Термоциклизование

Хорошие тепловые характеристики являются ключевым условием увеличения срока службы силового электронного компонента. В ходе

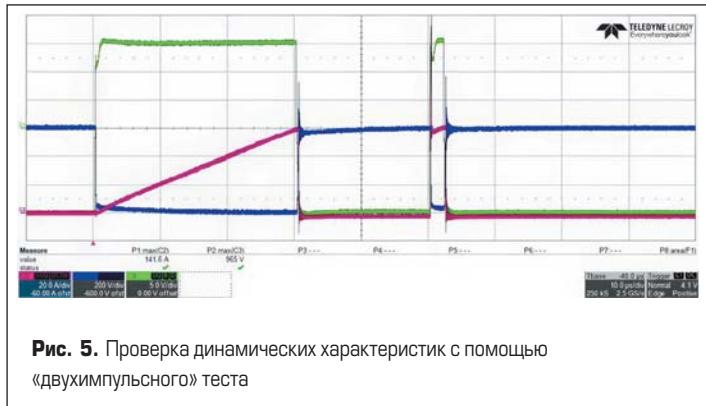


Рис. 5. Проверка динамических характеристик с помощью «двуихимпульсного» теста

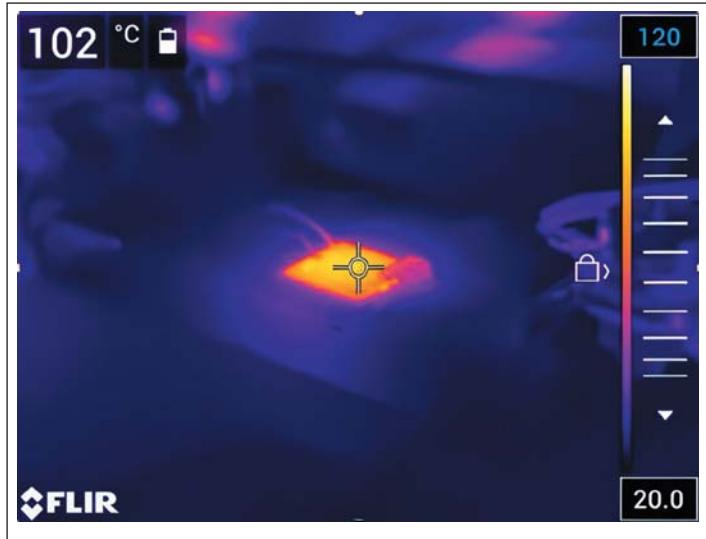


Рис. 6. Тепловой профиль чипа в ходе теста на активное термоциклирование

выполнения проекта несколько полупроводниковых приборов были протестированы на активное термоциклирование (тест РС) в соответствии с требованиями стандарта IEC 60749.

Предполагалось, что описанный вариант конструкции с использованием клипс обеспечит более длительный срок службы, чем при классической технологии со сварными проводниками, так как устраиваются такие механизмы разрушения, как отрывание проводников и растрескивание в точках сварки. Однако поскольку контактная площадка припаяна к лицевой стороне чипа, ожидается, что в конечном итоге может произойти расслоение этой связи. Соответствующий тест проводился при температуре охлаждающей среды +12 °C. В течение 4-с цикла с коэффициентом заполнения 50% перепад температуры чипа составил 90 К при токе нагрузки 250 А. На рис. 6 показаны полученный тепловой профиль, отметим низкое тепловыделение внутри охлаж-

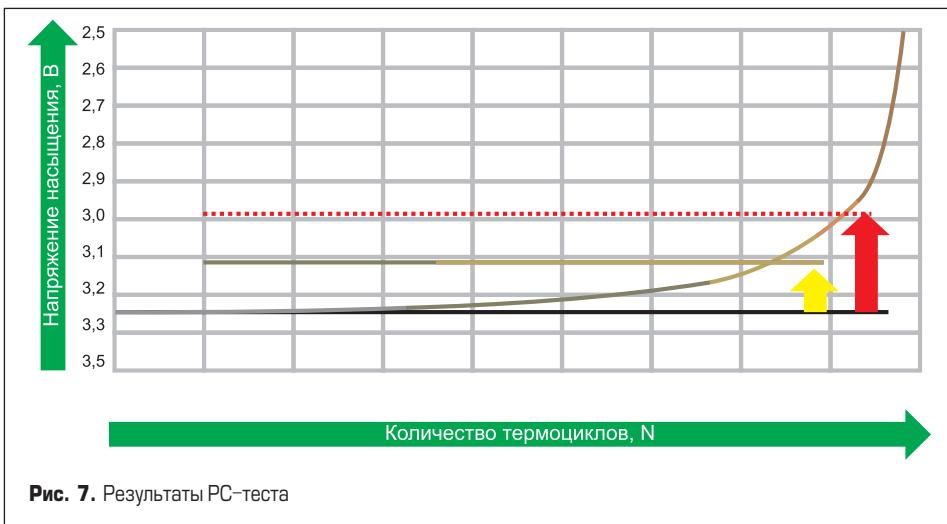


Рис. 7. Результаты РС-теста

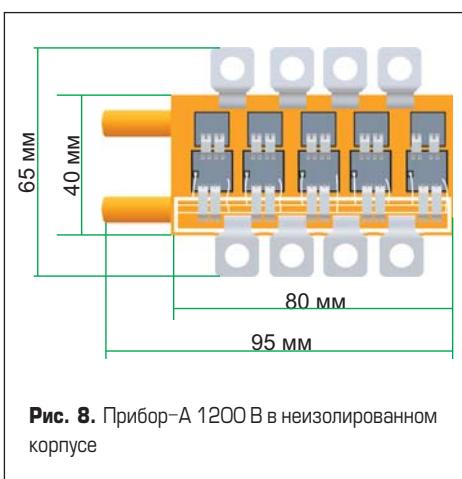


Рис. 8. Прибор-А 1200 В в неизолированном корпусе

дающей плиты. Результаты долговременных испытаний представлены на рис. 7.

Важно отметить, что номинальный ток чипа в этом тесте всего 150 А, и несмотря на то что определенные для IGBT температурные пределы не были превышены, кристаллы показали гораздо лучшие характеристики, чем если бы они были бы использованы в реальных приложениях.

Критерием окончания срока службы в данном виде испытаний является увеличение напряжения насыщения на 5%. Это значение было достигнуто примерно после 145 тыс.

циклов. При использовании классической технологии пайки в аналогичных условиях тестирования достигается около 80 тыс. циклов. Поскольку существует потенциал для дальнейшего повышения надежности, заложенный в технологии металлизации чипов, а также материале припоя и процессе пайки, представляется возможным увеличить стойкость к термоциклированию новой конструкции по меньшей мере в 2 раза по сравнению с традиционными силовыми приборами.

Потенциальные области применения и возможные преимущества

Исходя из особенностей конструкции и достигнутой плотности мощности, очевидно, что предлагаемый силовой модуль предназначен для эксплуатации в преобразователях высокой мощности. В частности, в системах, изначально имеющих жидкостное охлаждение, преимущества от применения таких силовых приборов перед традиционными изолированными модулями очевидны.

В качестве целевых приложений для новых модулей можно рассматривать источники возобновляемой энергии (например, ветроэнергетические установки) или инверторы для сварки методом индукционного нагрева. Поскольку теплоотвод имеет соединение с коллектором IGBT, предлагаемая конструкция становится хорошим вариантом для создания модуля с высокой нагрузочной способностью, схематично показанного на рис. 8.

Прибор с чипами 250 А образует одиночный ключ с номинальным током 1200 А, имеющий общий объем 123,5 см³. Полумост, состоящий из двух таких ключей, занимает около 250 см³. Для сравнения, объем выпускаемых сегодня стандартных полумостовых модулей большой мощности достигает 700 см³.

Еще одним преимуществом встроенной системы жидкостного охлаждения является то, что корпус устройства в этом случае не подвергается воздействию высоких температур, что обычно наблюдается в сило-

вых полупроводниковых приборах. Это открывает путь к использованию недорогих пластмасс, возможно, даже легко перерабатываемых, что станет важной темой в ближайшие годы.

Полумост новой конструкции (рис. 8) имеет массу менее 0,7 кг, то есть менее половины веса существующих полупроводниковых приборов. Незначительное снижение производительности за счет замены медного радиатора на алюминиевый позволит уменьшить как стоимость, так и вес.

Высокоэффективное охлаждение является ключом к максимальному использованию возможностей IGBT-приборов с повышенным пределом выхода из насыщения. Область оптимизации технологии IGBT представляет собой треугольник их прямого напряжения, динамических свойств и устойчивости к короткому замыканию (КЗ). Чипы с низкими потерями переключения, как правило, имеют более высокие статические потери ($V_{ce(sat)}/V_{on}$) и, наоборот, при условии, что стойкость к КЗ остается неизменной. Диаграмма, приведенная на рис. 9, отражает соотношение прямого напряжения и тока I_C IGBT, оптимизированное для очень низких значений V_{on} .

Чип IGBT 1200 В имеет номинальный ток 200 А и в данной рабочей точке генерирует потери 240 Вт. Хотя он способен выдерживать нагрузку до 450 А, потери при этом вырастают до 720 Вт, что соответствует их плотности 360 Вт/см². Такая плотность потерь в приборах с керамическими изолирующими подложками приводит к очень большому нагреву кристаллов даже при использовании высокоэффективных керамических материалов.

«Прямое» жидкостное охлаждение позволило довести плотность потерь до 380 Вт/см² — это существенно повышает нагрузочную способность чипов без превышения температурных пределов. Модуль, показанный на рис. 8, способен пропускать ток более 2 кА, что соответствует допустимым пределам плотности тока применяемых силовых терминалов.

Заключение

Тенденция увеличения плотности мощности силовых полупроводниковых приборов начинает достигать физических пределов из-за требований к изоляции. Для расширения этих пределов необходимо разрабатывать методы более эффективного отвода тепла. Один из способов достижения этой цели — прямое жидкостное охлаждение в сочетании с новыми технологиями соединения чипов. Переход от классических изолированных модулей к неизолированному конструкциям позволяет увеличить плотность мощности почти в 10 раз. Это не ограничивается технологией IGBT, предлагаемая концепция точно так же может быть реализована на полупроводниках с широкой запрещенной зоной.

По материалам сайта www.littelfuse.com

Цифровые датчики напряжения —

очередной шаг развития

В статье приведены данные о сертификации серийной датчиковой продукции от российского производителя и проанализированы новые требования, которые предъявляет рынок к первичным преобразователям. На примере датчика напряжения рассмотрены возможности измерения различных видов напряжений, основные требования и методы их реализации в конструкции аналогового датчика. Представлена конструкция и описаны особенности нового цифрового датчика напряжения.

**Николай Гребенщиков
Григорий Портной, к. т. н.
Константин Разумовский
Николай Фотов**

sensor@gorizont-plus.ru

Сегодня значительно выросло количество научных статей и обзоров, а также рекламных материалов, посвященных исследованию и использованию первичных преобразователей (датчиков). Применение новых материалов и комплектующих позволяет не только совершенствовать технические характеристики этих приборов, но и влияет на конструктивные особенности датчиков: они становятся легче, долговечнее, удобнее в монтаже и, главное, предоставляют разработчикам большую свободу выбора. Однако разработчики различных видов техники выдвигают специфические требования, которые учитываются при совершенствовании конструкции датчиков.

НПО «Горизонт Плюс» (г. Истра, Московская обл.) много лет занимается разработкой и постановкой

на серийное производство датчиков, предназначенных для измерения базовых электрических величин: тока, напряжения и активной мощности [1]. Уход с этого рынка иностранных компаний освободил место российским производителям, но при этом не только вынудил их максимально увеличить выпуск недостающей продукции, но и потребовал соответствия зарубежным образцам, к высокому качеству которых уже привык потребитель.

Чтобы соответствовать предъявляемым сегодня требованиям, специалисты компании активно занимаются сертификацией ранее разработанных приборов и столь же активно ищут способы совершенствования технических характеристик новых датчиков. В данной статье сделана попытка кратко рассказать об этих направлениях работы НПО «Горизонт Плюс».



Рис. 1. Внешний вид типовых датчиков измерения тока для монтажа:
а) на печатную плату; б) DIN-рейку; в) датчика для измерения тока до 4000 А с диаметром отверстия под токовую шину 60 мм

Сертификация датчиковой продукции НПО «Горизонт Плюс»

За годы работы компании линейка датчиковой продукции была значительно расширена и превысила две сотни модификаций. Причем если первые модели датчиков создавались для использования в преобразовательной технике, то позже стали разрабатываться приборы для систем автоматизации, частотных электроприводов, сварочного оборудования, энергоемких производств, подвижного электротранспорта и других промышленных применений. Это означает, кроме всего прочего, повышенные требования по электрическим параметрам и точности этого оборудования. Широкая номенклатура выпускаемых датчиков потребовала корректировки и систематизации конструкторско-технологической документации, изменения наименования и маркировки приборов и т.д.

Промежуточным итогом такой работы стала сертификация в 2019 году самой большой группы выпускаемых приборов — датчиков (преобразователей) тока серии ПИТ, которые позволяют измерять различные виды тока в широком диапазоне, с гальванической связью цепей входа и выхода [2]. Типичные представители данного класса приборов представлены на рис. 1. По результатам проведенных испытаний все датчики тока ПИТ (от единиц миллиампер до десятков килоампер) были сертифицированы и внесены в Государственный реестр средств измерений РФ под номером № 74910-19.

Были проведены испытания и сертифицированы преобразователи напряжения серии ПИН. Датчики этой серии предназначены для преобразования напряжения постоянного и (или) переменного тока в цепях, гальванически изолированных от выхода. Повышенные требования к таким датчикам напряжения предъявляются в самых разных областях техники: в инверторных приводах и частотно-регулируемых электроприводах переменного тока, в статических преобразователях для электроприводов постоянного тока, в железнодорожной инфраструктуре широко-го применения и т. д.

По результатам испытаний датчики напряжения с диапазоном 1–6000 В (рис. 2) внесены в Госреестр СИ РФ под номером № 75210-19. Сертификация позволила расширить область применения этих приборов и повысила уровень их продаж. Датчики оказались весьма востребованными для решения задач в самых различных отраслях народного хозяйства, для АСУ предприятий и АСУ технологических процессов. Такие датчики являются функциональными аналогами продукции многих зарубежных производителей и используются для замены аналогичных зарубежных образцов. Аналоговые датчики напряжения серии ПИН преобразуют:

- мгновенные значения измеряемого напряжения постоянного и переменного тока в пропорциональные значения силы постоянного и переменного тока;



Рис. 2. Внешний вид датчиков напряжения серии ПИН: а) для измерения малых, до 500 В напряжений; б) для измерения больших напряжений до 6000 В с внешним токозадающим резистором

- среднеквадратичное значение напряжения постоянного и переменного тока в пропорциональное значение силы постоянного тока, соответствующее требованиям к стандартному интерфейсу «токовая петля»;
- среднеквадратичное значение напряжения переменного тока в пропорциональное значение силы постоянного тока, соответствующее требованиям к стандартному интерфейсу «токовая петля 4/20 мА»;
- среднеквадратичное значение напряжения постоянного и переменного тока в пропорциональное значение силы постоянного тока, соответствующее требованиям к стандартному интерфейсу «токовая петля 4/20 мА», используя специализированные способы гальванической изоляции.

Одновременно широкое использование датчиков напряжения и эксплуатация в самых разных условиях выявили их узкие места и, соответственно, обусловили новые требования рынка к этим приборам.

Цифровая модель нового датчика напряжения

Наиболее существенными требованиями рынка к новому датчику являются, прежде всего, уменьшения габаритных размеров, массы и снижения энергопотребления датчиков. Действительно, на рис. 2 хорошо видно, что

для обеспечения широкого диапазона измерений датчика до 6000 В и обеспечения хорошего теплоотвода в его конструкции приходится использовать весьма объемистый и тяжелый радиатор. Подача измеряемого напряжения осуществляется через токозадающий резистор, который также приходится размещать либо внутри корпуса датчика, либо снаружи. Кроме того, в первичной цепи прибора, в которой используется магниточувствительный датчик Холла, имеются межвитковые емкости, что в сумме не позволяет снизить потери и свести к минимуму энергопотребление.

Чтобы устранить все вышеперечисленные недостатки, пришлось пересмотреть подход к конструированию датчика и качеству его начинки. Во главу угла было поставлено удобство использования такого прибора для потребителей. Многие из них привыкли к использованию аналогового датчика напряжения предыдущей серии, поэтому все посадочные места нового преобразователя напряжения ПНИ (рис. 3) остались прежними. Основные технические характеристики и функциональность сохранены, что позволяет сделать переход на новые датчики наиболее безболезненным.

Модульный принцип конструирования в новом датчике позволил скомпоновать все электронные компоненты на трех печатных платах, которые монтируются в корпус. Этот метод монтажа привел к снижению трудо-



Рис. 3. Внешний вид цифрового датчика серии ПНИ, для измерения действующего значения напряжения до 6000 В, созданного на платформе предыдущего датчика ПИН-3000-УА-Б1-М: габаритные размеры 179x78x50 мм, подача измеряемого напряжения непосредственно на вход датчика

емкости при сборке приборов. Кроме того, данный принцип сборки и сама электронная начинка делают относительно нечувствительными датчики к влиянию внешних магнитных полей по сравнению с ранее использовавшимися датчиками Холла. Электроника нового ПНИ позволяет обеспечить малое энергопотребление и сводит к минимуму потери в первичной цепи. Эти факторы чрезвычайно важны, поскольку исчезает необходимость в мощных резисторах и, как следствие, удается избавиться от громоздкого и тяжелого внешнего радиатора. При этом обеспечивается по-

вышенная до 0,7% точность измерений и хорошая температурная стабильность.

Таким образом, цифровой датчик стал легче своего аналогового предшественника на 25–30% при сохранении основных характеристик и высокого уровня надежности. Например, в отличие от аналоговых датчиков серии ПНИ, цифровой ПНИ отличается стабильной частотной характеристикой, линейной в диапазоне 0–14 кГц. Минимальная задержка сигнала, свойственная цифровым устройствам, является задержкой используемого цифрового фильтра. Малое потребление

при питании датчика ±24 В постоянного тока стало дополнительным преимуществом цифрового датчика.

Литература

- Новые серийные датчики тока и напряжения от российского производителя // Силовая электроника. 2023, № 6.
- Новые серийные датчики тока и напряжения в Госреестре СИ РФ // Информатизация и системы управления в промышленности. 2024, № 2.

Li-SOCl₂ элементы питания серии Direction от HCB Battery



Компания HCB Battery представила LiSOCl₂ — элементы питания серии Direction. Оптимизировав внутреннюю структуру углеродного катодного носителя для повышения эффективности

использования активных материалов, компания HCB Battery представила батареи ER26500D и ER34615D для интеллектуальных систем учета. В батареях используется конструкция круглого положительного электрода, который улучшает смачиваемость электролита углеродным катодом. Этот дизайн идеально подходит для интеллектуальных счётчиков воды NB-IoT, Lora с низкой частотой импульсов.

Характеристики батареи D-type:

- уникальная запатентованная технология конструкции катода и токосъемника;
- повышенная эффективность использования емкости при слабом токе;
- отсутствие потери емкости при горизонтальном или вертикальном положении;
- оптимально сочетается с конденсатором UPC, обеспечивая длительный срок службы и низкое потребление устройства;

- низкий среднегодовой уровень саморазряда — менее 0,7% при комнатной температуре;
- высокая безопасность, соответствует стандартам IEC 60086-4, EN 60079-11 и взрывозащищенности Т4

При разработке основное внимание уделялось применению литиевого элемента в батарейных сборках с ультраимпульсными ER+, значительному повышению эффективности использования производственных мощностей и увеличению срока службы.

Разрядная способность ER26500D по сравнению с другими марками при 4 мА, 23 ± 2 °C, напряжение отключения 2,0 В

Средняя емкость HCB превышает аналогичную у конкурентов на 452,5 мАч при вертикальном положении и на 397,5 мАч при горизонтальном положении.

<https://macrogroupt.ru/>



НПО «Горизонт Плюс»

РОССИЙСКИЙ РАЗРАБОТЧИК И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ

www.gorizont-plus.ru | sensor@gorizont-plus.ru | Тел. +7 (929) 924-87-89

КЛЕЩИ ТОКОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И ДАТЧИКИ

Клеммы высоковольтные КТ-1000-В

измеряют ток в цепях высокого напряжения, имеют ряд интеллектуальных функций. Поставляются в комплекте с сумкой для переноски и хранения.



Подсветка зоны измерения. Функция «Сон»

Датчики тока и напряжения

измеряют с гальванической развязкой любой вид тока до 25 000 А и напряжения до 6000 В. Монтируются непосредственно на токовую шину или в блок с помощью DIN-рейки.



Датчики внесены в Госреестр средств измерений РФ

Наименование	Номинальный измеряемый ток, А	Диаметр отверстия под токовую шину, мм	Основная приведенная погрешность, %, min	Рабочее напряжение, кВ	Габаритные размеры, мм
КТ-***-У-Д25	10–400	25	2,5	3	127x59x23
КТ-***-Д54	20–1000	54	0,6	3	224x106x41
КТ-1000-В	100–1000	54	1,0	10	785x435x70

SiC-модули в моторных приводах: картина в целом

После коммерческого успеха в различных областях применения, карбид кремния теперь способен конкурировать по стоимости на рынке промышленных электроприводов. Преимущества силовых SiC-модулей не ограничиваются только высокой эффективностью. Анализ двух типов электроприводов показывает, что экономия достигается по всем направлениям. Главное — взглянуть на картину в целом.

**Пол Дрексхейдж
(Paul Drexhage)¹**

**Карстен Шнайдер
(Carsten Schreiter)¹**

Перевод: Иван Сергеев

Силовые ключи на основе карбида кремния (SiC MOSFET) зарекомендовали себя как коммерчески выгодная альтернатива кремниевым IGBT в солнечной энергетике, системах хранения энергии, зарядных устройствах для электромобилей и другого электротранспорта с батарейным питанием. В этих областях силовой электроники повышение эффективности и уменьшение размеров фильтров компенсируют увеличение стоимости полупроводниковых материалов. С другой стороны, стандартные промышленные электроприводы требуют недорогих и надежных силовых ключей, параметры которых в меньшей степени влияют на общую производительность устройства. В настоящее время растущие мировые цены на электроэнергию и нормативные требования по уровням гармоник тока и выбросам CO₂ побуждают разработчиков к поиску более эффективных решений. Этот факт в сочетании с наличием серийных силовых SiC-модулей с нормированной стойкостью к короткому замыканию означает, что карбид кремния может найти свое ме-

сто в промышленном электроприводе. Анализ двух типов приводов позволяет оценить технические преимущества SiC в различных узлах схемы.

Сетевые преобразователи (низкий уровень гармоник/ рекуперативный привод)

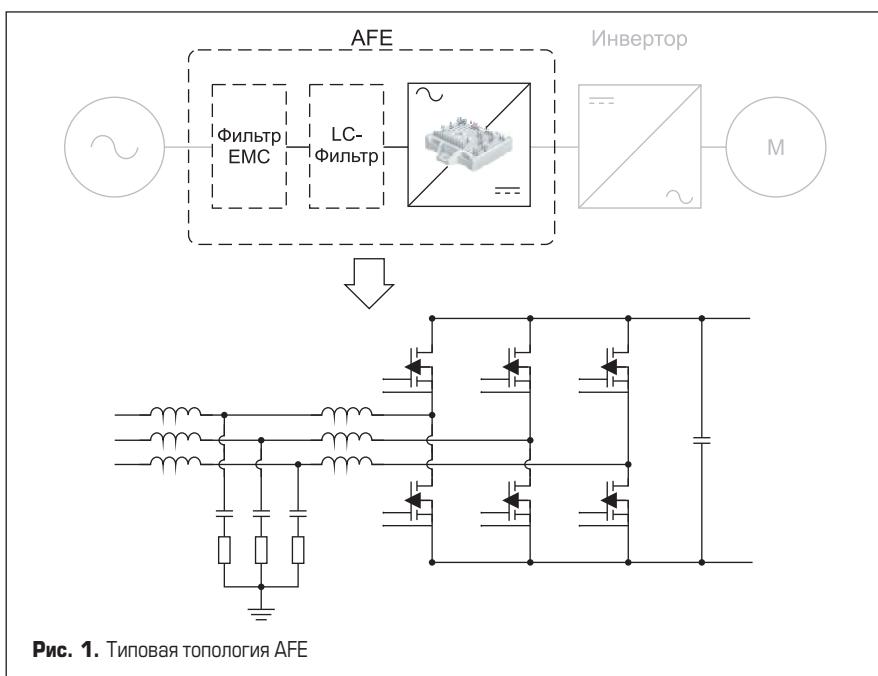
Современные высокопроизводительные приводы часто оснащаются активным выпрямителем AFE (Active Front End), использующим активные ключи (вместо диодов и тиристоров) в цепях, подключенных к питающей сети. Для этого есть две основные причины, одна из которых заключается в устраниении гармонического воздействия на сеть. Трехфазный активный мост может синхронизироваться с входной частотой и формировать в линии синусоидальные токи с коэффициентом мощности, близким к единице. Эта топология обеспечивает соответствие требованиям по гармоникам (например, IEEE 519 в США), а также улучшает использование питающей сети. Данная тема приобретает все большее значение в связи с продолжающейся электрификацией различных промышленных систем. Другая причина применения AFE — возможность возвращать энергию в сеть. Это полезно в приложениях, генерирующих энергию во время работы, которая в противном случае должна быть рассеяна, например, с помощью тормозного резистора. Примерами таких систем служат сервоприводы, краны, лифты, эскалаторы, конвейеры, динамометры и многое другое.

В простейших AFE обычно используются схемы, показанные на рис. 1. Здесь замена IGBT на SiC MOSFET с SiC-диодами Шоттки может дать множество преимуществ.

В ходе исследований изучалась схема AFE мощностью 20 кВт (27 л. с.) со следующими параметрами:

- $V_{DC} = 750$ В;
- напряжение питания: 400 В;
- ток питания: 30 А;
- $\cos \phi = 0,98$;
- частота сети: 50 Гц;
- частота коммутации F_{sw} : каскады Si = 5 кГц, каскады SiC = 20 кГц;

¹Semikron Danfoss.



- тепловое сопротивление $R_{th(s-a)} = 0,31 \text{ К/Вт}$;
- температура окружающей среды $T_a = +40^\circ\text{C}$. В качестве «референтного» используется IGBT (1200 В/50 А) последнего поколения (Gen. 7), который сравнивается с SiC MOSFET 1200 В с сопротивлением канала 18 мОм. Оба модуля имеют одинаковый миниатюрный корпус SEMITOP 1 (Semikron Danfoss). В процессе моделирования частота коммутации SiC увеличивается до тех пор, пока не будет достигнута температура кристалла T_j , аналогичная полученной при использовании Si IGBT.

Даже при четырехкратном повышении несущей частоты SiC-ключи демонстрируют на 34% меньшие суммарные потери. Это непосредственно влияет на размеры LCL-фильтра: увеличение рабочей частоты приводит к снижению номиналов индуктивностей и емкостей. Общий вес индукторов уменьшается почти вдвое, а объем — на 70%. Хотя стоимость силовых SiC-модулей выше, чем кремниевых, на уровне системы это компенсируется следующими факторами.

Улучшение массогабаритных показателей

- снижение массы и габаритов изделия;
- уменьшение объемов, необходимых для транспортировки, упаковки и складирования;
- упрощение монтажа.

Уменьшение потерь мощности

- энергосбережение, снижение расходов на энергию;
- упрощение системы охлаждения.

При более детальном рассмотрении вопроса преимущества карбида кремния не только уменьшают стоимость пассивных компонентов, в схемах AFE они также дают существенную экономию в течение всего срока службы изделия.

Выходной инвертор

Использование SiC-модулей в инверторной части привода, подключенной к двигателю, сопряжено с рядом проблем. Здесь, в отличие от примера с AFE, необходимо учитывать некоторые ограничения и ключевые требования:

- моторный инвертор должен выдерживать режим короткого замыкания (КЗ);
- крутизна фронтов напряжения (dv/dt) не должна превышать 5 кВ/мкс для исключения повреждения изоляции двигателя.

Частота переключения в приводном инверторе ограничивается на уровне, обеспечивающем приемлемый уровень потерь и исключающим возникновение чрезмерных токов утечки в выходных экранированных кабелях.

Устойчивость SiC MOSFET к режиму КЗ уже давно стала критической проблемой. Однако последние поколения карбидокремниевых приборов способны выдерживать короткое замыкание в течение нескольких микросекунд, что делает их приемлемым вариантом для использования в электроприводе.

Таблица. Результаты сравнительного моделирования режимов AFE

Тип модуля	Si IGBT SK50GD12T7ETE1	SiC MOSFET SK50MD120RM04ETE1	
Частота коммутации F_{sw} , кГц	5	20	x4
Потери AFE, Вт	фильтр: 463 конвертор: 247 общие: 710	фильтр: 291 конвертор: 175 общие: 466	-34%
Размеры LCL-фильтра, см ³	8225	2448	-70%
Вес LCL-фильтра, кг	19,4	10,2	-47%

В схеме привода на рис. 2 нет магнитных компонентов, которые можно было бы уменьшить за счет увеличения частоты переключения. Тем не менее и в этом случае применение SiC-приборов по-прежнему может обеспечить некоторые преимущества. Это проиллюстрировано на примере электропривода мощностью 15 кВт (20 л. с.) со следующими параметрами, типовыми для систем с переменным моментом вращения:

- $V_{DC} = 560 \text{ В}$
- выходное напряжение: 355 В;
- выходной ток: 26 А;
- $\cos \phi = 0,98$ (мотор с постоянными магнитами);
- частота выходного сигнала: 50 Гц;

- частота коммутации F_{sw} : каскады Si и SiC = 5 кГц (ограничено $dv/dt < 5 \text{ кВ/мкс}$);
- тепловое сопротивление $R_{th(s-a)} = 0,31 \text{ К/Вт}$;
- температура окружающей среды $T_a = +50^\circ\text{C}$.

Здесь в качестве «референтного» используется IGBT (1200 В/35 А) последнего поколения (Gen. 7), который сравнивается с SiC MOSFET 1200 В с сопротивлением канала 18 мОм. Это прибор 4-го поколения от ROHM Semiconductor, обладающий нормированным временем КЗ 2 мкс ($V_G = 18 \text{ В}$, $T_j = +150^\circ\text{C}$, $V_{DC} = 720 \text{ В}$). В обоих случаях были выбраны внешние затворные резисторы R_G , ограничивающие значение dv/dt на уровне 5 кВ/мкс.

В данном случае рассматривается центробежный насос с квадратичной характеристи-

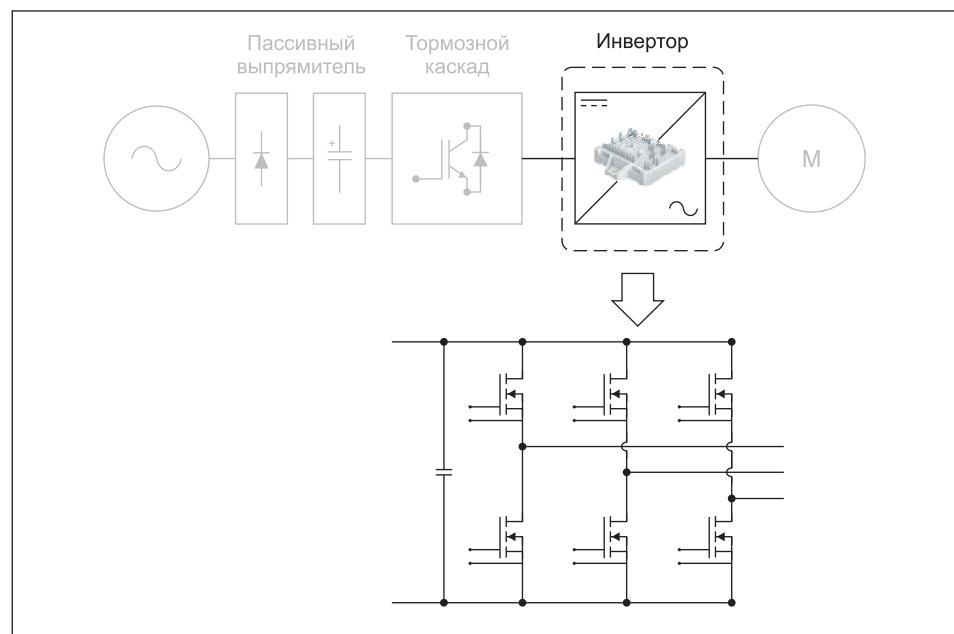


Рис. 2. Моторный привод с пассивным выпрямителем

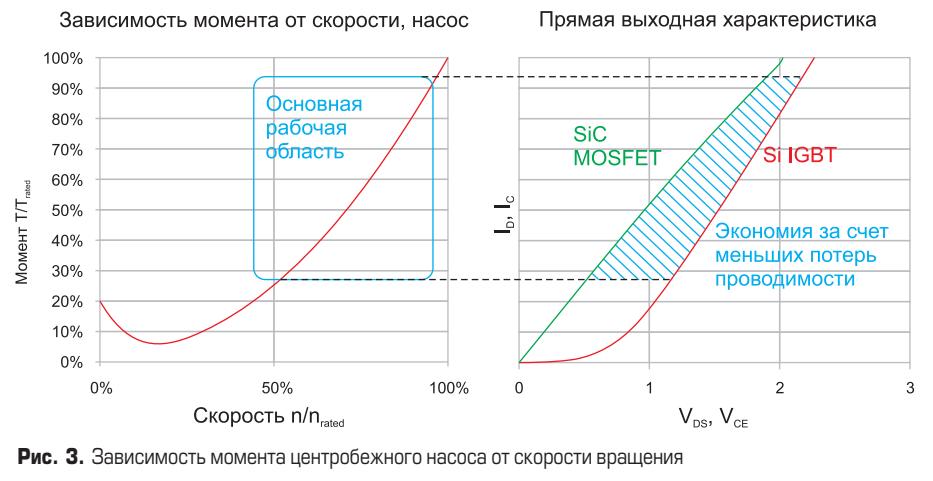


Рис. 3. Зависимость момента центробежного насоса от скорости вращения

кой момента, показанной на рис. 3. Такие насосы работают в основном в диапазоне оборотов 40–80%. Эта область соответствует диапазону токов, в котором SiC MOSFET имеет меньшие потери проводимости, чем Si IGBT. Поскольку скорость коммутации MOSFET снижена до 5 кВ/мкс, выигрыш в потерях переключения карбидокремниевого ключа

по сравнению с IGBT невелик. Однако благодаря линейной (зеленая кривая на рис. 3) прямой характеристике SiC MOSFET демонстрирует меньшие потери проводимости.

Потери и КПД привода мощностью 15 кВт (включая диодный выпрямитель, конденсаторы DC-шины, инвертор) показаны на рис. 4 для Si IGBT (серая кривая) и SiC MOSFET (красная кривая).

Представленные результаты показывают явное преимущество SiC по суммарным потерям во всем диапазоне рабочих скоростей вращения. Потери в схеме с карбидокремниевыми ключами на 7% меньше, чем в версии с Si IGBT на малой скорости, и на 22% меньше на полной скорости. Это соответствует увеличению общей эффективности на 0,6 и на 0,5% соответственно. Полученные значения позволяют определить реальную экономию, если учесть время эксплуатации привода в разных рабочих режимах. Оценка годовой нагрузки, приведенная на рис. 5, основана на типовом профиле применения привода промышленного насоса. Анализ потерь в каждой рабочей точке позволяет рассчитать общие потери энергии в приводе в течение года.

В течение одного года привод с SiC-приборами потребляет 377 кВт·ч энергии, в то время как привод на базе кремниевых ключей — 651 кВт·ч. Снижение энергопотребления на 42% имеет реальные экологические и финансовые последствия. Выбросы парниковых газов сокращаются на 125 кг CO₂ в год². За счет этого большая стоимость привода с карбидокремниевыми модулями компенсируется за год в такой стране, как Германия (0,20 евро/кВт·ч в 2023 году), или менее чем за три года в такой стране, как США, где затраты на электроэнергию значительно ниже.

И, наконец, использование карбида кремния дает физические преимущества, так как позволяет делать приводы заданной мощности в меньших габаритах. Расчеты показали, что снижение потерь инвертора за счет применения SiC-ключей позволяет уменьшить размеры радиатора до 71% без повышения температуры. Для промышленных приводов это означает, что можно снизить эффективность охлаждения и количество вентиляторов. Кроме того, корпуса и шкафы, в которых размещаются приводы, будут меньше и легче, что сокращает затраты на материалы, логистику и монтаж. Справедливо и обратное: при сохранении того же теплового режима выходная мощность данного типоразмера привода может быть увеличена до 25%.

Силовые SiC-модули

Почти все ведущие мировые производители предлагают силовые SiC-приборы в стандартных топологиях и корпусах, например, на рис. 6 показаны карбидокремниевые модули Danfoss-Semikron. В них используются чипы последних поколений с нормированным временем короткого замыкания и возможностью управления от однополярного сигнала. Многие из этих компонентов совместимы с существующими кремниевыми приборами по корпусам, топологии схем и расположению выводов, однако надо иметь в виду, что управление затворами SiC имеет свои особенности, что требует адаптации характеристик драйверов.

Заключение: взгляд в будущее

Оба примера дают представление о новых возможностях, которые получают производители и пользователи приводов при переходе на карбидокремниевые приборы. В специальных применениях, таких как системы управления высокоскоростными двигателями, используемыми в турбокомпрессорах, SiC-ключи предоставляют дополнительные преимущества.

Очевидно, что сравнение затрат не имеет смысла, если оно проводится на уровне модулей. Для корректного сопоставления различных решений следует использовать системный подход, учитывающий особенности всей системы привода и общую стоимость владения. В этом случае SiC-приборы в некоторых случаях обеспечивают очевидные преимущества, которые перевешивают более высокую стоимость самих модулей.

По материалам сайта www.semikron-danfoss.com

¹Источник: global mix, 2023.

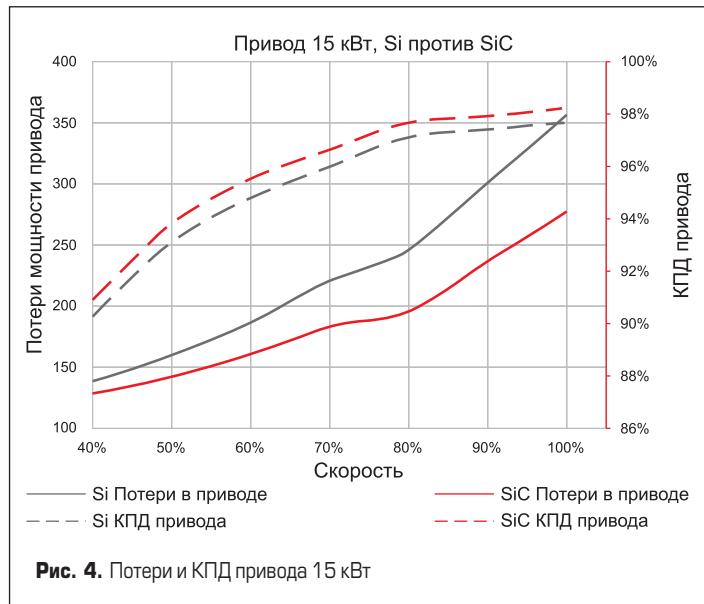


Рис. 4. Потери и КПД привода 15 кВт



Рис. 5. Привод насоса, среднегодовое распределение нагрузки

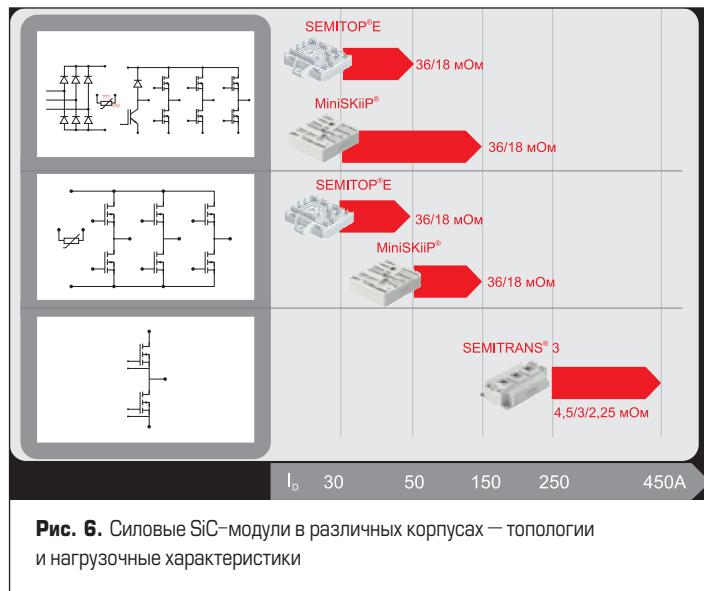


Рис. 6. Силовые SiC-модули в различных корпусах — топологии и нагрузочные характеристики

ANPC-конвертор

в эффективных системах хранения энергии

Без достаточного объема накопителей энергии (ESS — Energy Storage Systems) переход на возобновляемые источники не обеспечит устойчивую работу энергетической системы. Системы аккумуляторного хранения энергии (BESS — Battery Energy Storage Systems) — это реальная возможность для развития сектора альтернативной энергетики. Удвоение числа новых установок ESS по всему миру в 2022–2023 годах изменило подход к разработке преобразователей энергии для систем коммунального назначения. При надлежащем проектировании полупроводниковых приборов эффективность систем хранения энергии может превысить 99%.

Пол Дрексэйдж
(Paul Drexhage)¹

Перевод:
Евгений Карташев

Переход к возобновляемой энергетике требует применения накопителей для обеспечения непрерывной и надежной подачи энергии в сеть. Массовый рост числа установок BESS обусловлен реализацией государственных проектов в области возобновляемых источников энергии, в рамках которых системы накопления должны размещаться совместно с системами генерации. Кроме того, достижения в области аккумуляторных технологий позволили увеличить удельную мощность контейнеров BESS, что делает возможным их установку на ограниченной площади.

Возможности BESS в стабилизации электрических сетей еще предстоит использовать в полной мере. Батарейные системы хранения обеспечивают снижение пиковых нагрузок, перераспределение нагрузки и резервное питание за счет интеграции в такие приложения, как центры обработки данных. Потенциал этих приложений настолько велик, что Международное энергетическое агентство (IEA) прогнозирует рост совокупного мирового объема аккумуляторных установок общего назначения с 54 ГВт в 2023 году более чем до 500 ГВт к 2030 году.

Дизайн BESS

В системах BESS переменного тока коммунального назначения традиционно реализуется принцип работы с центральным инвертором, получающим питание от батареи, такой же, как в солнечных энергетических станциях (рис. 1). Система преобразования мощности (PCS — power conversion system) состоит из двунаправленного двухуровневого ($V_{DC} = 1000$ В) или трехуровневого ($V_{DC} = 1500$ В) преобразователя напряжения мегаваттной мощности. Такое устройство, размещенное в 20-футовом контейнере, признано экономически эффективным, поскольку в нем используются существующие конструкции

инверторов от уже разработанного (и совместно внешненного) солнечного оборудования. Однако опыт показал, что обслуживание данной конфигурации связано с рядом проблем, поскольку единичный сбой в инверторе может привести к отказу всей системы в целом. Кроме того, растущее разнообразие локаций BESS означает, что требуется более точная детализация размеров аккумуляторных батарей.

В настоящее время для решения этих проблем используют модульный подход к построению PCS (рис. 2). Систему размещают в том же 20-футовом контейнере, но каждая батарея работает с отдельным инвертором. Это повышает удобство обслуживания, поскольку при отказе PCS отключается только один блок аккумуляторов. Кроме того, модульный принцип позволяет изменять номинальную мощность системы с шагом в «одну батарею», не беспокоясь

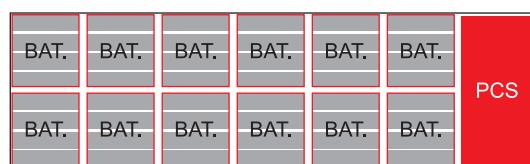


Рис. 1. Контейнер BESS с центральным инвертором

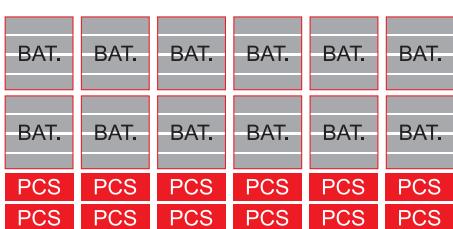


Рис. 2. Контейнер BESS с модульным PCS.

¹Semikron Danfoss.

о том, что мощность инвертора будет избыточной для данного применения.

Достижения в области аккумуляторных технологий влияют на размеры PCS. Литий-ионные аккумуляторы (Li-ion) остаются преобладающими, однако постоянно совершенствуются материалы, электролиты и технологии производства. Новые типы Li-ion-батарей, такие как LFP (литий-железо-фосфат) без кобальта, обеспечивают энергетические показатели до 5 МВт·ч в 20-футовом контейнере. Благодаря недавним усовершенствованиям в ближайшие несколько лет эта величина достигнет 6 МВт·ч и более.

Хотя энергетическая ёмкость BESS имеет постоянное значение (например, 6 МВт·ч), номинальная мощность системы заряда/разряда, как правило, ниже. Она соответствует уровню, при котором вся система может быть мгновенно разряжена, начиная со 100%-го заряда. Дробное значение, маркируемое как Р или С, определяет эту скорость и, следовательно, номинальную мощность PCS.

Например, скорость заряда/разряда «0,5С» означает, что PCS конвертор с BESS 6 МВт·ч должен быть рассчитан на непрерывную работу на нагрузку 3 МВт. В системе с 12 блоками, показанной на рис. 2, требуется номинальная мощность примерно 250 кВт на один

конвертор. С учетом того, что современные PCS должны помещаться в стандартной стойке шириной 19 дюймов, становится ясно, что плотность мощности становится определяющим фактором при проектировании силового конвертора. Кроме того, к схеме PCS предъявляются следующие основные требования:

- возможность работы с напряжением DC-шины до 1500 В;
- высокая эффективность в режиме заряда ($\text{PF} = -1$) и разряда ($\text{PF} = 1$);
- высокая плотность мощности (при жидкостном охлаждении);
- работа в условиях непрерывно повторяющихся циклов заряд/разряд.

Дизайн PCS

На сегодня наиболее эффективной топологией, удовлетворяющей современным требованиям по эффективности, является трехуровневый преобразователь с активной фиксированной нейтралью (ANPC). Конфигурация 3L ANPC позволяет работать с напряжением на DC-шине до 1500 В, при этом в схеме используются полупроводниковые приборы на 1200 В, имеющие низкие потери. Схема ANPC (в отличие от NPC) обеспечивает одинаково высокую эффективность как при заряде аккумулятора ($\text{PF} = -1$), так и при его разряде ($\text{PF} = 1$).

В миниатюрном силовом модуле (рис. 3, размер корпуса 57×63 мм), монтируемом на печатную плату, шесть ключей формируют фазную стойку ANPC. Такой корпус имеет высокое монтажное давление на радиатор, что гарантирует низкое тепловое сопротивление $R_{\text{th(j-s)}}$ по сравнению со стандартными промышленными модулями. Конструктив без базовой платы дает дополнительные преимущества при использовании радиатора с жидкостным охлаждением, благодаря минимальному количеству тепловых переходов между чипами и охлаждающей жидкостью. Отсутствие базы и соединительного слоя припоя повышает устойчивость к тепловым стрессам, возникающим при каждом цикле заряда и разряда.

Поскольку алгоритм управления конвертором ANPC сильно влияет на потери в отдельных ключах, силовой модуль должен быть спроектирован с использованием чипов, оптимизированных как по потерям проводимости, так и потерям переключения. Конструкция модуля ANPC с номинальным током 150 А (рис. 3) оптимизирована для работы на низких

и высоких частотах (НЧ/ВЧ). Четыре ключа, обозначенные T1, T5, T6 и T4, представляют собой мощные IGBT 7-го поколения. Они отличаются низкими потерями проводимости, поскольку они коммутируются на частоте сети. Два ключа T2 и T3 представляют собой транзисторы последнего поколения основе карбида кремния (SiC MOSFET). Они работают на высокой несущей частоте, соответственно, должны иметь низкие потери переключения. Такой гибридный подход позволяет оптимизировать режимы работы инвертора на низких и высоких частотах при сохранении приемлемой общей стоимости модуля.

Технические характеристики перспективных модульных конверторов, устанавливаемых в контейнерах мегаваттного класса, приведены в таблице 1. Они были использованы в качестве основы для теплового моделирования PCS на основе миниатюрных модулей SEMITOP E2.

Для того чтобы обеспечить требуемую выходную мощность и необходимое количество циклов заряда/разряда при сохранении высокой эффективности, в каждой из трех фазных стоек используются два SK150AMLI120CR03TE2 в параллель. Они размещены на радиаторе с жидкостным охлаждением (рис. 4) с общим значением теплового сопротивления $R_{\text{th(s-a)}}$ 0,0146 К/Вт. Площадь, занимаемая шестью модулями, составляет 400×58 мм. Моделирование (рис. 5) показывает, что эффективность преобразования выше 99% достигается в диапазоне частот переключения 10–20 кГц как при заряде, так и при разряде.

Модульный PCS для широкого применения

Проектирование полноценного PCS требует понимания алгоритмов управления трехуровневым преобразователем мощности, а также наличия других системных и прикладных знаний, позволяющих обеспечить правильное взаимодействие конвертора со всей системой BESS. Здесь большую помочь могут оказывать специалисты по силовой электронике, имеющие опыт работы с возобновляемыми источниками энергии.

Компания Headspring разрабатывает программное обеспечение для управления силовыми модулями конвертора ANPC с помощью своего высокоскоростного контроллера, работающего в режиме реального времени. Он должен быть интегрирован с системой управления батареями BESS (BMS — battery management system), также обеспечивающей совместимые с кодом функции сетевого под-

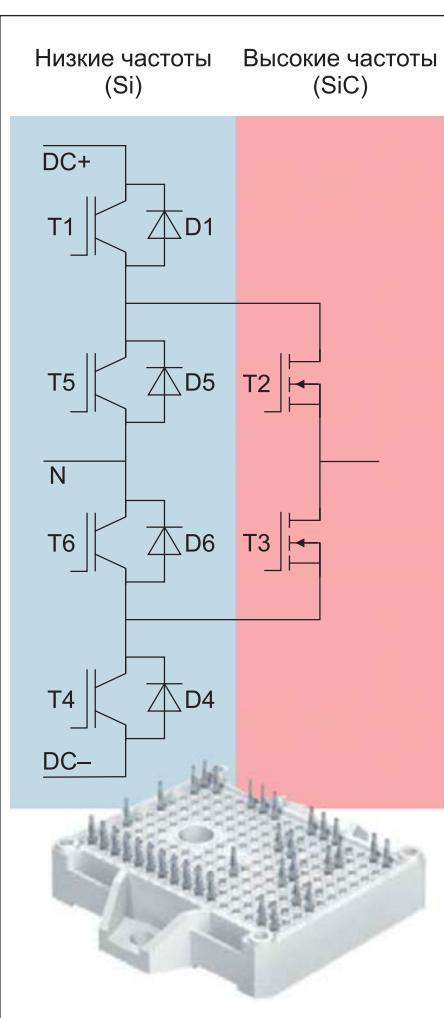


Рис. 3. Схема и корпус миниатюрного модуля SEMITOP E2 (например, SK150AMLI120CR03TE2)

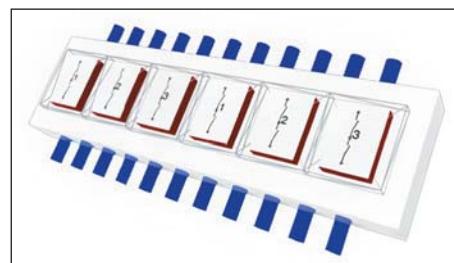


Рис. 4. Шесть модулей SEMITOP E2 (два в параллель на фазу) на радиаторе с жидкостным охлаждением

Таблица 1. Технические требования к модульным PCS нового поколения

Параметр	Значение
V_{DC} , В	1500
V_{AC} , В	690
I_{AC} , А	209
Частота сети, Гц	50
Мощность, кВт	250
Режим охлаждения	Жидкостный, $T_{\text{cool}} = +50$ °C

Выходная мощность ANPC инвертора при $T_j = +125^{\circ}\text{C}$

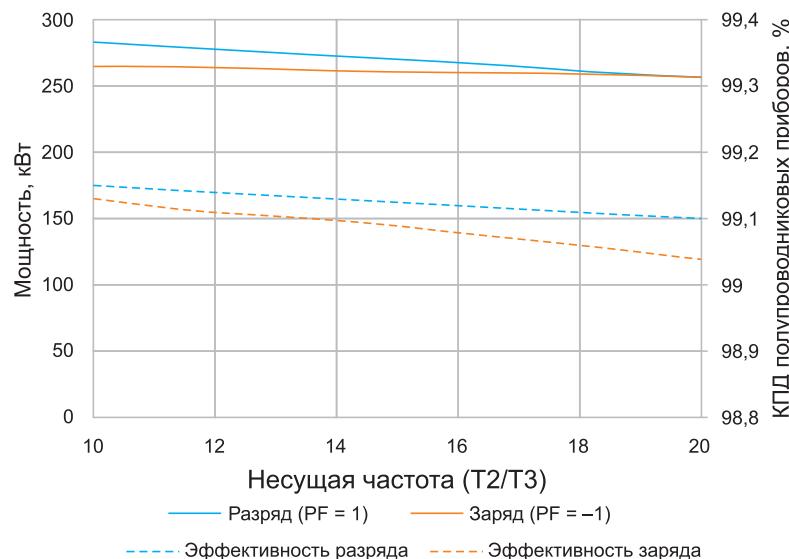


Рис. 5. Выходная мощность и эффективность инвертора ANPC (учтены только потери полупроводниковых приборов).

ключения. Доступна опция автономного режима, позволяющая BESS функционировать в качестве надежного резервного источника питания во время перебоев в электросети.

Каждый модуль PCS имеет собственный контроллер, предназначенный для интеграции с другими PCS, подключенными параллельно. Это обеспечивает масштабируемость, необходимую для управления контейнером BESS, а также гарантирует бесперебойную работу системы при отказах отдельных конверторов.

Заключение

Современные требования к работе различных батарейных систем и технологии аккумуляторных батарей меняют подход к разработке мощных BESS. В настоящее время модульный блок PCS с топологией ANPC является оптимальным решением для создания подобных систем. Эта задача упрощается благодаря широкому выбору специализированных силовых модулей, имеющих конфигурацию 3L ANPC.

По материалам сайта
www.semikron-danfoss.com

Сабмаунты из нитрида алюминия и карбида кремния от Dogain Optoelectronic

Компания Dogain Optoelectronic анонсировала начало продаж сабмаунтов из нитрида алюминия и карбида кремния.

Сабмаунты обладают высокой теплопроводностью — более 370 Вт/м·К, что обеспечивает эффективный отвод тепла, продлевает срок службы устройств и качество выходного оптического сигнала. Готовый припой и точно подобранный коэффициент теплового расширения позволяют легко интегри-

ровать сабмаунты с лазерными диодами, минимизируя риск механических повреждений при изменениях температуры. Высокое значение изоляции гарантирует надежность работы, что особенно важно в высокоточных приложениях.

Такие инновационные компоненты помогут значительно улучшить производительность и стабильность систем, использующих лазерные технологии.

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

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>

Модульный источник импульсного тока 100 кА

с программируемой формой импульсов

Часто упоминаемый интегральный показатель I^2t описывает способность силового полупроводника выдерживать резкие перегрузки по току, однако при этом обычно не учитывается зависимость от формы импульса. В статье дается краткое описание генератора импульсного тока с регулируемой формой сигнала и сверхнизким уровнем пульсаций тока, позволяющего проводить широкий спектр испытаний.

**Стеван Веттенгель
(Stefan Wettengel)¹**

**Андреас Хоффманн
(Andreas Hoffmann)**

**Йонас Кинаст
(Jonas Kienast)**

**Ларс Линденмюллер
(Lars Lindenmüller)**

**Штеффен Бернет
(Steffen Bernet)**

Перевод: Иван Сергеев

Введение

Способность выдерживать токовые перегрузки является важной характеристикой силовых полупроводниковых приборов, благодаря которой можно оценить их надежность в аварийных ситуациях. Устойчивость силовых ключей к резким скачкам тока определяется величиной максимального тока перегрузки I_{TSM} и характеристикой I^2t . Оба параметра определяются для полусинусоидального импульса длительностью $T_p = 10$ мс [2]. Однако это определение не учитывает форму токового сигнала или режим, когда на полупроводник воздействует пачка импульсов перегрузки.

Для проведения экспериментов в большом спектре применений требуется широкий диапазон амплитуд, длительностей импульсов и форм сигналов. Хорошо известные стандартные решения с использованием пассивных компонентов (например, резонансных схем или цепей разряда конденсаторов), не отвечают этим требованиям, поскольку они могут формировать только фикси-

рованные формы сигналов тока с частотами и постоянными временеми, зависящими от параметров пассивных компонентов.

Существуют альтернативные решения с активными ключами, но у них есть свои недостатки. Один из примеров, представленных в [3], основан на параллельном соединении массива MOSFET-транзисторов, используемых в качестве аналоговых усилителей, обеспечивает программируемую форму сигнала тока. Однако такая схема генерирует очень высокие потери, что ограничивает длительность импульсов и частоту их повторения.

Конструкция генератора импульсного тока

Требования к источнику импульсного тока, представленного в статье, включают программируемую форму сигнала тока с амплитудой, превышающей максимальные пиковые токи типичного тиристора, которые могут составлять 90 кА и более [4]. Чтобы потенциально реализовать последова-

Таблица. Основные параметры генератора импульсного тока

Параметр	Диапазон	Примечание
Напряжение DC-шины, V_{DC_max}	1200 В	Низковольтный диапазон (< 1500 VDC)
V_{CE} IGBT	1700 В	Низковольтный IGBT
Макс. запасенная энергия ΣW_C	104 кДж	–
Макс. ток I_{pk}	100 кА	–
Макс. уровень пульсаций	60 А	Эквивалентно 0,06% (от 100 кА)
Макс. время нарастания тока T_r	380 мкс	Ограничено контроллером
Макс. скорость нарастания $di_{DUT/dt}$	768 А/мкс	Ограничено аппаратно
	263 А/мкс	Определяется T_r (при 100 кА)
Ширина импульса T_p	$\geq 1 \dots \geq 100$ мс	Мин./Макс. значение, зависит от формы сигнала, тока и DUT

¹Технический университет Дрездена, кафедра силовой электроники.

тельность импульсов с периодами, соответствующими параметрами сети, длительность импульсов должна составлять несколько десятков мс. Дополнительные требования предусматривают высокую точность и низкий уровень пульсаций тока в тестируемом устройстве (DUT).

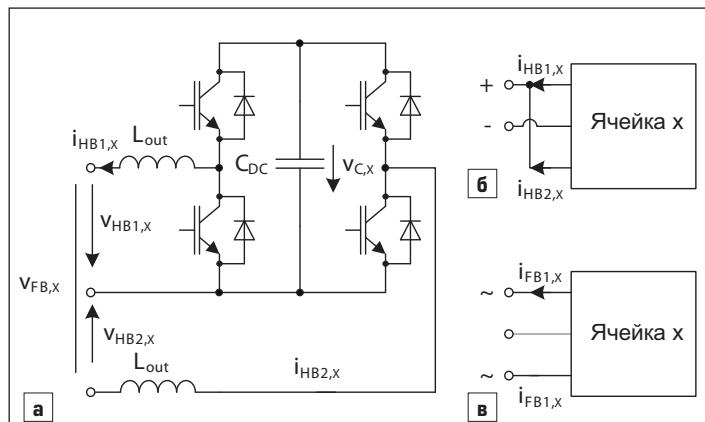


Рис. 1. а) Электрическая схема ячейки генератора импульсного тока; возможные варианты конфигурации: б) HCM; в) или DCM [1]

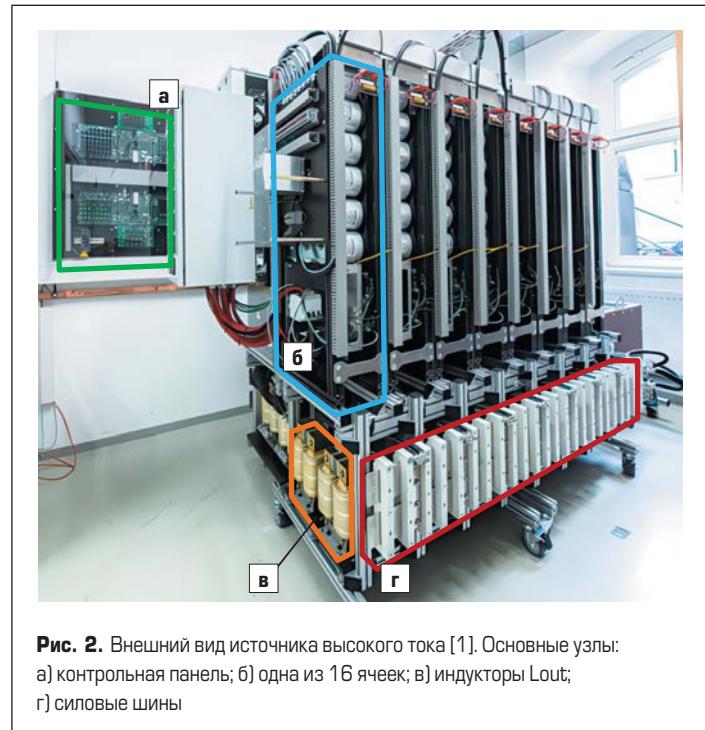


Рис. 2. Внешний вид источника высокого тока [1]. Основные узлы: а) контрольная панель; б) одна из 16 ячеек; в) индукторы L_{out} ; г) силовые шины

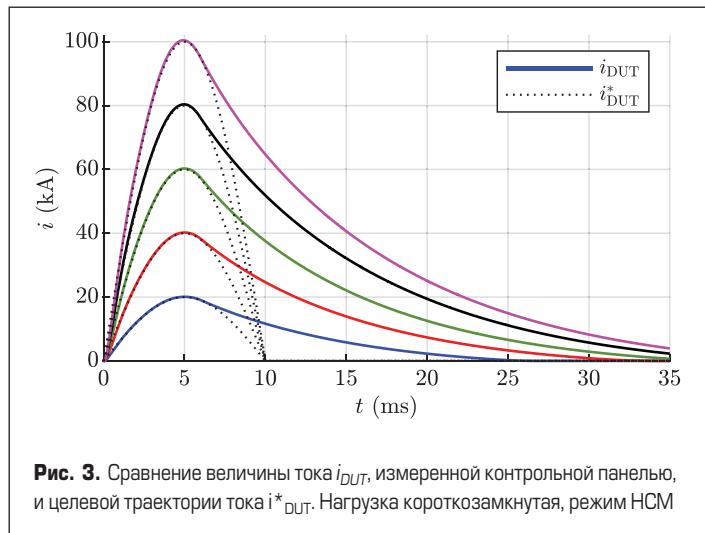


Рис. 3. Сравнение величины тока i_{DUT} , измеренной контрольной панелью, и целевой траектории тока i^*_{DUT} . Нагрузка короткозамкнутая, режим HCM

В таблице приведены основные параметры генератора импульсов. Для решения задачи был выбран модульный подход: источник тока состоит из 16 ячеек, каждая из которых содержит два полумостовых IGBT-модуля, конденсатор DC-шины $C_{DC} = 9 \text{ мкФ}$ и выходную катушку индуктивности $L_{out} = 50 \text{ мГн}$ на каждый полумост. Структура блока, а также его возможные выходные конфигурации показаны на рис. 1. Ячейки могут использоваться как два независимых полумоста в режиме высокого тока (HCM) или как один H-мост в режиме динамического тока (DCM).

Внешний вид устройства показан на рис. 2. Конструктивно источник тока разделен на две половины, по восемь ячеек в каждой. Для ограничения магнитной силы полный ток проходит только через сам испытуемый модуль (DUT). Медные шины, соединяющие восемь ячеек с каждой стороны с DUT, пропускают лишь половину тока, уменьшая тем самым возникающие магнитные силы в 4 раза. Шины с каждой стороны соединены между собой изолирующими зажимами, чтобы противостоять остаточным магнитным полям.

Панель управления (рис. 2a), отвечает за связь с управляемым компьютером оператора, она также формирует алгоритмы управления. Панель обрабатывает множество сигналов, включающих измерения по силовым параметрам: 32 отсчета тока и 16 отсчетов напряжения в звене постоянного тока; управляющим сигналам: 32 отсчета разрешения, 32 отсчета ШИМ, 32 отсчета по обратной связи по GDU, а также по вспомогательным сигналам: два отсчета обнаружения дугового разряда, отсчета отсчета по реле разряда, 16 отсчетов по «дельта-сигма» тактовым импульсам. Полумостовые каскады переключаются в режиме интерлифинга (чередование фаз) с эффективной частотой коммутации и управления 96 кГц. Все сигналы передаются по волоконно-оптическим линиям.

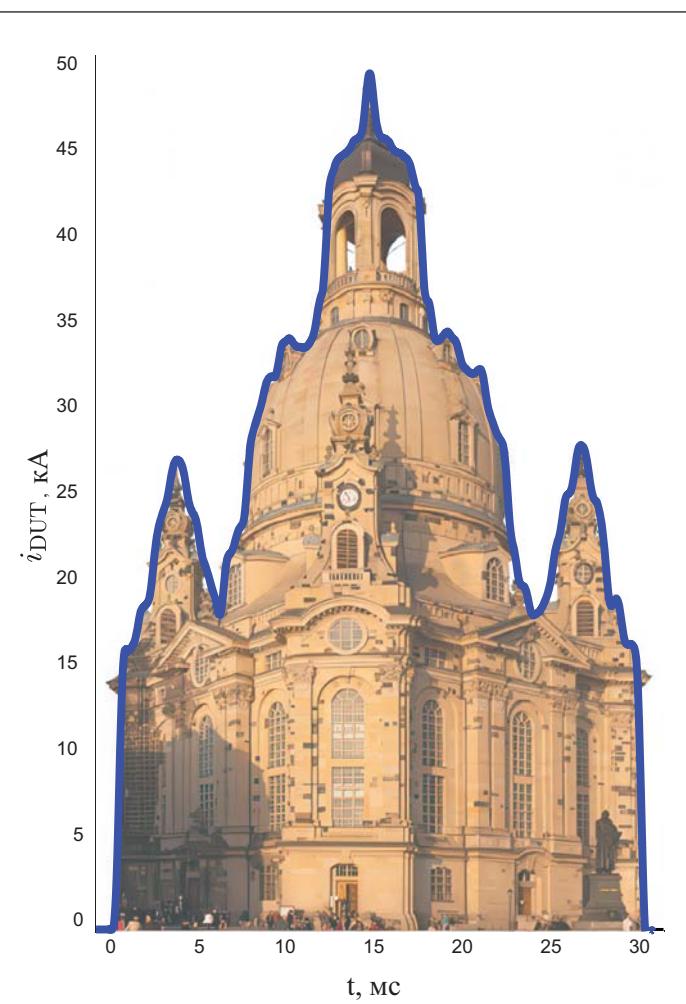


Рис. 4. Пример динамической формы токового импульса: кривая тока i_{DUT} повторяет профиль церкви Фрауэнкирхе [1,5]. Нагрузка – тиристор, режим DCM

Экспериментальные результаты

Эффективность генератора импульсного тока оценивалась в ходе множества практических экспериментов в обоих режимах (HCM и DCM). Два примера приведены в статье: на рис. 3 дано сравнение полусинусоидальных импульсов тока с различной амплитудой, реализованных в режиме HCM. Поскольку ячейки для HCM имеют полумостовую конфигурацию, скорость спада тока определяется только потерями в системе. В режиме DCM ячейки сконфигурированы как Н-мосты, что обеспечивает отрицательное выходное напряжение и, следовательно, контролируемое отрицательное значение di_{DUT}/dt . В качестве примера на рис. 4 показана форма волны, напоминающая очертания церкви Фрауэнкирхе в Дрездене.

Заключение

В статье представлено краткое описание разработанного авторами программируемого модульного генератора импульсных токов. Описаны основные принципы и возможности устройства, приведены

результаты экспериментальных проверок. Дополнительную информацию можно получить в публикации «Топология, конструкция и характеристики модульного динамического источника импульсного тока мощностью 100 кА с регулируемой формой импульса» [1].

Литература

1. Wettengel S., Hoffmann A., Kienast J., Lindenmüller L., BernetS. Topology, Design and Characteristics of a Modular, Dynamic 100 kA Surge Current Source with Adjustable Current Shape // IEEE Open Journal of Industry Applications. 2024. January.
2. Case Non-rupture Current Ratings. Dynex Semiconductor Ltd., 2014.
3. Verevkin V., Ivanov D., Kostusyak V., Sytyi A., Semenov P., Alymov D. A Next-Generation Surge Current Tester // Bodo's Power Systems. 2020. August.
4. Phase Control Thyristor: 5STP 48Y7200. ABB Ltd, October 2016.
5. Wellniak J. Dresden, Frauenkirche, Panorama. www.commonswikimedia.org/w/index.php?title=File:Dresden,_Frauenkirche,_Panorama.jpg&oldid=461456248 September 2022.

Ультратонкая DIN-серия источников питания для суровых условий эксплуатации от MEAN WELL



Компания MEAN WELL представляет новую XDR-E ультратонкую DIN-серию источников питания для суровых условий эксплуатации. Серия

XDR-E является продолжением популярных SDR, NDR, EDR DIN-серий в металлических корпусах мощностью 75–960 Вт.

Металлические DIN источники питания XDR-E серии, как и их предшественники SDR, NDR, EDR-серий, не имеют в конструкции вентилятора охлаждения, что обеспечивает отсутствие акустического шума. При конвекции воздуха без вентилятора конструкция XDR-E серии повышает общую надежность системы электропитания и исключает затраты и неудобства, связанные с периодическим обслуживанием, в особенности в запыленных помещениях.

Серия XDR-E обеспечивает холодный старт и надежную работу в диапазоне рабочих температур от -40 ...+ 70 °C, что существенно расширяет географию применения этих источников питания в нашей стране. Все источники питания данной серии имеют ультратонкие корпуса от 31 мм для моделей мощностью 75 Вт до 96 мм для моделей мощностью 960 Вт, что позволяет достичь большей энергоемкости, и как следствие, большей эффективности использования пространства во всех типах телеком, индустриальных и системных устройствах безопасности и автоматизации, в которых есть габаритные ограничения внутреннего пространства.

www.transport-light.ru



TransportLight

Реклама 12+

РОССИЙСКАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

светотехнические решения для
транспорта и транспортной
инфраструктуры

28-30 АПРЕЛЯ 2025
МОСКВА, ЭКСПОЦЕНТР

Проводится в рамках Российской
недели общественного транспорта
и городской мобильности

www.publictransportweek.ru

реклама

Повышающий преобразователь постоянного тока

в непрерывном режиме проводимости тока

В статье на примере наиболее распространенного повышающего преобразователя постоянного тока анализируется режим непрерывного тока. Получены соответствующие выражения, с помощью которых можно определить границы режимов непрерывного и прерывистого режимов проводимости. Также даются соответствующие рекомендации по организации системы управления для снижения высоких гармоник во входном токе выпрямителя.

Норик Петросян,
д. т. н., профессор

v-khotanan@yandex.ru

Паргев Манукян,
к. т. н., доцент¹

pargev.manukyan@gmail.com

Повышающий преобразователь, как и ряд других преобразователей, можно контролировать таким образом, чтобы получить выпрямительную систему, близкую к идеальной. Это достигается путем управления высокочастотным импульсным преобразователем, благодаря чему форма волны переменного тока в сети соответствует приложенному входному напряжению сети. С использованием ШИМ-технологии можно построить как однофазные, так и многофазные выпрямители. Типичная система электропитания постоянного тока, питаемая от сети переменного тока, содержит три основных элемента обработки электроэнергии. Во-первых, высокочастотный преобразователь с широкополосным регулятором входного тока выполняет функцию идеального выпрямителя. Во-вторых, конденсатор для хранения энергии слаживает пульсирующую мощность, потребляемую нагрузкой. Наконец, преобразователь постоянного тока с контроллером заставляет среднюю входную мощность следовать за мощностью, потребляемой нагрузкой [1, 2].

¹ Армянский национальный политехнический университет.

Рассмотрим наиболее распространенную систему электропитания на основе повышающего преобразователя, работающего в режиме непрерывной проводимости тока (НПТ), которая показана на рис. 1. В идеале повышающий преобразователь может обеспечить любой коэффициент преобразования от единицы до бесконечности. Следовательно, повышающий преобразователь может обеспечить коэффициент регулирования $M(d(t))$ вида [2–4]:

$$M(d(t)) = \frac{v(t)}{v_g(t)} = \frac{V}{V_M |\sin(\omega t)|}, \quad (1)$$

где $v_g(t) = V_M |\sin(\omega t)|$ — выходное напряжение выпрямителя (входное напряжение импульсного регулятора постоянного тока); $v(t) = V$ — выходное постоянное напряжение преобразователя.

Считается, что $V \geq V_M$. Повышающий преобразователь при лучшем использовании силовых ключевых элементов может обеспечивать очень низкий

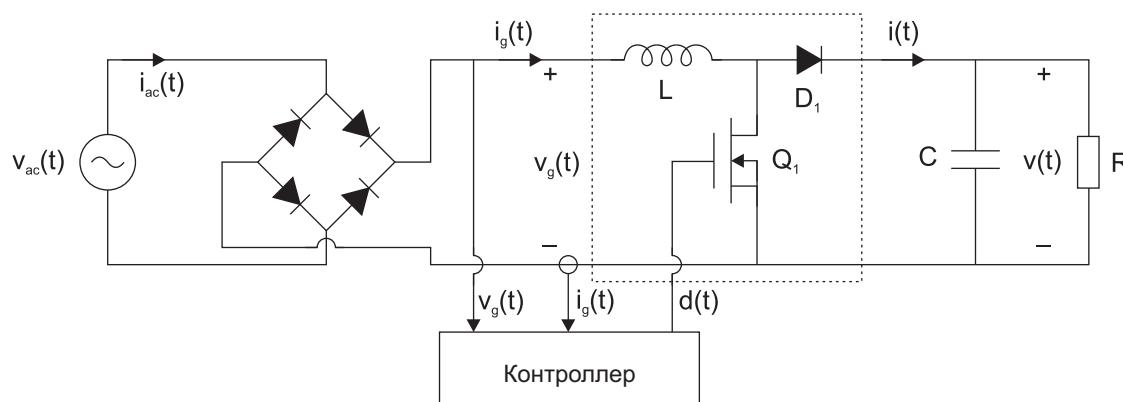


Рис. 1. Схема повышающего преобразователя с входным выпрямителем

коэффициент нелинейных искажений по сравнению другими видами преобразования [3, 4].

Если повышающий преобразователь работает в режиме непрерывной проводимости, а катушка индуктивности достаточно мала, чтобы ее влияние на низкочастотные составляющие формы сигнала преобразователя было незначительным, то коэффициент заполнения должен соответствовать выражению $M(d(t)) = 1/(1 - d(t))$. Это означает, что коэффициент заполнения должен подчиняться функции:

$$d(t) = 1 - \frac{v_g(t)}{V}. \quad (2)$$

Это выражение справедливо только в режиме НПТ. Работа повышающего преобразователя в режиме непрерывной проводимости возможна при условии, что ток дросселя в пульсациях:

$$\Delta i_g(t) = \frac{v_g(t)d(t)T_s}{2L} \quad (3)$$

меньше, чем среднее значение тока через дроссель:

$$\langle i_g(t) \rangle_{T_s} = \frac{v_g(t)}{R_e}, \quad (4)$$

где R_e , как в работе [1], эффективное сопротивление входной цепи. Следовательно, преобразователь работает в режиме непрерывной проводимости тока, когда:

$$\langle i_g(t) \rangle_{T_s} > \Delta i_g(t) \Rightarrow d(t) < \frac{2L}{R_e T_s}. \quad (5)$$

Подставляя $d(t)$ из (2) в (5) и решая выражения относительно R_e , получим следующее условие для R_e в режиме непрерывной проводимости тока:

$$R_e < \frac{2L}{T_s \left(1 - \frac{v_g(t)}{V} \right)}. \quad (6)$$

Если $v_g(t)$ изменяется по закону $v_g(t) = V_M |\sin(\omega t)|$, тогда выражение (6) может удовлетворяться в некоторых точках цикла переменного тока, а в других нет. Поскольку $0 \leq v_g(t) \leq V_M$ можно сделать вывод, что преобразователь работает в режиме НПТ на протяжении всего цикла при

$$R_e < \frac{2L}{T_s}. \quad (7)$$

Тогда уравнения (1), (2) и (6) справедливы для всех значений времени t . Преобразователь всегда работает в прерывистом режиме, если:

$$R_e > \frac{2L}{T_s \left(1 - \frac{v_g(t)}{V} \right)}. \quad (8)$$

Для R_e между этими пределами преобразователь работает в прерывистом режиме проводимости, когда $v_g(t)$ близко к нулю, а в режиме НПТ, когда $v_g(t)$ приближается к V_M .

Статические входные характеристики повышающего преобразователя с разомкнутым контуром показаны на рис. 2. Входной ток $i_g(t)$ построен в зависимости от входного напряжения $v_g(t)$ для различных циклов $d(t)$.

В НПТ входные характеристики повышающего преобразователя описываются как:

$$\frac{v_g(t)}{V} = 1 - d(t). \quad (9)$$

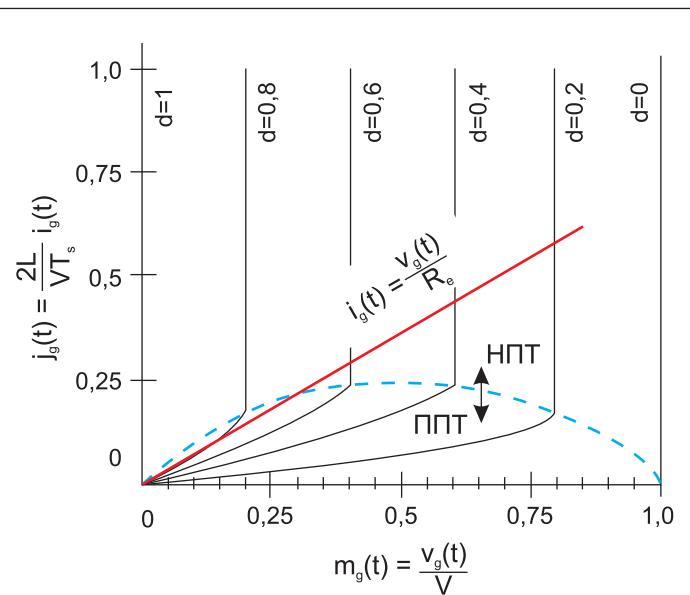


Рис. 2. Статические входные характеристики повышающего преобразователя

Для того чтобы получить обобщенный график, мы можем нормализовать входное напряжение и входной ток следующим образом:

$$m_g(t) = \frac{v_g(t)}{V}, \quad (10)$$

$$j_g(t) = \frac{i_g(t)}{VT_s / 2L}. \quad (11)$$

С учетом (10), из уравнения (9) получим:

$$m_g(t) = 1 - d(t). \quad (12)$$

Как видно из уравнения (12), $m_g(t)$ не зависит от входного тока $i_g(t)$ и поэтому представлено вертикальными линиями на рис. 2.

Чтобы вывести входную характеристику преобразователя для режима прерывистой проводимости тока (ППТ), можно воспользоваться моделью эквивалентной схемы для стационарного режима приведенного в работах [3, 5]. На рис. 3 показана усредненная эквивалентная схема модели повышающего преобразователя, работающего в режиме прерывистого проводимости тока.

Из рис. 3 можно легко получить следующее выражение для входного тока:

$$i_g(t) = \frac{v_g(t)}{\left(\frac{2L}{T_s d^2} \right)} + \frac{p(t)}{V - v_g(t)}. \quad (13)$$

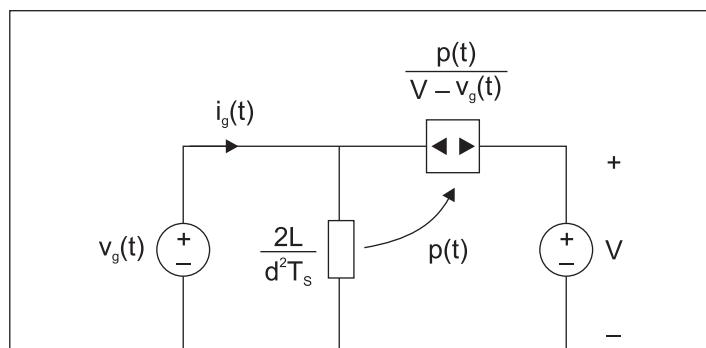


Рис. 3. Усредненная эквивалентная схема модели повышающего преобразователя, работающего в режиме прерывистого проводимости тока

Из усредненной схемной модели (рис. 3) можно определить выражение для мощности $p(t)$:

$$p(t) = \frac{v_g^2(t)}{\left(\frac{2L}{T_s d^2}\right)}. \quad (14)$$

Подстановка уравнения (14) в уравнение (13) приводит к следующему уравнению:

$$\frac{2L}{VT_s} i_g(t) \left(1 - \frac{v_g(t)}{V}\right) = d^2(t) \left(\frac{v_g(t)}{V}\right). \quad (15)$$

Нормирование этого уравнения, согласно уравнениям (10) и (11), позволяет получить следующее уравнение в безразмерных величинах:

$$j_g(t)(1 - m_g(t)) = d^2 m_g(t). \quad (16)$$

Уравнение (16) описывает криволинейные участки входных характеристик (рис. 2) для низких значений входного тока $i_g(t)$ для режима ППТ. Чтобы выразить границу режимов НПП и ППТ как функцию $v_g(t)$ и $i_g(t)$, с учетом, что входной ток $i_g(t)$ определяется как $i_g(t) = v_g(t)/R$, из (6), можно получить следующее выражение:

$$\frac{2L}{VT_s} i_g(t) > \left(\frac{v_g(t)}{V}\right) \left(1 - \frac{v_g(t)}{V}\right). \quad (17)$$

Нормализация уравнения (17), согласно уравнениям (10) и (11), приводит к:

$$j_g(t) > m_g(t)(1 - m_g(t)). \quad (18)$$

Это уравнение описывает параболу с корнями при $m_g=0$ и $m_g=1$, с максимальным значением $j_g=0,25$ при $m_g=0,5$. Граница режимов НПП и ППТ на рис. 2 изображена пунктирной линией.

Полные входные характеристики повышающего преобразователя, показанные на рис. 2, построены с использованием уравнений (12), (16) и (18).

На рис. 2 также видна желаемая линейная резистивная входная характеристика преобразователя $i_g(t) = v_g(t)/R_e$. Для проиллюстрированных значений R_e преобразователь работает в режиме ППТ при значениях m_g вблизи нуля и в режиме

НПП для значений m_g в близи максимальной величины V_M . Пересечение растущих характеристик с желаемой линейной входной характеристикой иллюстрирует, как контроллер должен выбирать рабочий цикл при изменяющемся значениях $v_g(t)$. В преобразователях с открытым обратным связью, чаще используется приближение идеального выпрямителя, эффективное сопротивление которого определяется как:

$$R_e = \frac{2L}{T_s d^2}.$$

Модель на рис. 3 отличается от модели выпрямителя, приведенного в работе [1], тем, что источник питания подключен между входными и выходными клеммами. В результате в форме волны входного тока присутствуют гармоники. Например, если $v_g(t)$ — выпрямленное синусоидальное напряжение, то ток через эффективное сопротивление тоже будет выпрямленным синусоидальным. При этом ток через эффективное сопротивление R_e также будет выпрямленной синусоидой. Однако входной ток $\langle i_g(t) \rangle_{T_s}$ теперь равен сумме тока через R_e и тока, протекающего через источник питания. Поскольку источник питания является нелинейным элементом, то $\langle i_g(t) \rangle_{T_s}$ содержит гармоники. При большом значении емкости С выходное напряжение практически постоянно. Форма входного тока определяется из уравнения (15). Если напряжение V достаточно велико, то член

$$\left(1 - \frac{v_g(t)}{V}\right)$$

приблизительно равен единице, а гармоники в токе $\langle i_g(t) \rangle_{T_s}$ малы. Нулевые пересечения $v_g(t)$, $p(t)$ и $\langle i_g(t) \rangle_{T_s}$ совпадают.

Таким образом, хотя повышающий ППТ преобразователь генерирует некоторые гармоники, тем не менее можно построить выпрямитель с низким уровнем гармоник, который соответствует ограничениям по гармоникам. Недостатками такого подхода являются повышенный пиковой ток ППТ и необходимость дополнительной фильтрации высокочастотного пульсирующего входного тока. Аналогичный подход применяется в работе повышающего преобразователя на границе между режимами непрерывной и прерывистой проводимости.

Этот подход известен как работа в режиме критической проводимости [2, 6], он устраняет описанный выше механизм искажения, но требует управление с переменной частотой переключения, что значительно усложняет систему управления преобразователя.

Выводы

- Повышающий преобразователь постоянного тока, а также другие преобразователи, способные повышать напряжение в соответствии с уравнением (1), могут быть адаптированы к идеальному применению выпрямителя.
- Система управления должна обеспечивать пропорциональность входного тока к входному напряжению, то есть сближать форму входного тока с формой входного напряжения.
- Преобразователь может работать в режимах ППТ, НПП или в обоих режимах. Граница режимов может быть определена как функция от соотношения параметров R_e и $2L/T_s$, а также от отношения $v_g(t)/V$.

Литература

- Петросян Н. Н., Бегоян К. В. Моделирование эквивалентных схем преобразователей постоянного тока в режиме прерывистой проводимости // Силовая электроника. 2023. № 2.
- Ericson R. W., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. Springer Science & Business Media, 2007.
- Петросян Н. Н., Бегоян К. В., Каюян Г. С. Анализ повышающих-понижающих конвертеров с помощью эквивалентной трансформаторной схемы малого сигнала // Силовая электроника. 2019. № 2.
- Maksimovic D., Ćuk. A Unified Analysis of PWM Converters in Discontinuous Models // IEEE Transaction on Power Electronics. 1991. Vol. 6. No. 3.
- Sun J., Mitchell D. M., Greuel M. F., Krein P. T., Bass R. M. Averaged Modeling of PWM Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode // IEEE Transactions on Power Electronics. 2001. Vol. 16. No. 4.
- Singer S., Ericson R. W. Power Source Element and Its Properties // IEE Proceedings Circuits Devices Systems. 1994. Vol. 141. No. 3 pp. 220–226, June 1994.



ООО ТЕХНО
Токопроводящий силикон
Токопроводящий клей-герметик EX-A302L

По своему составу клей-герметик аналогичен готовым токопроводящим силиконовым профилям и, после вулканизации, полностью совместим с ними по электрохимическим параметрам, обеспечивающих решение задач обеспечения ЭМС, герметизации и климатической защиты. Прокладки из токопроводящего силикона состоят из формообразующей эластичной вулканизированной силиконовой резины, наполненной токопроводящими микрограммами. Такая комбинация материалов позволяет решать задачи как по обеспечению требований ЭМС, так и по герметизации и климатической защите оборудования одновременно.

реклама

ПЛАТЫ ПЕЧАТАНЫЕ
опытное и серийное производство,
проектирование, монтаж

КОНТРАКТНАЯ РАЗРАБОТКА
И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ



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

реклама

Применение источников питания в бортовой системе летательных аппаратов: архитектура, требования и особенности

В статье рассмотрены ключевые аспекты архитектуры, требования к надежности и современные тенденции в разработке источников питания для авиационной техники, включая анализ практических кейсов и нормативных стандартов.

Тигран Гайказъян

gl@ptkgroup.ru

Бортовые системы электроснабжения летательных аппаратов (ЛА) являются критически важным элементом, обеспечивающим функционирование всех систем — от двигателей до сложной авионики. Современные ЛА, будь то пассажирские самолеты, военные истребители или беспилотные аппараты, зависят от стабильного и надежного питания, что подчеркивает актуальность темы. В условиях экстремальных нагрузок (вибраций, перепадов температур, электромагнитных помех) источники питания должны не только соответствовать строгим стандартам, но и обеспечивать резервирование, компактность и высокую эффективность.

Структура бортовых систем электроснабжения включает первичные источники (генераторы, аккумуляторы), преобразователи напряжения и распределительные сети, работающие в диапазоне от 28 В постоянного тока до 115 В/400 Гц переменного тока. При этом архитектура таких систем постоянно эволюционирует: внедряются модульные решения и цифровые интерфейсы для мониторинга параметров в реальном времени.

Однако проектирование источников питания для ЛА сопряжено с рядом сложностей: необходимость защиты от электромагнитных воздействий, адаптация к различным типам бортовых сетей, а также соблюдение требований функциональной безопасности, особенно в условиях растущей автоматизации.

Архитектура бортовых систем питания: российские решения

Архитектура бортовых систем электроснабжения ЛА в России формируется под влиянием уникальных требований: экстремальных условий эксплуатации, необходимости импортозамещения и перехода на цифровые технологии управления. В основе таких систем лежат первичные источники энергии — син-

Введение

хронные генераторы переменного тока и коллекторные генераторы постоянного тока, которые обеспечивают питание шин 28 В, 270 В и 115 В/400 Гц.

Далее рассмотрим примеры реализации, включая интеграцию преобразователей постоянного тока в системы электропитания ЛА и энергоэффективные решения для космических аппаратов. В проектах импортозамещения активно внедряется экосистема источников питания постоянного тока SmartPower серий DD7A и DD7C, а также соответствующие фильтры электромагнитных помех DF7A, совместимые с западными аналогами и адаптированные к российским стандартам.

Первичные источники энергии

Генераторы: в гражданских самолетах установлены генераторы переменного тока с выходным напряжением 115 В/400 Гц и мощностью 90 кВт. Они интегрированы с системой управления FADEC (Full Authority Digital Engine Control), которая регулирует частоту вращения ротора для стабилизации выходного напряжения.

Аккумуляторы: используются литий-ионные батареи с системой балансировки ячеек. Балансировка осуществляется через ШИМ-контроллеры, которые выравнивают заряд на каждом элементе с точностью $\pm 1\%$. Никель-кадмевые аккумуляторы используются для резервного питания в военных ЛА. Их преимущество — стабильность при низких температурах.

Распределительные системы

Шины постоянного тока: шина питания 270 В используется для систем управления двигателями и высокомощных систем (например, для военных ЛА). Высоковольтные шины снижают токи в цепях, уменьшая потери на сопротивлении проводов.

Для данных шин компания SmartPower разработала преобразователь DD7A252-300N12-M-HB (рис. 1) с диапазоном входного напряжения 180-375 В в ком-



Рис. 1. Источник питания постоянного тока DD7A252-300N12-M-HB



Рис. 2. Источник питания постоянного тока DD7A152-24N36-M-QB

пактном корпусе Half-Brick ($57,9 \times 55,9 \times 12,7$ мм) и следующими основными параметрами:

- мощность: до 250 Вт;
- эффективность: до 92%;
- возможность параллельной работы;
- диапазон рабочих температур:
 - Т-класс: $-40\dots+100$ °C,
 - М-класс: $-55\dots+100$ °C;
- вес: 62 г;
- полный набор стандартных выходных напряжений: 3,3–48 В.

Шина питания 28 В используется для авионики и систем управления. Низковольтные шины обеспечивают безопасность при обслуживании.

Для использования на низковольтнойшине питания компания SmartPower предлагает преобразователь в компактном корпусе Quarter-Brick ($57,9 \times 36,8 \times 12,7$ мм) DD7A152-24N36-M-QB (рис. 2) с диапазоном входного напряжения 18–40 В и мощностью до 150 Вт:

- эффективность: до 92%;

- возможность параллельной работы;
- диапазон рабочих температур:
 - Т-класс: $-40\dots+100$ °C,
 - М-класс: $-55\dots+100$ °C;
- вес: 62 г;
- полный набор стандартных выходных напряжений: 3,3–48 В.

DC/DC-преобразователи серии DD7A (рис. 3) на основе карбид-кремниевых (SiC) транзисторов обеспечивают высокую эффективность до 94% за счет снижения тепловых потерь и повышения общей надежности системы. SiC-транзисторы отличаются минимальными потерями на переключение, что особенно важно для высокочастотных преобразователей, требующих стабильной работы.

Запатентованная топология управления PFM (pulse frequency modulation) совместно с металлической подложкой и силиконовым термокомпаундом в пластиковом корпусе оптимизирует теплообмен, повышая эффективность и долговечность модулей DD7A.

Экосистема преобразователей SmartPower включает модули питания, фильтры электромагнитных помех и радиационно-стойкие источники, формируя комплексную систему электропитания. Продукты полностью совместимы с аналогами Vicor серий V24 и V300, что позволяет использовать их в схожих применениях.

Серия DD7A демонстрирует эффективность преобразования на 5–7% выше, чем аналоги Vicor, благодаря улучшенной конструкции и защите от перенапряжений, перегрузок, коротких замыканий и перегрева. Производство соответствует стандарту SJ20668-1998 (эквивалент MIL-PRF-38534L), что гарантирует надежность для авиационных систем.

Основные характеристики источников питания SmartPower серии DD7A:

- максимальная мощность DC/DC-преобразователей: до 600 Вт;
- диапазон входных напряжений: 2:1 или 4:1;
- эффективность до 96%;



Рис. 3. Источники питания постоянного тока серии DD7A в различных корпусах



Рис. 4. Модульные СНиР преобразователи серии DD7C

- температурный диапазон: $-55\dots+100$ °C;
- использование керамических конденсаторов для повышения надежности;
- возможность параллельной работы преобразователей;
- стандартные выходные напряжения: 3,3–48 В.

Модульные СНиР преобразователи от компании SmartPower

Преобразователи постоянного тока серии DD7C (рис. 4) представляют собой новое поколение модульных источников питания, основанных на технологии СНиР (преобразователь в корпусе), и имеют ряд преимуществ перед модулями Brick-формата.

Программное переключение в мегагерцовом диапазоне, запатентованная логика управления и технология компоновки со высокой эффективностью (до 97,5%) позволяют модулям серии DD7C достичь высокую удельную мощность (до 2735 Вт/дюйм³ или 167 Вт/см³) в ультратонком корпусе (до 6,73 мм). По сравнению с традиционными модулями питания удельная мощность увеличена в 10 раз, а вес снижен на 10%.

Серия DD7C также имеет защиту от входного перенапряжения, выходного перенапряжения, перегрузки по току, защиту от короткого замыкания и перегрева, управление включением, индикацию неисправностей, контроль температуры и другие функции.

Продукция проходит многократные проверки, что гарантирует надежность в работе и подходит для применения в авиации, космических аппаратах, БПЛА, центров обработки данных, где предъявляются чрезвычайно строгие требования по мощности, эффективности, весу и габаритам.

Конструкция и производство изделий соответствуют требованиям SJ20668-1998 «Общие

технические условия для микросхем» (соответствует MIL-PRF-38534L).

Основные характеристики источников питания SmartPower серии DD7C:

- максимальная мощность: до 1680 Вт;
- диапазоны входных напряжений: от 9–50 В до 200–420 В;
- тестирование в соответствии со стандартом GJB150A-2009 (аналог MIL-STD-810G);
- эффективность: до 94%;
- температурный диапазон: $-55\dots+100$ °C;
- конструктивное соответствие третьему поколению источников питания Vicor;
- выходные напряжения: 3,3–48 В.

Параллельное подключение до восьми модулей СНиР серии DD7C в авиационных системах позволяет обеспечить резервирование и повысить общую надежность системы питания, увеличивая мощность и минимизируя риски отказов. Каждый преобразователь контролирует состояние соседних и берет на себя нагрузку при их отключении.

Требования к источникам питания в российской авиации

Теоретические основы проектирования источников питания для авиационной техники формируются под влиянием строгих требований безопасности, экстремальных условий эксплуатации и нормативной базы. В российской авиации эти требования устанавливаются федеральными авиационными правилами и международными стандартами, такими как ГОСТ Р 54073-2017, регламентирующими параметры электробезопасности и электромагнитной совместимости.

Ключевыми факторами являются:

- Надежность в экстремальных условиях: модули питания должны сохранять работоспособность при температурах $-60\dots+70$ °C, вибрациях до 9g и воздействии радиации.

• Сертификация и соответствие: системы питания обязаны проходить сертификацию в рамках государственного регулирования, включая требования к резервированию и защите от помех.

- Адаптация к санкционным ограничениям: акцент делается на импортозамещении компонентов и использовании отечественных разработок, таких как радиационно стойкие микросхемы.

Теория проектирования преобразователей включает анализ переходных процессов, тепловых режимов и алгоритмов управления, что отражено в работах по динамике полета и аэронавигации. Этот раздел раскрывает взаимосвязь нормативных требований, физических ограничений и инновационных решений в контексте российской авиапромышленности.

Экстремальные условия эксплуатации

Российские ЛА эксплуатируются в диапазоне от -60 °C (например, в условиях Заполярья) до $+70$ °C (Средняя Азия). Компоненты источников питания должны сохранять работоспособность при таких перепадах. Например, в гражданских самолетах используются термоустойчивые конденсаторы с полимерными диэлектриками, выдерживающие циклы замораживания-размораживания без потери емкости.

Вибрации и удары: военные ЛА испытывают перегрузки до 9g при маневрах. Для защиты преобразователей применяются:

- Герметичные корпуса с вибропоглощающими прокладками из полиуретана.
- Фиксация элементов эпоксидными компаундами, которые демпфируют колебания до 500 Гц.

Вторичные источники электропитания SmartPower проходят тестирование согласно стандарту GJB150A-2009 (аналог MIL-STD-810G) и удовлетворяют требованиям

в том числе по допустимым вибрациям в частотном диапазоне 5–2000 Гц с ускорением 7,5–10г.

Электромагнитная совместимость (ЭМС)

Современные ЛА оснащены радиолокационными станциями (РЛС) и системами радиоэлектронной борьбы (РЭБ), создающими мощные ЭМП. Для подавления помех в источниках питания применяют:

- многослойные экраны из магнитных материалов (пермаллоев) с высокой магнитной проницаемостью;
- LC-фильтры с полосой подавления 10 кГц – 1 ГГц.

В области подавления электромагнитных помех компания Smart Power производит серию фильтров постоянного тока серии DF7A на диапазон входного напряжения 3–30 В с выходным током от 20 А (DF7A602-20N) до 30 А (DF7A902-30N).

Основные технические характеристики фильтра представлены ниже. Стоит отметить компактный корпус Quarter-Brick (57,9×36,8×12,7 мм) и выбор необходимого температурного диапазона работы:

- подавление гармоник: >40 дБ (от 0,1 кГц до 1 МГц);
- эффективность: до 98%;
- диапазон рабочих температур:
 - Т-класс: -40...+100 °C,
 - М-класс: -55...+100 °C;
- пульсации выходного напряжения: не более 10 мВ;
- вес: 216 г;
- регулировка выходного напряжения: 75–110%.

Радиационная стойкость

В космических аппаратах и высотных беспилотниках критически важна защита от ионизирующего излучения. Российские разработчики используют:

- Радиационно стойкие микросхемы с устойчивостью к дозе 100 кРад (например, КМОП-структуры с защитой от лавинного пробоя).
- Системы тройного модульного резервирования для критических узлов, где три идентичных модуля работают параллельно, а результаты обрабатываются по мажоритарной логике.

Для использования в космическом пространстве компанией SmartPower разработана серия гибридных радиационно-стойких источников питания серии DD1A (рис. 5) и фильтров (DF1A), изготовленных по толстопленочной технологии с герметичным корпусированием в металлическую оболочку.

Продукция компании SmartPower построена на основе современных конструкторских решений и по техническим и эксплуатационным характеристикам не уступает мировым аналогам, соответствует зарубежным стандартам безопасности и электромагнитной совместимости. На производстве внедрена система многоуровневого контроля качества, обеспечивающая высокую надежность готовых изделий, удовлетворяющих стандарту GJB2438A-2002. Продукция компании SmartPower соответствует стандартам для гибридных интегральных схем и электронных компонентов GB2438B-2017, GJB10164-2021, GJB548C-2019.

Основные характеристики радиационно-стойких источников питания SmartPower серии DD1A:

- диапазоны входных напряжений: 20–50, 30–60 и 80–120 В;
- выходная мощность: 1,5–120 Вт;
- до трех выходных каскадов;



Рис. 5. Радиационно стойкие источники питания серии DD1A

- радиационная стойкость: до 100 кРад;
- эффективность: до 82%;
- режим работы: фиксированная частота преобразования;
- соответствие характеристикам высоконадежных и радиационно стойких источников питания компаний VPT и Interpoint (CraneAerospace);
- толстопленочная технология изготовления и металлическая герметизация.

Для защиты электрических цепей и компонентов от нежелательных помех компания SmartPower в рамках своей экосистемы разработала радиационно стойкие высокоеффективные фильтры электромагнитных помех серии DF1A (рис. 6).

Основные характеристики фильтров электромагнитных помех от компании SmartPower:

- диапазоны входного напряжения: 0–50 и 80–120 В;
- выходной ток: до 10 А;
- диапазон рабочих температур: -55...+125 °C;
- внутреннее сопротивление: 0,07–1,5 Ом;
- уровень шумоподавления:
 - ≥1 дБ (1 кГц) ≥-1,
 - ≥50 дБ (500 кГц),
 - ≥50 дБ (1 МГц),
 - ≥45 дБ (5 МГц);
- максимальная поглощенная доза: 100 кРад (Si);
- одиночное событие: 75 МэВ·см²/мг.

Заключение

Высоконадежные источники питания — основа безопасности и эффективности летательных аппаратов. Их проектирование требует учета экстремальных условий, внедрения передовых технологий и жестких стандартов. Только комплексный подход, включающий резервирование, диагностику и инновационные материалы, гарантирует выполнение задачи в любых сценариях.

Продукция SmartPower удовлетворяет потребности производителей авиационной техники, работающей в условиях повышенных нагрузок и строгих требований к надежности. Благодаря использованию современных материалов и технологий, продукция SmartPower соответствует международным стандартам качества и способна функционировать в широком диапазоне температур, при вибрациях и воздействии электромагнитных помех.



Рис. 6. Радиационно-стойкие фильтры электромагнитных помех серии DF1A

Магнитный электродвигатель-генератор в электромобиле

Магнитный электродвигатель-генератор можно использовать в качестве тягового генератора в электромобилях с зарядкой аккумуляторной батареи.

Юрий Таланин

tyv1357@mail.ru

Устройство шестифазного магнитного электродвигателя-генератора поясняется с помощью рисунков, где на рис. 1 представлен разрез магнитного электродвигателя-генератора, вид спереди, на рис. 2 — разрез по плоскости А-А (разрез статора и ротора).

Задача, решаемая при разработке данного предложения, заключается в увеличении мощности магнитного электродвигателя-генератора, повышении его КПД, а также в обеспечении работы описываемого устройства в качестве тягового электродвигателя электромобиля с зарядкой аккумуляторной батареи.

Ротор представляет собой цилиндр, на поверхности которого расположены секции из шести постоянных магнитов, равномерно размещенных по его длине и выполненных в виде клиньев.

Расширяющиеся к статору клинья 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 шестерню для подключения к редуктору привода колес электромобиля, с другой — крыльчатку для охлаждения магнитного электродвигателя-генератора.

Статор — это шестиполюсный шестифазный полый цилиндр с постоянными магнитами, расположенными на полой поверхности статора секциями по шесть магнитов. Магниты равномерно распределены по его длине и выполнены в виде клиньев, сужающихся к ротору и расположенных относительно оси статора под углом 65–75°. Они также залиты нейтральным по отношению к магнитным полям материалом и обращены S-одноименными полюсами к постоянным магнитам ротора. По всей длине статора между постоянными магнитами выполнены пазы, расположенные относительно его

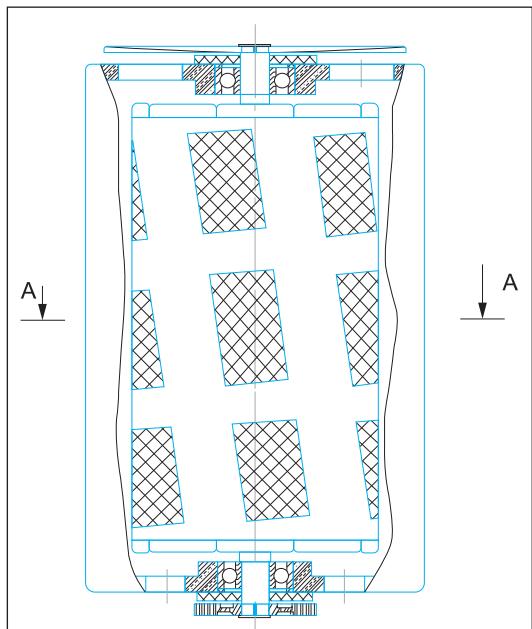


Рис. 1. Магнитный электродвигатель-генератор в разрезе разрез, вид спереди

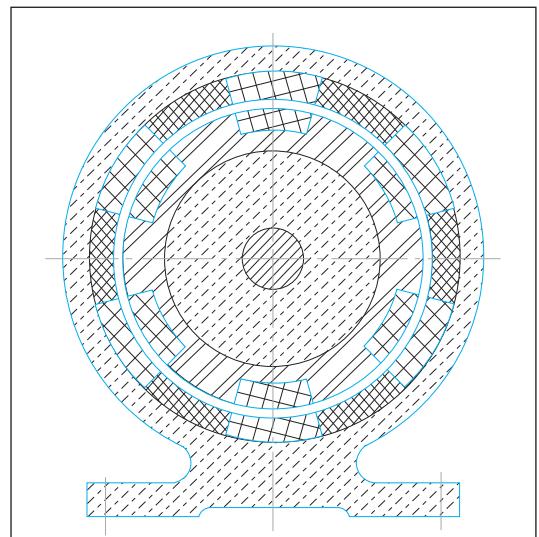


Рис. 2. Магнитный электродвигатель-генератор в разрезе по плоскости А-А (разрез статора и ротора)

оси под углом 65–75°. В пазах установлены шесть статорных обмоток.

Принцип действия магнитного электродвигателя-генератора основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и магнитных полей ротора и статора.

Постоянные магниты ротора и статора обращены друг к другу S-одноименными полюсами, которые отталкиваются и заставляют ротор магнитного электродвигателя-генератора вращаться вокруг своей оси. Высокая удельная мощность двигателя обеспечивается за счет сильной отталкивающей силы нескольких пар магнитов, а повышенный КПД — за счет энергии высококоэргетических постоянных магнитов, создающих сильные магнитные поля.

Вектор силы при этомложен к торцам магнитов и направлен по касательной к ротору, что увеличивает крутящий момент магнитного электродвигателя-генератора.

При вращении ротора поток энергией постоянных магнитов, установленных в нем, пересекает проводники статорных обмоток и индуцирует в обмотках переменную электродвижущую силу (ЭДС) E , при подключении статорных обмоток к нагрузке, проходящий по этим обмоткам ток I создает изменяющееся магнитное поле, результирующий магнитный поток Φ формируется совместными действиями магнитодвижущих сил: энергией вращающихся постоянных магнитов, установленных в роторе, изменяющимися магнитными полями статорных обмоток и энергией постоянных магнитов, размещенных в статоре.

Магниты, используемые в магнитном электродвигателе-генераторе, обладают высоким значением магнитной индукции — например, магниты на основе редкоземельных элементов, в частности, неодимовые магниты. Они имеют сильные магнитные поля, что позволяет достигать высокой однородности поля. Недостатком таких магнитов является их хрупкость, кроме того, они могут не выдерживать больших нагрузок. В этом случае наружные поверхности магнитов покрывают тонкой металлической оболочкой — например, медной.

Заливка постоянных магнитов нейтральным материалом максимально сохраняет работу магнитных полей магнитов, а также обеспечивает высокую мощность магнитного электродвигателя-генератора. Одним из факторов, способствующих получению данных преимуществ, является то, что в магнитном электродвигателе-генераторе практически нет железа. Это значительно снижает потери на вихревые токи и гистерезисные потери.

Работа магнитного электродвигателя-генератора в режиме тягового электродвигателя электромобиля с зарядкой аккумуляторной батареи

Если магнитный электродвигатель-генератор установить на электромобиль, под-

ключив аккумуляторную батарею через частотный преобразователь и на три равноудаленные друг от друга статорные обмотки, то при подаче напряжения 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 его в движение.

При запуске электромобиля, а также при скоростном движении по трассе, или на подъеме в гору, или в тяжелых дорожных ситуациях напряжение подается на все шесть обмоток магнитного электродвигателя-генератора.

Во время движения электромобиля электронный регулятор (контроллер) реагирует на движение в зависимости от дорожной ситуации — на трассе, в пробке, при спуске с горы, вынужденной остановке, скажем, перед светофором или на стоянке. Учитывая объем заряда аккумуляторной батареи, контроллер отключает, например, напряжение на трех равноудаленных друг от друга статорных обмотках, а поскольку ротор вращается, поток энергии постоянных магнитов, установленных в роторе, пересекает проводники этих обмоток и индуцирует в них переменную электродвижущую силу E (ЭДС).

Контроллер подключает все три генераторные обмотки к входу зарядного устройства, состоящего из двухтактного высоковольтного высокочастотного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией со схемой управления, содержащего две цепи обратной связи по выходному току и напряжению. Такое построение силовой части зарядного устройства обеспечивает оптимальные выходные характеристики генератора тока и генератора напряжения, надежную гальваническую развязку, высокий КПД в широком диапазоне питающих напряжений, а также высокие удельные массогабаритные и мощностные характеристики. Выход зарядного устройства контроллер подключает к аккумуляторной батарее, в результате начинается процесс ее заряда.

Зарядное устройство имеет несколько наборов настроек — профилей, которые позволяют сохранять значения тока, напряжения верхнего и нижнего порога и алгоритм заряда. Каждый профиль настраивается индивидуально под конкретную дорожную ситуацию.

При движении электромобиля и нажатии на тормоз контроллер отключает напряжение на трех равноудаленных друг от друга статорных обмотках и подключает их (генераторные) к зарядному устройству. Происходит заряд аккумуляторной батареи. При отключении тормоза, в зависимости от дорожной ситуации, электромобиль или продолжает движение с зарядкой аккумуляторной батареи, или отключает зарядное устройство и подключает через частотный

преобразователь аккумуляторную батарею — на шесть статорных обмоток подается напряжение, увеличивая мощность тягового электродвигателя.

Зарядное устройство позволяет регулировать силу зарядного тока и напряжение, а также выбирать алгоритм заряда аккумуляторной батареи в зависимости от ситуации.

Во время движения электронный контроллер, учитывая состояние зарженности аккумуляторной батареи, реагирует на движение электромобиля в зависимости от дорожной ситуации. Будь то движение по трассе, подъем или спуск с горы, вынужденная остановка или стоянка электромобиля с работающим двигателем — контроллер выбирает алгоритм заряда аккумуляторной батареи, сохраняя установленные настройки в профилях для переключения.

Для индикации протекающего зарядного тока и напряжения используется графический жидкокристаллический индикатор.

В процессе заряда аккумуляторная батарея улучшает и восстанавливает свой главные характеристики — внутреннее сопротивление и емкость.

Кроме того, зарядное устройство можно использовать как многоцелевой источник постоянного тока для питания бортовой автомобильной аппаратуры.

Данное техническое решение позволит значительно уменьшить массогабаритные характеристики аккумуляторной батареи и массу электромобиля в целом, а также значительно увеличить пробег электромобиля до подзарядки, поскольку зарядка аккумуляторной батареи происходит постоянно при работающем магнитном электродвигателе-генераторе.

Такое решение поможет решить проблему дефицита аккумуляторных батарей и их утилизацию.

Магнитный электродвигатель-генератор — это экологически чистый прибор. Он требует минимального потребления энергии, не загрязняет атмосферу и может использоваться в автомобилестроении, авиации, судостроении, машиностроении и во многих других отраслях народного хозяйства.

Литература

1. Таланин Ю. В. Магнитный электродвигатель-генератор. Патент RU 2 772 864, МПК H02K 21/14 // Бюл. № 15. 2022 (В соответствии с пунктом 1 статьи 1366 Гражданского кодекса РФ, содержащее публичное предложение о возможном заключении договора об отчуждении патента заинтересованным лицам).
2. Таланин Ю. В. Магнитный электродвигатель-генератор // Силовая электроника. 2022. № 4.
3. Таланин Ю. В. Области применения магнитного электродвигателя-генератора // Силовая электроника. 2024. № 1.

Упрощенная методика расчета конденсаторов DC-шины привода электрического транспортного средства

Конденсатор в звене постоянного тока (ЗПТ) автомобильного привода предназначен для хранения и буферизации энергии. Основная задача этого блока состоит в подавлении пульсаций тока, генерируемых силовым каскадом трехфазного инвертора, который соединяется с приводным двигателем с помощью кабелей или шин.

Проф. Вольфганг Рамбоу¹

**Перевод:
Евгений Карташев**

Емкость DC-шины выбирают таким образом, чтобы контролировать максимальный уровень пульсаций напряжения в звене постоянного тока и в то же время повышать плотность энергии системы. Конденсаторы ЗПТ современных электромобилей работают при высоких напряжениях в диапазоне 400–800 В.

Электронные элементы, используемые в автомобильной промышленности, должны гарантировать высочайшую надежность при эксплуатации в условиях предельных нагрузок, например, при экстремально высоких температурах, вибрации и влажности. Очевидно, что конденсатор звена постоянного тока инвертора как элемент класса А является одним из ключевых элементов конструкции, во многом определяющим надежность. Существует большое количество более или менее сложных выражений для расчета емкости DC-шины в инверторах с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), используемых в электромобилях. В статье представлен упрощенный способ расчета C_{DC} , обеспечивающий быстрое практическое решение.

В силовых приводах электромобилей блок пленочных конденсаторов DC-шины монтируется непосредственно на отдельных ключах или силовых

модулях (в трехфазной или полумостовой конфигурации). Этот узел (на рис. 1 выделен зеленым цветом) отличается очень низкими значениями ESL (эквивалентная последовательная индуктивность) и ESR (эквивалентное последовательное сопротивление). Близость конденсаторов к силовому модулю является — один из основных способов минимизации паразитной индуктивности звена постоянного тока.

Применение планарных (плоскопараллельных) DC-шин позволяет снизить общее значение ESL до максимально возможного уровня, в то время как ESR определяется особенностями конструкции самих конденсаторов. Даже несколько нГн паразитной индуктивности повышают сопротивление на частоте переключения до уровней, которые могут свести на нет эффективность. Большие пульсации напряжения указывают на большие пульсации тока в емкостях звена постоянного тока, что приводит к чрезмерному рассеянию мощности в ESR. Правильный выбор конденсаторов и их расположения позволяет системе находиться в пределах тепловых ограничений и положительно влияет на электромагнитную совместимость (EMC). Если пульсации напряжения и соответствующих токов поддерживаются на достаточно низком уровне, то потенциальное воздействие на системы безопасности автомобиля также значительно снижается и силовые электронные узлы

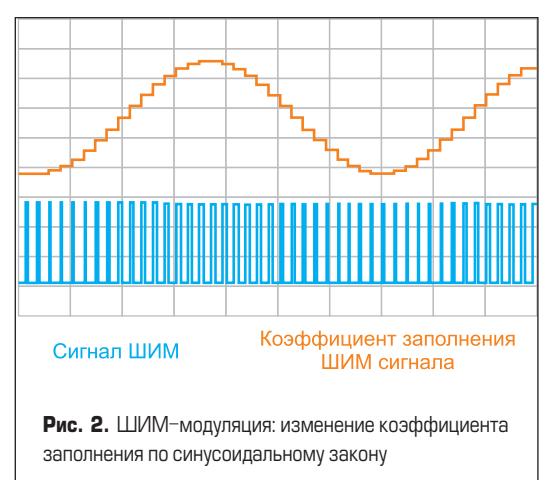
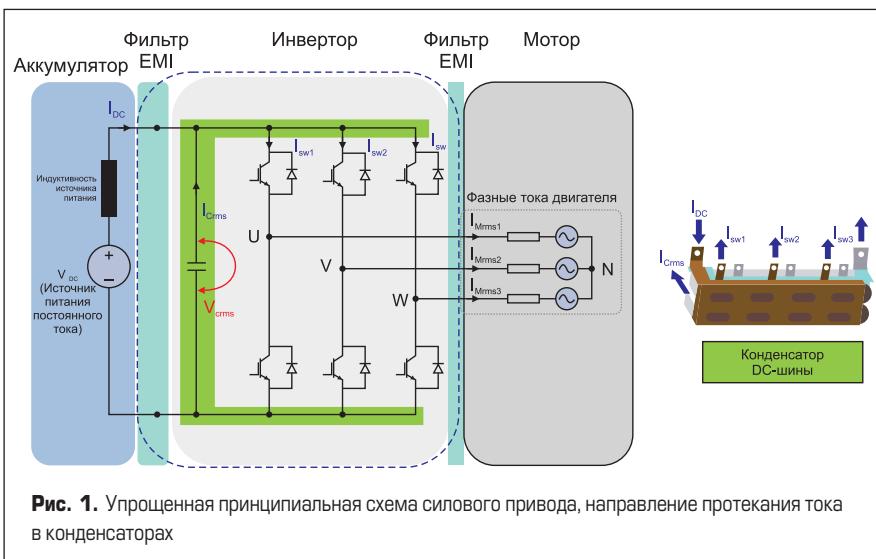


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема силового привода, направление протекания тока в конденсаторах

Рис. 2. ШИМ-модуляция: изменение коэффициента заполнения по синусоидальному закону

автомобиля не генерируют помехи, способные повлиять на другие функциональные модули.

С повышением частоты коммутации, паразитные индуктивности батареи и соединительных кабелей увеличивают общий импеданс. В свою очередь импеданс конденсаторов ЗПТ уменьшается, что создает основной путь для высокочастотных пульсаций переменного тока, проходящих через DC-шину (I_{Crms}).

Ток нагрузки (I_{Mrms}) и результирующий ток пульсаций конденсатора (I_{Crms}), коэффициент заполнения (DC или m ; в худшем случае $m = 0,5$), частота переключения (f) и температура ($T(C)$) являются основными факторами, определяющими уровень пульсаций напряжения на выводах конденсаторов. Поскольку амплитуда пульсаций напряжения прямо пропорциональна току, наибольшие пульсации тока возникают при максимальной нагрузке, что естественно. Сплошная кривая на рис. 3 показывает расчетное среднеквадратичное значение пульсаций переменного тока, генерирующих основные потери в конденсаторе. Оно достигает максимума при коэффициенте заполнения DC = 50%, и уменьшается по обе стороны от 50%.

Конструкция и тип конденсатора может влиять на рассматриваемые параметры. Поскольку классические электролитические конденсаторы с высокой емкостью почти не используются в транспортных приводах, технологии силовых пленочных конденсаторов приобретают особое значение — и на то есть веские причины. Такие элементы имеют очевидные преимущества, среди них:

- низкая величина коэффициента затухания DF (Dissipation Factor) = низкое значение ESR = малые потери;
- высокий уровень импульсных токов = «сухая» конструкция = нет «испаряемых» материалов;
- эффект самовосстановления в определенных пределах.

Ключевые параметры силовых пленочных DC-конденсаторов

Широкий температурный диапазон

Максимальная температура «горячей точки» T_{hs} внутри пленочных конденсаторов ограничена на уровне +105 °C (для серийно используемых полипропиленовых (ПП) пленок). Хотя максимальное значение саморазогрева ПП емкостей составляет +20 °C, температура радиатора не должна превышать +85 °C. Существуют пленочные материалы, рассчитанные на +125 °C, но их стоимость, а также размеры делают их непривлекательными по технологическим и коммерческим показателям. Как и в отношении любых других элементов силовой электроники, необходимо тщательно анализировать условия охлаждения ПП емкостей. Превышение максимальной температуры (+105 °C) внутри каждого из элементов конденсатора приведет к повреждению или значительно сократит срок службы.

Температура T_{hs} определяется на основании величины теплового сопротивления методом расчета или измерения нагрева поверхности. Полученный результат будет близок к температуре внутри конденсатора, поскольку ПП емко-

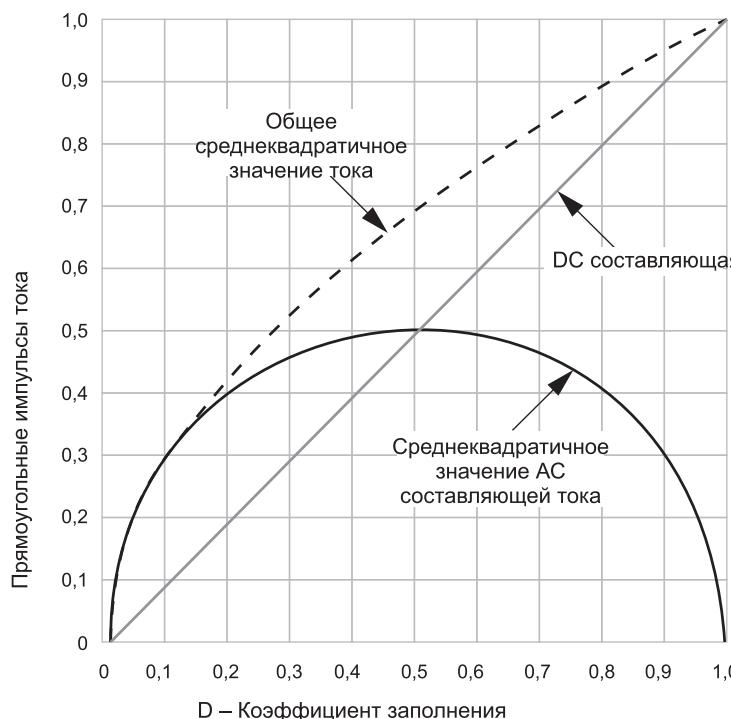


Рис. 3. Амплитуда пульсаций снижается по обе стороны от коэффициента заполнения D = 50%

сти для звена постоянного тока имеют большие габариты и нагреваются очень медленно по сравнению с полупроводниковыми приборами. Тем не менее DC-шина в автомобильных инверторах должна охлаждаться и устанавливаться на радиатор. В лучшем случае охлаждающая жидкость должна сначала пройти через зону установки конденсаторов, а потом уже — полупроводниковых ключей, что позволит соблюсти все температурные ограничения с учетом рассеиваемой мощности. Еще один фактор, который следует учитывать при выборе конденсаторов, — снижение допустимого тока в зависимости от температуры и рабочего напряжения. Необходимые графики и методики расчета приводятся в технических спецификациях.

Другими важными факторами помимо температуры являются влажность, механические (вибрационные) воздействия и в некоторых случаях даже химическое загрязнение. При использовании EMI-фильтра для снижения уровня помех инвертора, например TDK CarXield, он также нуждается в охлаждении для достижения максимальной эффективности в длительном режиме работы.

Расчет параметров емкости

Основным критерием выбора конденсатора становится нагрузка, определяющая уровень импульсных токов, и результирующее пульсирующее напряжение. Максимальный импульсный ток, который конденсатор должен выдерживать без перегрева из-за рассеяния в ESR (эквивалентном последовательном сопротивлении), часто является определяющим фактором. В большинстве случаев это приводит к тому, что необходимая величина емкости значительно превышает минимальные расчетные значения.

$$I_{Crms} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} m \times I_{Mrms} \cos \varphi = \\ = 1,22 \times 0,5 \times 0,8 \times I_{Mrms} = 0,5 I_{Mrms}$$

Импульсный ток I_{Crms}

Переменный ток, протекающий через ESR конденсатора, приводит к его нагреву.

Формула 1. Упрощенный метод вычисления I_{Crms}

Допущения:

- I_{Mrms} (I_{Phx}) = фазный ток мотора, А
- $\cos \varphi \approx 0,8$ (типовое значение коэффициента мощности)
- m = коэффициент модуляции (наихудший случай) = 0,5

Пример:

$$I_{Mrms} = 250 \text{ A}$$

$$I_{Crms} = 1,22 \times 0,5 \times 0,8 \times 250 = 0,5 \times 250 = 125 \text{ A}$$

Film capacitors – Power electronic capacitors	
PCC, designed for Infineon HybridPACK™ Driv	
Infineon HP-Drive Characteristics	
C_R	650 $\mu\text{F} \pm 10\%$
V_R	500 V DC ²⁾
W_R	81 Ws
I_{max}	180 A ¹⁾⁽³⁾
L_{self}	10 nH
$\tan \delta_0$	$2 \cdot 10^{-4}$
ESR (10 kHz)	0.5 mΩ

Рис. 4. I_{Crms} с учетом температурных ограничений

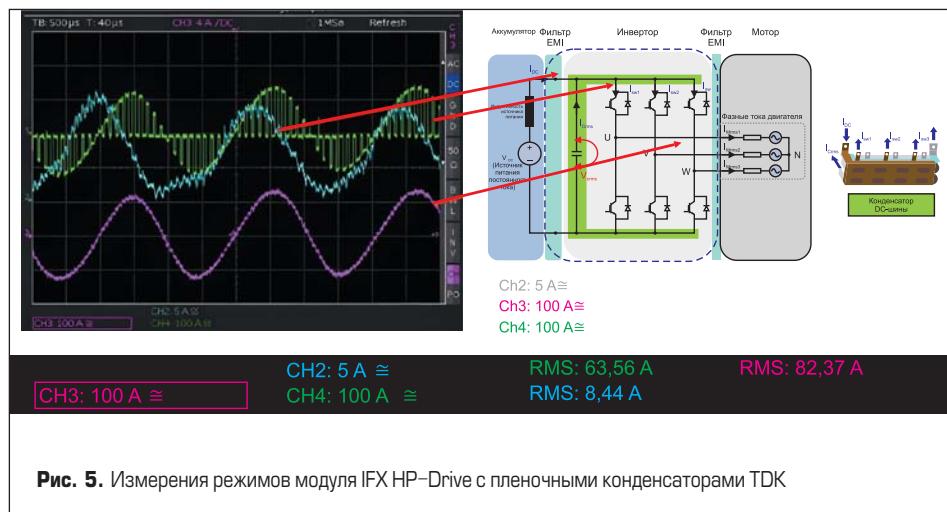


Рис. 5. Измерения режимов модуля IFX HP-Drive с пленочными конденсаторами TDK

Для 3-фазных систем предпочтительна следующая формула:

$$I_{Crms} = 1,3I_{Mrms}/2$$

Формула 2. Наиболее часто используемый метод упрощенного расчета среднеквадратичного тока конденсатора (I_{Crms})

Пример:

$$I_{Crms} = 1,3 \times 250 \times 0,5 = 1,3 \times 125 = 162,5 \text{ А}$$

С помощью полученных таким образом значений тока пульсаций и ограничений, приведенных в спецификации (рис. 4), можно выбрать элемент, оптимальный для конкретной задачи. На рис. 5 показаны примерные формы токов ШИМ-инвертора: кривые CH2 и CH4 получены с помощью петли Роговского, а измерение CH3 проводилось активными токовыми AC/DC-клещами.

CH2 — ток, потребляемый от DC источника, в данном случае от батареи. Амплитуда изменяется на частоте выходного сигнала, на нее накладываются пульсации на частоте

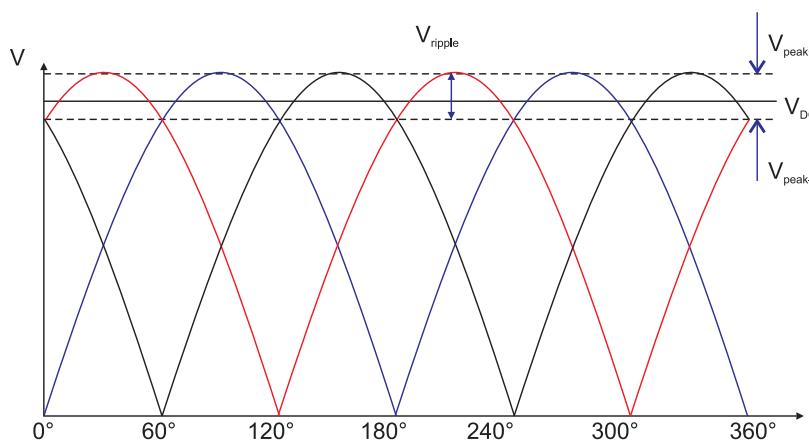


Рис. 6. Упрощенный вид пульсаций напряжения на DC-шине (V_R) Номинальное DC напряжение $V_R = V_{DC}$ Максимальный уровень пульсаций $V_{\text{ripple}} = V_R = V_{pp} = V_{pkpk}$

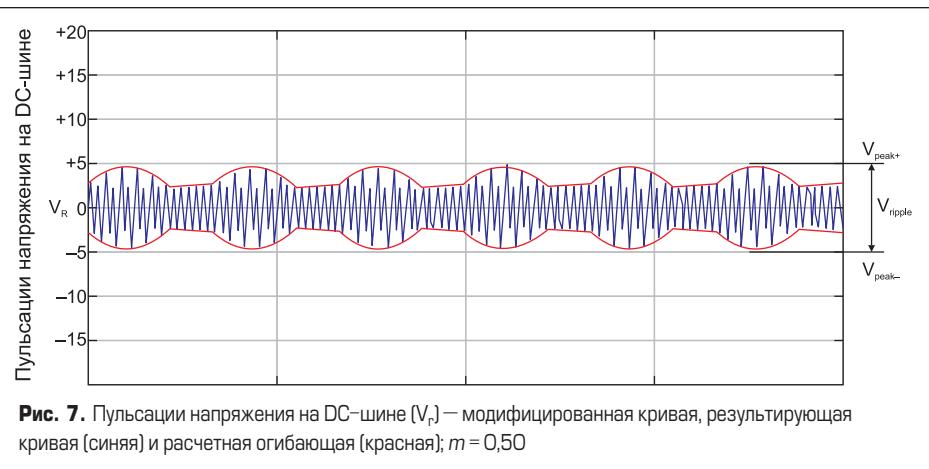


Рис. 7. Пульсации напряжения на DC-шине (V_R) — модифицированная кривая, результирующая кривая (синяя) и расчетная огибающая (красная); $m = 0,50$

переключения. Уровень пульсаций тока зависит от емкости DC-шины и индуктивности рассеяния цепи питания.

CH3 — фазный ток с пульсациями от широтно-импульсной модуляции, их амплитуда в основном зависит от индуктивности нагрузки.

CH4 — ток, изменяющийся на частоте ШИМ, потребляемый от конденсатора DC-шины в полумосте. Этот ток поступает на индуктивность нагрузки, его форма определяется широтно-импульсной модуляцией полупроводниковых ключей, а также огибающей выходного сигнала.

В данном случае используется специальный конденсатор, разработанный для модуля HP-Drive, и из-за специфических условий его подключения можно измерить только ток в одном полумостовом каскаде.

Пульсации напряжения V_r

Объяснение используемых в формулах параметров дано на рис. 6 (упрощенный вид) и рис. 7.

Формула 3. Упрощенный расчет пульсаций напряжения на конденсаторе

Если, например, производитель указывает напряжение пульсаций (V_r) как ± 12 В, то пиковое значение (V_{pk}) составляет 12 В, а размах (peak-peak) будет 24 В.

$$V_{Crms} = V_{pk} \times 0,7071 = 12 \times 0,7071 = 8,48 \text{ В}$$

Емкость конденсатора

Расчет емкости C предполагает наличие информации о частоте (Гц) или длительности периода в секундах (s).

$$f = 1/\tau \rightarrow \omega = 2\pi f$$

Уточненное выражение:

$$\begin{aligned} C2\pi f &= I_{Crms}/V_{\text{ripple}} \\ 1/(C2\pi f) &= V_{\text{ripple}}/I_{Crms} \end{aligned}$$

Получаем выражение для C :

$$C = \frac{I_{Crms}}{2\pi f V_{\text{ripple}}}, \text{ мкФ}$$

Формула 4. Расчет емкости конденсатора (предполагается, что это более реалистичное выражение)

Пример:

$$V_R \text{ или } V_{DC} = 400 \text{ В}$$

$$f = 10 \text{ кГц}$$

$$I_{Crms} = 180 \text{ А}$$

$$V_{peak-peak} = V_{\text{ripple}} = 8 \text{ В}$$

$$DC = m = 0,5$$

Оценка величины емкости:

$$C = \frac{I_{Crms}}{2\pi f V_{\text{ripple}}} =$$

$$= \frac{180}{2 \times 3,14 \times 10 \times 1000 \times 8} = 358 \text{ мкФ}$$

Рассеиваемая мощность

Конденсатор DC-шины (C_{DC}) подвергается внутреннему нагреву, который увеличивается по мере роста частоты пульсаций тока в полупроводниковых ключах. С помощью приведенного выше примера рассчитаем потери в силовом конденсаторе с низким значением ESR (например, ~0,5 мОм):

$$P_C = P_{Crms} \times R_{CESR}$$

**Формула 5:
Мощность рассеяния конденсатора**

$$P_C = 180^2 A \times 0,5 \text{ мОм} = 32400 \times 0,0005 = 16,2 \text{ Вт}$$

Емкость C_{DC} для инвертора мощностью 100 кВт (подтверждено практическими результатами):

$$\begin{aligned} 650 \text{ мкФ для } V_{DC} = 450 \text{ В} \rightarrow C_{DC} = 650 \text{ мкФ}/500V_r \\ 400 \text{ мкФ для } V_{DC} = 800 \text{ В} \rightarrow C_{DC} = 400 \text{ мкФ}/855V_r \end{aligned}$$

Общие потери в конденсаторах и их перегрев зависят от следующих основных факторов:

- саморазогрев;
- ток DC в силовых шинах;
- эффективность отвода тепла от полупроводников;
- эффективность системы охлаждения;
- время работы.

Заключение

Выше описан процесс предварительного расчета значения емкости конденсатора DC-шины. Следует помнить, что правильность выбора должна подтверждаться измерениями режимов работы готового изделия в конкретных условиях применения. Далее будет рассмотрен анализ тепловых режимов, необходимый для предотвращения перегрева и исключения непредвиденных, связанных с этим отказов.

Основные проблемы**Увеличение емкости не приводит к снижению пульсаций напряжения**

Как показано на рис. 8, избыточное увеличение емкости не приводит к эффективному снижению уровня пульсаций. Допустимая амплитуда напряжения пульсаций ~ 12 В достигается при $C_{DC} \times 350$ мкФ. Использование емкости в диапазоне 500–650 мкФ, по-видимому, является хорошим решением, позволяющим справиться с пульсациями тока в емкости. Дальнейшее увеличение C_{DC} неэффективно с точки зрения затрат.

Резонансные процессы приводят к потерям в конденсаторе

Резонансные процессы в контурах, образованных конденсаторами DC-шины и ключами инвертора, формируют широкий частотный спектр. Обычно для инверторов с частотой коммутации до 10 кГц измерения спектральных составляющих тока проводятся в диапазоне 100 кГц. Результаты подобного анализа

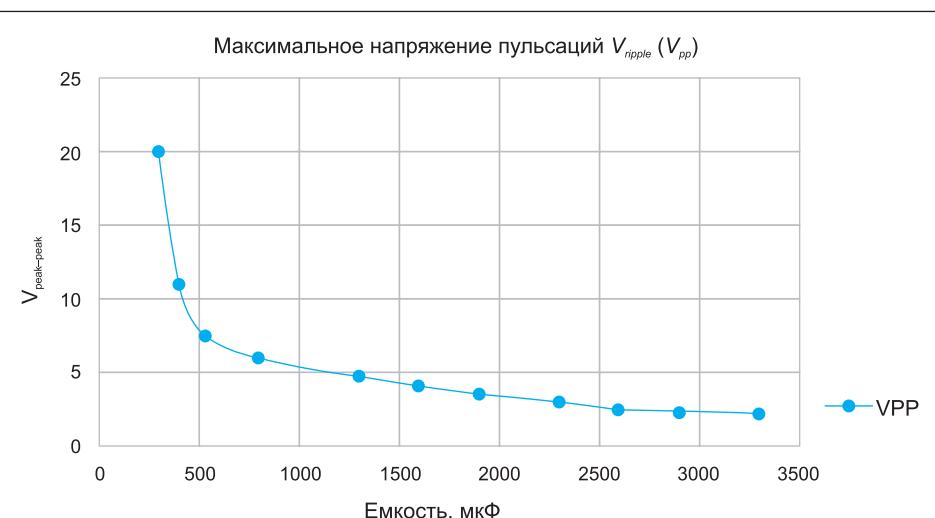


Рис. 8. Пример: зависимость амплитуды пульсаций от емкости

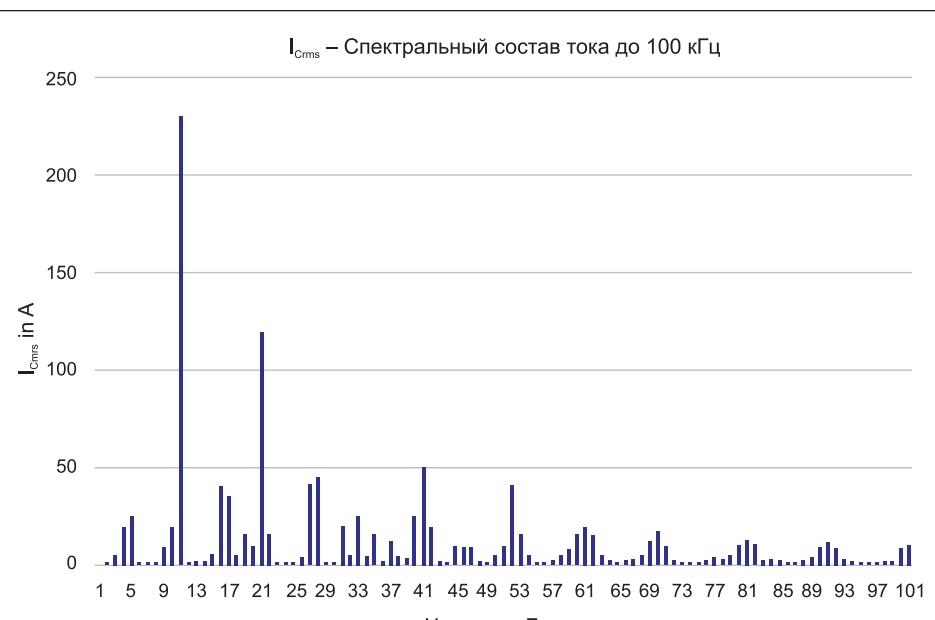


Рис. 9. Амплитуда составляющих $I_{C rms}$ до 100 кГц

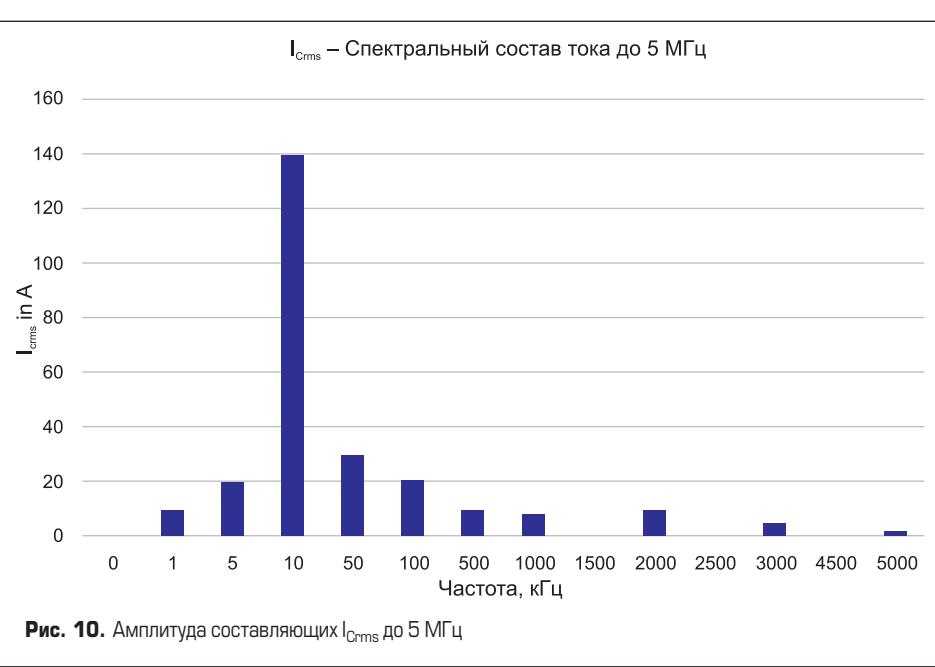


Рис. 10. Амплитуда составляющих $I_{C rms}$ до 5 МГц

показаны на рис. 9, и они кажутся хорошими. Однако здесь не исключена ситуация, когда конденсатор «неожиданно» выйдет из строя из-за перегрева, поскольку показанный спектр, очевидно, не отражает всех особенностей даже хорошо спроектированной системы.

Рассмотрим более широкий частотный диапазон до 5 МГц (рис. 10).

При использовании «сверхбыстрых» (Ultrafast) IGBT и тем более полупроводников с широкой запрещенной зоной (SiC) частота коммутации может достигать 20 кГц и выше. В этом случае мы получаем еще и более высокие значения di/dt и dv/dt по сравнению с обычными IGBT, традиционно применяемыми в моторных приводах. Основные потери, генерируемые при коммутации полупроводниковых ключей, в этом случае распространяются на частоты выше 100 кГц, поэтому имеет смысл рассматривать более широкую полосу частот. Как минимум она должна охватывать все гармоники ШИМ, амплитуда которых превышает 10% от общего I_{rms} (такие есть в диапазоне до 300 кГц или даже единиц МГц). Что здесь наиболее важно?

Пример: рассмотрим ESR силового пленочного конденсатора и то, как этот параметр изменяется с частотой:

- ESR @ 10 кГц ~ 1×ESR (в соответствии со спецификацией)

- ESR @ 50 кГц ~ 2×ESR@10 кГц
- ESR @ 50–100 кГц ~ 4×ESR@10 кГц
- ESR @ 100–300 кГц ~ 6×ESR@10 кГц

Соответственно при соблюдении вышеупомянутых соотношений потери мощности в конденсаторах DC-шины резко возрастут:

$$P_C = P_{Crms} \times R_{CESR}$$

значение ESR должно быть низким для всех спектральных составляющих тока. Это необходимо учитывать при выборе конденсатора.

Некоторые другие соображения

- Даже при наличии опыта бывает очень не просто оценить спектральный состав тока заранее.
- Спектр гармоник зависит от способа импульсной модуляции (ШИМ) и других параметров инвертора.
- На конденсаторы звена постоянного тока в инверторах транспортных приводов очень сильно влияют процессы коммутации полупроводниковых ключей и соответствующие переходные процессы, а также эффект звона с гармониками высокого порядка, которые трудно предсказать.

Выбор подходящего конденсатора требует использования классических электротехни-

ческих подходов и создания точной модели, учитывающей паразитные эффекты силового каскада и конденсатора. Это очень сложная задача по своей природе, однако передовой опыт и знания помогают значительно сократить время проектирования.

Литература

Поскольку в статье описаны продукты, используемые в течение длительного времени, большинство формул и изображений упоминаются как стандартные во многих публикациях без каких-либо ссылок.

1. www.ti.com/lit/an/slta055/slta055.pdf
2. www.electronics-tutorials.ws/de
3. Rohde & Schwarz Tutorial PWM. www.youtube.com/watch?v=nXFoVSN3u-E
4. Vujacic M., Hammami M., Srndovic M., Grandi G. Analysis of dc-Link Voltage Switching Ripple in Three-Phase PWM Inverters // Energies. 2018. vol. 11(2).
5. Modular Inverter — MOD.INV/MIB by MankelEngineering.de Bodo's Power Systems magazine 10/2022.
6. TDK Data sheet Automotive Power Film Capacitor.
7. www.rambow-technolgy.com
8. www.mankel-engineering.de

Модифицированный корпус TO-247-4i с внутренней изоляцией для высоковольтных SiC MOSFET AMG Power



Компания AMG Power анонсировала выпуск нового высоковольтного SiC MOSFET в корпусе TO-247-4i с внутренней изоляцией — A2G60N1200MT4i. Этот транзистор предназначен для применения в широком спектре высокотехнологичных устройств, включая солнечные инверторы, преобразователи для железнодорожного и подземного транспорта, промышленные источники питания и быстрые зарядные станции.

Основные характеристики транзистора:

- максимальный продолжительный ток стока: 60 А;
- напряжение сток-исток: до 1200 В;
- снижение температуры корпуса (T_c) на 10 °C в сравнении со стандартным корпусом TO-247-4 с внешней изоляцией;
- повышенная устойчивость к тепловым циклам.

В новом корпусе TO-247-4i предусмотрена специальная технология упаковки, которая изолирует рамку, поддерживающую чип, от радиатора на задней стороне MOSFET, что обеспечивает электрическую изоляцию между стоком MOSFET и радиатором и значительно снижает общее тепловое сопротивление устройства.

Преимущества внутренней изоляции:

- снижение теплового сопротивления: внутренняя изоляция позволяет монтировать корпус транзистора напрямую на радиатор, что уменьшает тепловое сопротивление и улучшает теплоотвод;
- компенсация теплового расширения: внутренний изолирующий слой компенсирует разницу в коэффициентах теплового расширения между кристаллом и медным каркасом, снижая рассогласование и повышая устойчивость к тепловым циклам;
- упрощенный монтаж и экономия материалов: усовершенствованный корпус со встроенной изоляцией значительно облегчает монтаж, снижает производственные затраты и экономит материалы.

Технические характеристики:

- большая подвижность электронов в карбиде кремния обеспечивает высокие динамические характеристики системы;

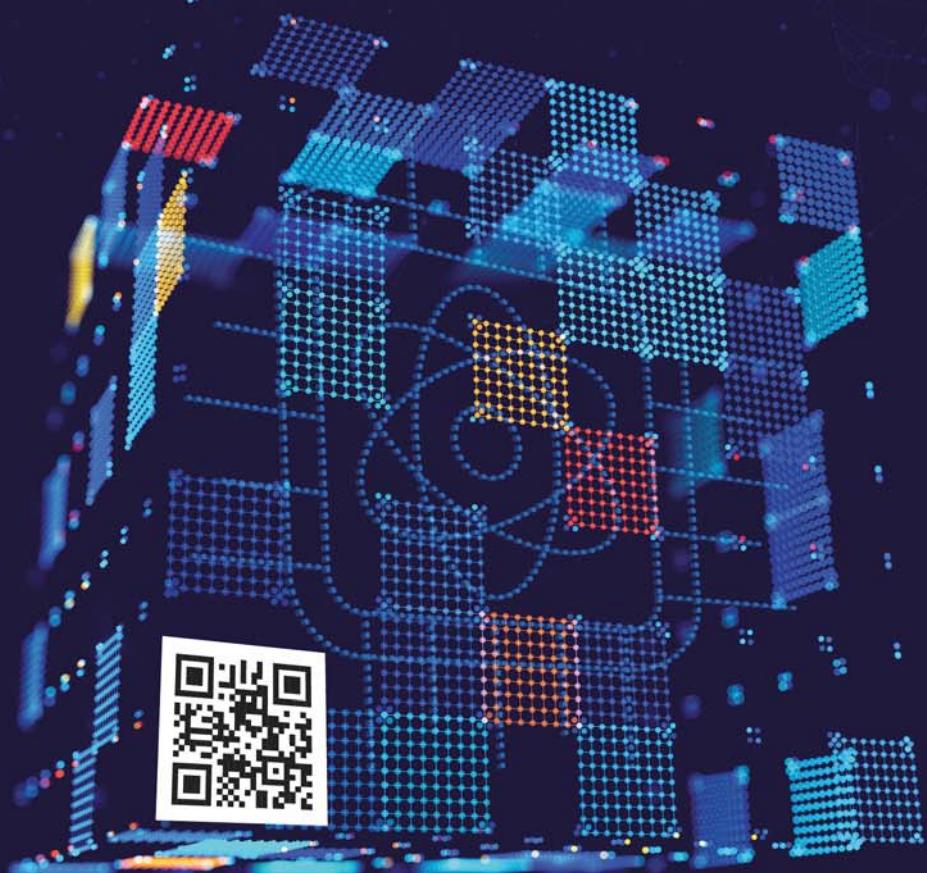
- компактная внутренняя компоновка снижает паразитную индуктивность в силовой цепи, что улучшает общую производительность системы;
- высокое запирающее напряжение при низком сопротивлении в открытом состоянии ($R_{DS(on)}$) обеспечивает эффективную работу транзистора;
- стабильная работа в температурном диапазоне $-55\dots+175$ °C позволяет использовать транзистор в различных климатических условиях;
- оптимизированный корпус с изолирующей поверхностью обеспечивает надежную и долговечную работу устройства;
- изолирующее напряжение 2500 В при частоте 50/60 Гц и времени испытания 60 с гарантирует безопасность и надежность работы транзистора.

Высоковольтный SiC MOSFET A2G60N1200MT4i в корпусе TO-247-4i с внутренней изоляцией от AMG Power — это революционное решение для компактных и надежных систем преобразования энергии. Благодаря своим уникальным техническим характеристикам и преимуществам транзистор открывает новые возможности для разработчиков и производителей высокотехнологичных устройств.

<https://macrogroup.ru/>



XXV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
& ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**



10-12
СЕНТЯБРЯ
2025

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
КВЦ ЭКСПОФОРУМ

- ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
- НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ
- ПЕРЕДОВЫЕ АРХИТЕКТУРЫ
- НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ
- СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ

СОЗДАВАЙТЕ НОВОЕ!

ОРГАНИЗАТОР:



18+

Применение драйверов с динамическим управлением затвором повышает эффективность привода электромобиля

Функция динамического управления затвором драйвера GD3162 NXP обеспечивает оптимальные динамические характеристики современных силовых полупроводниковых приборов (SiC, GaN) во все более широких рабочих диапазонах. Динамическое управление повышает эффективность инвертора, дает надежное решение для поддержания функциональной безопасности и улучшает аппаратную реализацию защиты силового модуля.

Трэвис Александр¹

Перевод: Иван Сергеев



Отличительными чертами электрического транспортного средства (EV) являются аккумулятор и тяговый электродвигатель, но эти два элемента требуют наличия третьего, не менее важного узла — тягового преобразователя. Тяговый инвертор получает энергию от аккумулятора и преобразует напряжение постоянного тока батареи в сигнал переменного тока для приведения двигателя в действие.

Рынок электромобилей в настоящее времяочно сформирован, но технологии EV еще далеки от совершенства. По-прежнему возможны улучшения в части производительности, надежности и безопасности электромобилей, и автомобильная промышленность продолжает активно их совершенствовать. Значительное внимание уделяется технологиям производства аккумуляторов и двигателей, но инновации в области тяговых инверторов имеют не меньшее значение.

Недавно на рынке появились драйверы затворов для тяговых инверторов, способные адаптироваться к нескольким предварительно заданным значениям тока, соответствующим условиям работы EV.

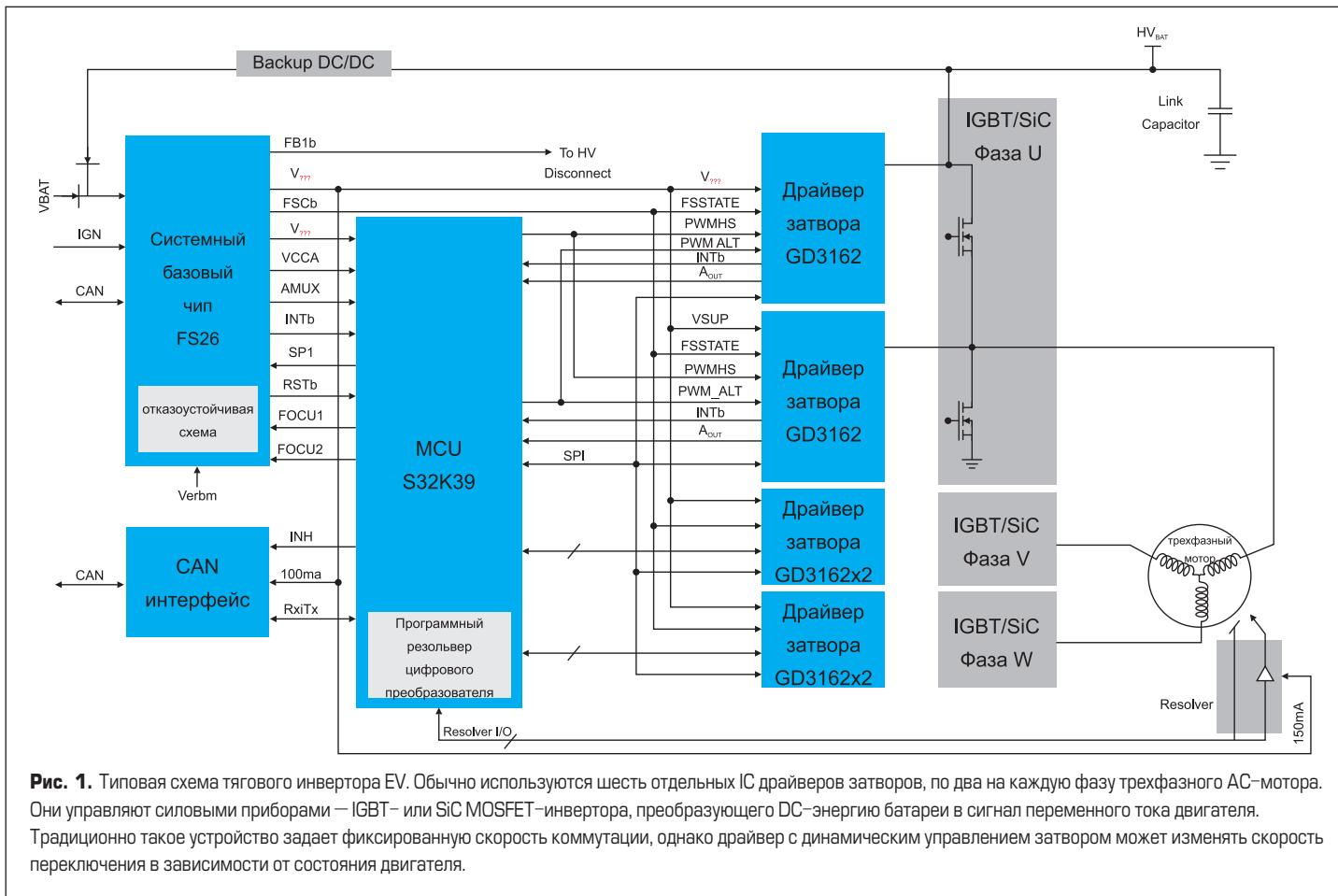
Другими словами, во всех режимах нагрузки эти устройства обеспечивают требуемую динамическую мощность затвора, и одним из первых примеров является GD3162 от NXP.

Возможность изменения параметров затвора позволяет системе управления инвертором оптимизировать скорость коммутации силового каскада в соответствии с текущей нагрузкой двигателя. Это важно, например, при очень низкой температуре окружающей среды (влияющей на динамические параметры силового прибора) или при рекуперативном торможении (что может увеличить напряжение на DC-шине и привести к перегрузке по напряжению). Соответственно, EV с приводом, оснащенным такой функцией, будет иметь определенные преимущества.

Ключевое преимущество этого решения — повышение общей эффективности привода электромобиля. Кроме того, применение адаптивной схемы делает систему более безопасной, улучшая при этом критерии проектирования в отношении защиты силовых приборов. Пользователи сами решают, как воспользоваться возможностями повышения эффективности, например, OEM-производитель может применить данную опцию для увеличения пробега электромобиля на небольшую, но измеряемую величину.

Драйверы затворов

Тяговый инвертор электромобиля должен обеспечивать высокую мощность, как правило, в диапазоне от 80 более чем до 200 кВт, работать в условиях высоких температур и быть легким и компактным. Драйверы затворов управляют силовыми модулями инвертора, традиционно это кремниевые IGBT, но основной тенденцией последнего времени становится переход на MOSFET-транзисторы на основе



карбида кремния (SiC). Задача силового каскада инвертора — преобразование энергии постоянного тока от батареи в AC-сигнал, поступающий на двигатель.

Тяговый инвертор EV обычно включает шесть дискретных интегральных драйверов и шесть силовых ключей, по два на каждую фазу трехфазного AC-двигателя (рис. 1). Входные сигналы драйверов затворов, в том числе команды усиления, формируются управляющим контроллером тягового инвертора.

Пиковый ток заряда/разряда затворов ограничивается резисторами затворов, установленных между выходами драйверов и силовыми ключами. Традиционно для защиты затворов от перенапряжения используются фиксированные уровни сигнала, что повышает экономичность системы в номинальных условиях работы.

Динамическое управление затвором

Возможность изменения скорости включения и выключения затвора дает множество потенциально полезных эффектов как для самого силового прибора, так и для двигателя.

Возможности силовых приборов достаточно хорошо описаны, однако при работе транспортного средства возникает целый ряд условий, влияющих на их электрические характеристики. Сюда входит, в частности, изменение тока двигателя, напряжения аккумулятора/шины питания и температура силовых приборов. Настройка тока затвора является средством управления режимом переключе-

ния (энергией) для конкретных условий, что имеет неоценимое значение для повышения эффективности в любых условиях (рис. 2).

Производительность инвертора (и, следовательно, автомобиля в целом) может быть выше, если существует возможность выбирать режим коммутации в зависимости от условий движения, которую дает опция динамического управления затвором. Такую возможность

предоставляет драйвер NXP GD3162, для чего в устройстве предусмотрены дополнительные выводы. Добавлено два контакта для режима включения и два для режима выключения, они могут быть использованы независимо. Это дает возможность сделать выбор между выводами с выходным током примерно до 10 или до 20 A, а при их совместном подключении ток возрастает примерно до 30 A.

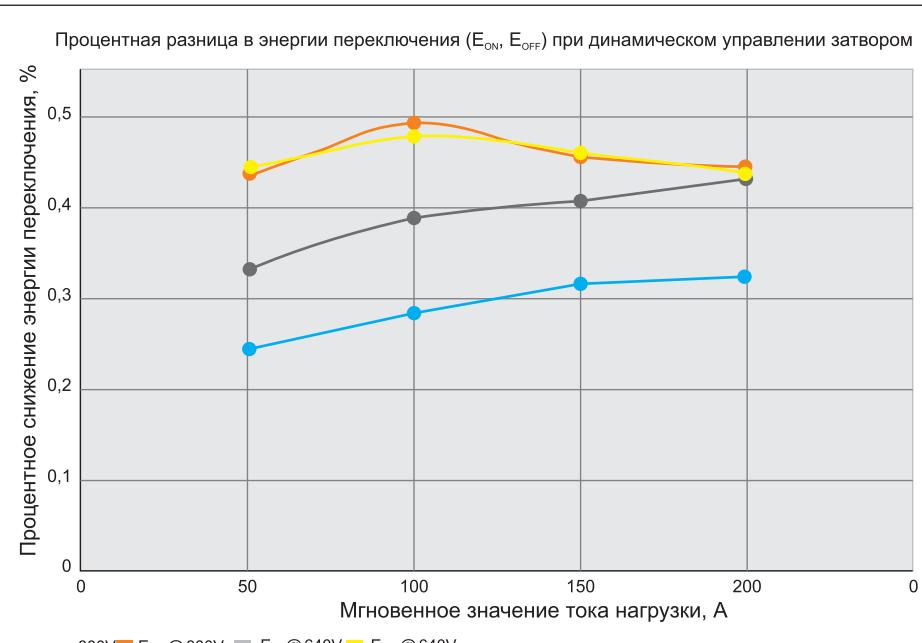


Рис. 2. Сравнение E_{ON}/E_{OFF} при различных токах нагрузки

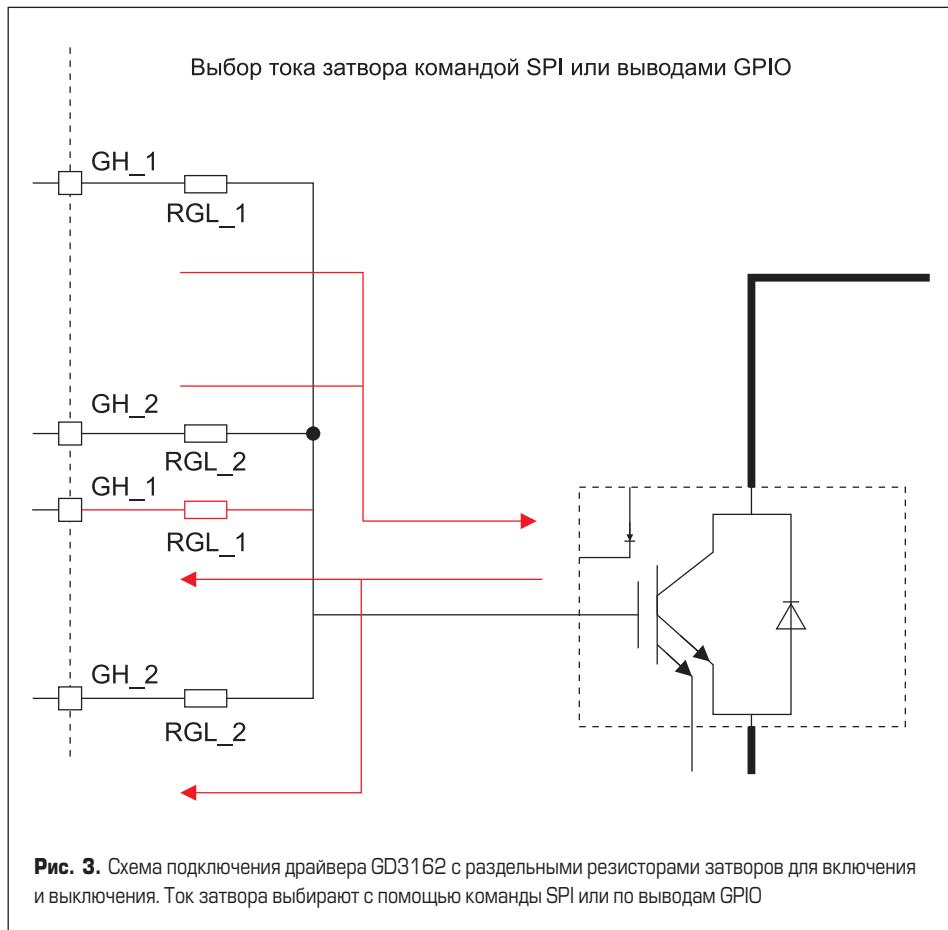


Рис. 3. Схема подключения драйвера GD3162 с раздельными резисторами затворов для включения и выключения. Ток затвора выбирают с помощью команды SPI или по выводам GPIO

Почему «примерно»? На практике OEM-производитель оборудования или разработчик системы, скорее всего, устанавливают резистор затвора, ограничивающий ток на уровне чуть меньше 10, 20 или 30 А, в зависимости от пред-

поговорок производителя и других системных ограничений. Ток затвора можно регулировать с помощью цифровых входов или команды SPI (рис. 3). Таким образом, пользователь получает возможность направить на управ-

ление силовым прибором любую желаемую мощность. Благодаря широкому диапазону возможных токов управления затвором, GD3162 способен работать с несколькими параллельными силовыми ключами.

Драйвер GD3162 позволяет управлять током затвора в режиме реального времени без остановки двигателя.

Эффективность

Одной из причин выхода из строя силовых приборов является перенапряжение. Также, несмотря на то, что автоэлектроника рассчитана на работу в широком температурном диапазоне, рекомендуется ограничивать тепловую нагрузку на все электронные устройства электромобиля, включая драйверы IGBT/MOSFET.

Выбор резистора затвора обычно начинается с определения наихудших условий эксплуатации привода (например, максимальной нагрузки, максимального напряжения). Величина сопротивления должна быть достаточной для обеспечения безопасной работы при возникновении таких режимов. Это действительно сводит к минимуму потенциальный риск, однако наихудшие условия по своей сути нетипичны. Использование драйвера с динамическим управлением затвором, такого как NXP GD3162, позволяет обеспечивать безопасные настройки, соответствующие типовым (легким) условиям работы.

Система непрерывно оценивает множество системных факторов (ток, напряжение, температура и т. д.) и контролирует ток затвора, работая при одной настройке, которую производитель определяет как оптимальную для типовых условий. При возникновении нетипичных режимов устройство автоматически переключается на соответствующие настройки, а затем возвращается к типовым установкам, когда режимы работы становятся нормальными. Драйвер GD3162 обеспечивает системному интегратору возможность наилучшим образом защитить силовой прибор. Связанное с этим повышение эффективности в номинальных режимах обычной работы может быть значительным.

Повышение эффективности инвертора дает возможность снизить требования к системе охлаждения, что ведет к уменьшению габаритов и веса всего привода. Снижение массо-габаритных показателей автомобиля в целом в конечном итоге положительно сказывается на запасе хода.

Безопасность и надежность

Тяговые преобразователи имеют критическое значение для обеспечения безопасности и, как правило, соответствуют требованиям ASIL D. Интегральные драйверы затворов вносят заметный вклад в обеспечение функциональной безопасности инвертора. Класс защиты GD3162 — ASIL C/D соответствует стандарту AEC-Q100 класс 1, то есть он полностью удовлетворяет требованиям,

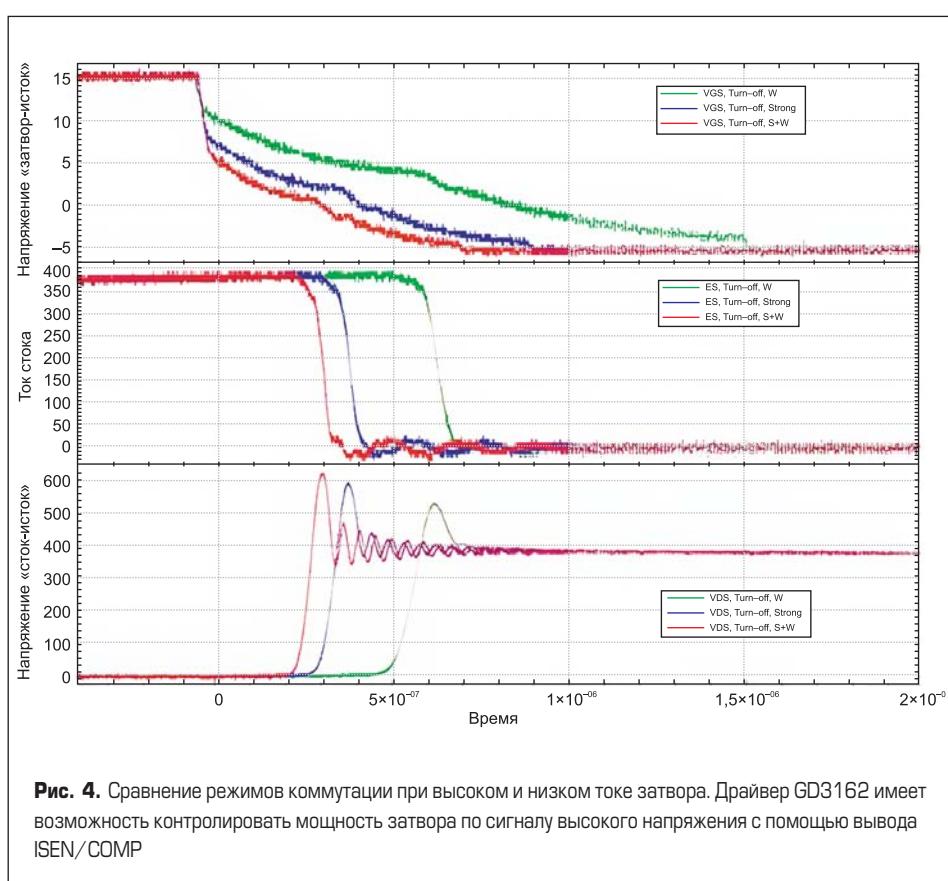


Рис. 4. Сравнение режимов коммутации при высоком и низком токе затвора. Драйвер GD3162 имеет возможность контролировать мощность затвора по сигналу высокого напряжения с помощью вывода ISEN/COMP

предъявляемым к автомобильной электронике.

Драйвер GD3162 имеет два вывода для включения и выключения, что повышает его надежность в случае вероятного повреждения резистора затвора. Устройство также сообщает по запросу о режиме работы цепи затвора, защищая его от случайных отказов или сбоев в режиме реального времени в командах динамического управления.

Решения NXP для тяговых инверторов

Усовершенствованный одноканальный драйвер затвора с гальванической развязкой GD3162 предназначен для управления новейшими SiC- и IGBT-модулями тяговых инверторов в аккумуляторных электромобилях, гибридных автомобилях и других транспортных средствах с электроприводом.

В драйвере GD3162 реализована функция динамического контроля затвора, обеспечивающая значительное повышение эффективности и безопасности. Это устройство имеет автономные расширенные программируемые функции защиты и управления, поскольку информация о неисправностях, состояниях силового прибора и самого драйвера выдается через контакты прерывания и SPI.

Схема GD3162 разработана для высоконадежных систем обеспечения безопасности (ASIL C/D) и отвечает строгим требованиям, предъявляемым к автомобильной технике, поскольку полностью соответствует

стандарту AEC-Q100 класс 1. В целом система тягового инвертора NXP EV от NXP включает многоядерный микроконтроллер MCU S32K39, блоки обеспечения безопасности FS26, интерфейсы CAN TJA1462, TJA1103 Ethernet PHY и высоковольтные драйверы GD3162, обеспечивающие управление силовым инвертором тягового двигателя с высокой эффективностью и надежностью.

Системное решение NXP также предусматривает широкий набор программных пакетов для управления двигателем, дополняющих оптимизированную аппаратную реализацию. Использование описанных выше опций в тяговых инверторах EV обеспечивает прецзионное управление, мониторинг и защиту силовых ключей, повышает энергоэффективность и надежность привода. Система гарантирует точное и эффективное регулирование частоты вращения двигателя и крутящего момента и полностью соответствует требованиям стандарта ISO 26262.

Для помощи в разработке тяговых преобразователей и ускорения вывода их на рынок, NXP предлагает справочную платформу «EV Power Inverter Control Reference Platform» с программным обеспечением. Эти средства проектирования содержат схемы, спецификации, файлы компоновки плат и документацию по технике безопасности для использования изделия совместно с модулями IGBT или SiC MOSFET.

Для ознакомления с работой GD3162 предлагается оценочная плата FRDMGD3162HBIEVM (EVB). Пользователи могут оценить эффект

от применения различных сопротивлений затвора, изменив их номинал на EVB, а также протестировать влияние динамического управления затвором с помощью GD3162.

Заключение

Иновационная IC управления затвором GD3162 предоставляет производителям электромобилей возможность кардинально улучшить параметры тяговых преобразователей. Функция динамического управления затвора поддерживает оптимальные характеристики переключения современных силовых приборов (SiC, GaN) во все более широких рабочих диапазонах. Использование этой опции GD3162 повышает эффективность инвертора, способствует обеспечению функциональной безопасности системы и улучшает стандарты защиты силовых модулей.

Литература

- www.nxp.com/products/power-management/motor-and-solenoid-drivers/powertrain-and-engine-control/advanced-high-voltage-isolated-gate-driver-with-dynamic-gate-strength-control:GD3162
- Gate Driver with dynamic gate voltage (GD3162) fact sheet (PDF). www.nxp.com/docs/en/fact-sheet/GD3162FSA4.pdf
- Evaluation kit product page. www.nxp.com/design/design-center/development-boards/analog-toolbox/gd3162-half-bridge-evaluation-kit:FRDMGD3162HBIEVM

информационные технологии и электроника для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры



18-я международная выставка



ЭЛЕКТРОНИКА
ТРАНСПОРТ

2025

28-30 апреля
Москва
Экспоцентр

+7 (495) 287-44-12

info@e-transport.ru

www.e-transport.ru

Применение фильтров EMI

В промышленном оборудовании и медицинской технике

В современном технологически ориентированном мире электроника играет ключевую роль в повседневной жизни. Изобилие электронных устройств от смартфонов до промышленного оборудования создало необходимость эффективной фильтрации электромагнитных помех (EMI — Electromagnetic Interference) и обеспечении электромагнитной совместимости (EMC — Electromagnetic Compatibility). Фильтры EMI поддерживают гармоничную работу электронных устройств, подавляя нежелательные электромагнитные излучения и исключая сбои от их воздействия. В статье рассматриваются фундаментальные вопросы EMI/EMC, нормативные положения и практические приложения, что дает представление о важности подавления EMI в нашем все более электронном мире. Также приводятся рекомендации по выбору фильтров для конкретных применений.

Том Тиллман
(Tom Tillman)¹

Перевод: Иван Сергеев

Что такое EMI и EMC?

Работа электронных приборов создает электромагнитное излучение, которое может негативно влиять на работу других устройств. Для нормального совместного функционирования электронных систем они должны иметь хорошие параметры электромагнитной совместимости. Генерация помех связана с множеством факторов. Рассмотрим наиболее распространенные причины возникновения помех в источниках EMI.

Переходные процессы при переключении: возникающие в источниках питания и цифровых схемах переходные процессы связаны с резким изменением тока или напряжения в силовых ключах. Эти быстрые изменения di/dt и dv/dt создают высокочастотные гармоники, являющиеся причиной электромагнитного излучения.

Тактовые сигналы: в цифровой электронике тактовые сигналы синхронизируют работу различных компонентов. Быстрые фронты нарастания и спада

этих сигналов создают широкий спектр гармоник, вносящих свой вклад в EMI.

Функциональные электромагнитные поля: двигатели, трансформаторы и другие индуктивные компоненты генерируют электромагнитные поля в процессе своей работы. Флуктуации этих полей наводят токи в близлежащих токопроводящих цепях.

Гармоники сигналов: нелинейные элементы, такие как диоды и транзисторы, искажают форму сигналов, создавая гармоники, которые распространяются в радиочастотном диапазоне и могут излучаться устройством или передаваться по токопроводящим цепям, вызывая помехи.

Говоря о EMI и EMC, важно понимать некоторые ключевые терминологические различия:

- **EMI и EMC.** Электромагнитные помехи (EMI) — это нежелательная электромагнитная энергия, излучаемая устройством, в то время как электромагнитная совместимость (EMC) — это способность устройства должным образом функционировать в электромагнитной среде, не создавая электромагнитных помех и не подвергаясь их воздействию.
- **Излучение и помехоустойчивость (Emissions и Immunity).** Излучение — это электромагнитная энергия, генерируемая устройством, которая потенциально может создавать помехи для других устройств. С другой стороны, помехоустойчивость — это способность устройства противостоять внешним электромагнитным помехам без снижения производительности.
- **Помехи излучения и помехи проводимости.** Помехи излучения распространяются по воздуху или в космическом пространстве, помехи проводимости распространяются по проводящим материалам, таким как провода или кабели. Каждый тип излучения требует определенных стратегий для борьбы с ним.



Нормативы и стандарты

Распространение электронных устройств потребовало принятия строгого законодательства для обеспечения их безопасной и гармоничной работы. Законодательство требует соблюдения специальных стандартов по уровню электромагнитных помех (EMI) и электромагнитной совместимости (EMC), применимых к производителям и разработчикам электронного оборудования. Понимание этих нормативов имеет решающее значение, поскольку несоблюдение требований может привести к судебным последствиям, отзыву продукции и ущербу репутации компаний.

Нормативы по электромагнитной совместимости варьируются в зависимости от региона, поэтому производителям важно понимать и соблюдать стандарты, характерные для каждого рынка, где они работают. Например, продукция, продаваемая в ЕС, должна соответствовать Директиве по EMC (2014/30/EU), в то время как продукция, продаваемая в США, должна отвечать требованиям стандарта FCC.

Многие нормативные акты требуют, чтобы производители сертифицировали свое оборудование на соответствие региональным регламентам с помощью признанного или авторизованного стороннего эксперта. Даже в регионах, где выпуск собственных деклараций технически допустим, целесообразно обратиться за оценкой к третьей стороне.

Применение фильтров EMI

Автономные фильтры EMI играют жизненно важную роль в повышении производительности и надежности сложных систем в промышленности и медицине. Рассмотрим подробнее некоторые распространенные области применения в этих секторах.

Источники питания и силовые преобразователи

Как в промышленности, так и в медицине источники питания должны обеспечивать постоянную и стабильную подачу электроэнергии. Фильтры EMI необходимы для предотвращения воздействия сетевых помех на оборудование, которое может их не выдержать. В то же время они нужны для того, чтобы высокочастотная энергия, генерируемая при коммутации силовых ключей, не попадала в сеть, где она потенциально может нарушить работу другого автономного оборудования, расположенного поблизости. Фильтры EMI в системах электроснабжения имеют решающее значение для подавления помех, вызывающих сбои в работе чувствительных устройств или приводящих к их отказам. Например, при производстве высокоточных систем даже незначительные проблемы с качеством электроэнергии могут привести к критическим производственным дефектам.

Вращающиеся машины

Большая часть общей электрической нагрузки в мире приходится на оборудование с вращающимися элементами. Насосы и дви-

гатели являются ключевыми компонентами многих бытовых систем — кондиционеров, холодильников, стиральных машин, а также промышленных устройств, в том числе лифтов, эскалаторов, автоматизированных станков или лабораторных приборов, например, центрифуг. Фильтрация электромагнитных помех повышает долговечность и предотвращает преждевременный износ, вызванный воздействием EMI.

В таких областях применения, как станки с ЧПУ или роботизированные манипуляторы, фильтрация обеспечивает более плавную работу и снижает затраты на техническое обслуживание. Двигатели и насосы также создают электрические помехи в расположенному поблизости оборудовании. Шумы обычно генерируются при переключении цепей управления асинхронными и синхронными машинами — например, в частотно-регулируемых приводах (ЧРП), а также в процессе работы коллекторных двигателей. Быстрая коммутация токов и напряжений приводит к генерации электромагнитных помех обоих типов: проводимости и излучения.

Передающие устройства

В промышленном коммуникационном оборудовании фильтры EMI играют определяющую роль в сохранении целостности сигнала. Они обеспечивают точность и отсутствие искажений данных, передаваемых между датчиками, PLC и системами управления. Это особенно важно в автоматизированных процессах, где обмен данными в режиме реального времени необходим для координации и эффективности работы систем.

Источники возобновляемой энергии

В системах возобновляемой энергии инверторам и DC/DC-конверторам отводится решающая роль, поскольку они преобразуют солнечную или ветровую энергию в сетевое напряжение. Как и в источниках питания, импульсные мощные преобразователи генерируют сильные электромагнитные поля, которые могут проявляться в виде помех излучения и проводимости. Такие поля — результат быстрого переключения силовых транзисторов и формирования крутых фронтов напряжения и/или тока. Они содержат широкий спектр частотных составляющих, включая высокочастотные гармоники, создающие помехи для работы расположенного рядом электронного оборудования.

Промышленное оборудование

Фильтры EMI в промышленном оборудовании поддерживают стабильность работы системы. Они способствуют тому, что электромагнитные шумы, создаваемые оборудованием, не влияют на точность систем управления или показаний датчиков. Это имеет решающее значение в таких процессах, как прецизионная обработка или автоматизированная сборка, где даже небольшие ошибки могут привести к существенным проблемам с качеством.

Медицинская техника

Медицинское обслуживание сопряжено с рядом уникальных рисков и проблем,

связанных с электромагнитными помехами и электромагнитной совместимостью, что обусловлено особенностями медицинского оборудования и необходимостью обеспечения безопасности пациентов.

Безопасность пациентов является главной задачей в сфере медицинского обслуживания. Электромагнитные помехи приводят к сбоям в работе или неточным показаниям медицинских приборов, что может иметь серьезные последствия — ошибочный диагноз, неправильное лечение. В работе медицинского оборудования существует потенциальный конфликт между несколькими устройствами, которые одновременно чувствительны к шумам и сами генерируют сильные шумы. Многие медицинские устройства очень восприимчивы к электромагнитным полям, действующим на такие устройства, как кардиостимуляторы, дефибрилляторы и нейростимуляторы. Это потенциально может привести к неправильной работе или выходу их из строя.

Больницы и клиники часто перегружены электронным оборудованием — это магнито-резонансные томографы, рентгеновские аппараты, компьютерные сканеры и различные устройства беспроводной связи, способные генерировать сильные электромагнитные поля. Производителям следует уделять особое внимание выбору EMI-фильтров для медицинского применения, поскольку в отношении характеристик таких фильтров действуют более высокие стандарты. В частности, их конструкция должна иметь повышенный уровень изоляции и меньшие токи утечки.

В отношении медицинской техники действуют строгие нормативные требования по EMC, обеспечивающие безопасную и эффективную эксплуатацию оборудования. Соблюдение этих стандартов является сложной задачей, что обусловлено разнообразием самих устройств и динамичным характером условий оказания медицинской помощи. Сфера медицинского обслуживания постоянно модернизируется, регулярно внедряются новые технологии и системы. Динамичный характер развития данной отрасли требует постоянной оценки рисков EMI и EMC и поиска решений, обеспечивающих безопасность и эффективность оборудования. Выбор подходящих фильтров электромагнитных помех для медицинской техники имеет первостепенное значение.

Выбор фильтра

Правильный выбор фильтра EMI зависит от понимания конкретных задач. Процесс начинается с проверки соответствия номинальных значений тока и напряжения условиям эксплуатации устройства. Отметим, что номинальный ток в установленном режиме — это не единственный параметр, который следует учитывать. Как правило, фильтр должен выдерживать ток короткого замыкания системы (SCR — Short Circuit Rating) в течение заданного времени, а уровень подавления, определяемые по вносимым потерям фильтра, — обеспечивать эффективное снижение

шумов. Также важно учитывать их частотный диапазон, поскольку задачей фильтра является подавление помех в пределах этого спектра.

Тип фильтра, будь то синфазный, дифференциальный, PI-фильтр, низкочастотный, высокочастотный или полосовой, зависит от характера шумов и области применения. Дифференциальные фильтры предназначены для ослабления помех, которые присутствуют между фазным и нейтральным проводом. Их причиной обычно становится высокая тактовая частота оборудования или процессора, а также влияние электронных компонентов с высокой скоростью коммутации. Электромагнитные отражения в проводниках, возникающие из-за несоответствия импедансов, могут создавать сильные дифференциальные токи. Фильтры данного типа используются и для подавления помех, наводимых между линейным, нейтральным проводниками и «землей». Эти шумы часто создаются электромагнитными помехами от внешних источников — радиочастотными или электромагнитными импульсами. Их причиной могут быть контуры заземления, длинные кабели или дисбалансы в электрической системе. Переходные процессы в силовых преобразователях создают как дифференциальные, так и синфазные помехи.

ПИ-фильтры (PI-фильтры), состоящие из последовательного (обычно индуктивного) и двух шунтирующих элементов (обычно емкостных), используются при необходимости ослабить как дифференциальный, так и синфазный шум. Они обеспечивают широкий спектр фильтрации и устанавливаются, как правило, в системах со сложной шумовой средой.

После определения типа фильтра и необходимых электрических характеристик следует рассмотреть его физические параметры — размер, способ монтажа и конфигурация клемм. Кроме того, важно учесть условия эксплуатации (допустимые значения рабочей температуры и влажности), наличие сертификатов сторонних производителей и особенности работы фильтра в составе системы.

Когда в системе используется несколько фильтров, их взаимодействие может существенно повлиять на общую производительность. Важно проанализировать, к чему приведет их совместная работа, чтобы избежать нежелательных резонансов или снижения эффективности. В некоторых случаях дополнительные ступени фильтрации обеспечивают более эффективное подавление помех и повышение надежности, особенно в критических приложениях. Если устройство уже оснащено встроенным фильтром EMI, добавление внешнего фильтра требует тщательного рассмотрения. Во избежание конфликтов все устройства должны быть совместимы по импедансу и частотной характеристике. Оценка совокупной эффективности внутренних и внешних фильтров необходима для того, чтобы убедиться в их совместности и обеспечения целостности системы.

При выборе фильтра EMI часто возникает проблема соотношения размера и производительности, поскольку фильтры большего

размера могут обеспечивать лучшее подавление, но их трудно разместить в компактных конструкциях. Также существует компромисс между стоимостью и эффективностью (или стоимостью и приемлемостью для регулирующих органов), при этом цена на высокопроизводительные фильтры, как правило, выше. Еще одним фактором является баланс между вносимыми потерями и полосой пропускания. Хотя высокие вносимые потери обеспечивают лучшее подавление помех, они также могут ослаблять полезный сигнал, то есть требуется тщательное соблюдения баланса для поддержания целостности сигнала.

Последние достижения в области EMI/EMC — фильтры с аморфным сердечником

Эволюция материалов сердечников сыграла ключевую роль в повышении производительности и экономичности фильтров. Среди последних достижений наиболее интересными являются сердечники из аморфных материалов, имеющие неоспоримые преимущества по сравнению с традиционными технологиями.

Аморфный метал — это материал с некристаллической структурой. В отличие от кристаллической решетки обычных ферромагнитных материалов, в аморфной структуре таких металлов нет регулярно повторяющегося порядка атомов, что создает уникальные магнитные свойства. На коротких расстояниях может существовать некоторый порядок, при котором атомы расположены определенным образом, но он не распространяется на большие расстояния.

Отсутствие упорядоченности в аморфных структурах придает фильтрам уникальные свойства, такие как высокая проницаемость и низкие потери в сердечнике на больших частотах. Кроме того, фильтры с аморфными сердечниками эффективны в широком диапазоне частот, что делает их универсальными для различных применений. Высокая проницаемость и малые потери позволяют производить малогабаритные компоненты, которые меньше и легче традиционных аналогов без ущерба для производительности.

Сердечники традиционных EMI-фильтров обычно изготавливают из таких материалов, как кремниевая сталь, феррит или порошковое железо. Кремниевая сталь, несмотря на свою экономичность и широкое распространение, имеет большие потери на повышенных частотах, что делает ее неподходящей для ВЧ-приложений. Ферритовые сердечники обладают хорошими частотными характеристиками, но отличаются меньшей плотностью потока насыщения по сравнению с аморфными металлами, что ограничивает их эффективность при использовании в системах высокой мощности. Сердечники из порошкового железа универсальны и обеспечивают хорошие частотные свойства, но их потери на высоких частотах больше, чем у аморфных металлов.

Высокомощные IGBT-модули в корпусе PrimePack от AMG Power



Компания AMG Power анонсировала выпуск IGBT-модулей с напряжением 1200 В и током 900 А, а также 1700 В и током 650 А, под заказными номерами AMG900G1200PP2 и AMG650G1700PP2. Устройства выпускаются в корпусе PrimePack (торговая марка компании Infineon), что обеспечивает высокую плотность мощности, устойчивость к короткому замыканию и улучшенные тепловые характеристики. Новые модули AMG Power конкурируют с продуктами таких компаний, как Infineon, CRRC и Fuji Electric. Например, модуль AMG900G1200PP2 может заменить Infineon FF900R12IE4, который также рассчитан на 1200 В и 900 А, но отличается более высокой стоимостью. Модуль AMG650G1700PP2 может стать альтернативой Fuji Electric 2MBI650VXA-170E-50, который имеет схожие характеристики по напряжению и току, но уступает в тепловых характеристиках.

Возможные области применения:

- Высокомощные преобразователи. Оба модуля подходят для использования в промышленных преобразователях энергии, где требуется высокая надежность и эффективность.
- Ветровые турбины. Модули могут быть использованы в системах управления генераторами ветровых турбин, где важна устойчивость к перепадам температуры и высокая мощность.
- Электроприводы. В системах управления двигателями, особенно в промышленных и транспортных приложениях, новые модули обеспечивают высокую производительность и долговечность.
- Инверторы высокой надежности. Модули подходят для использования в инверторах, где требуется высокая стабильность и минимальные потери энергии.
- Железнодорожный транспорт. В системах управления тяговыми двигателями электропоездов и трамваев, где требуется высокая мощность и надежность.

<https://macrogroup.ru/>

По материалам сайта www.us.lambda.tdk.com



EXPO ELECTRONICA

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ:
КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ
И ОБОРУДОВАНИЕ, ВСТРАИВАЕМЫЕ
СИСТЕМЫ И КОНЕЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

15–17.04.2025

МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО

ПОСЕТИТЕ КРУПНЕЙШУЮ
ВЫСТАВКУ ЭЛЕКТРОНИКИ!

ВЕКТОРЫ РАЗВИТИЯ 2025:

EXPOSIFRA - ВЫСТАВКА
ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ЦИФРОВОЙ
ТРАНСФОРМАЦИИ



СЕКТОР РОБОТОТЕХНИКИ

ПРЕМИЯ ELECTRONICA



ПОЛУЧИТЕ
БЕСПЛАТНЫЙ БИЛЕТ
ПО ПРОМОКОДУ
EE2025magazine

реклама



ОРГАНИЗАТОР
ORGANISER

Высокоэффективная настольная электронная нагрузка серии АКИП-1392

Компания «ПРИСТ» представляет новую серию электронных нагрузок **АКИП-1392**, которые предназначены для использования в качестве меры сопротивления при испытании, настройке и регулировке блоков питания, батарей питания и других радиотехнических устройств. Электронная нагрузка обеспечивает испытание в различных статических и динамических режимах работы (контроль напряжения, тока, имитация нагрузочного сопротивления).

Дмитрий Серков

serkov@prist.ru

Принцип действия электронных нагрузок основан на формировании сопротивления нагрузки путем коммутации матрицы транзисторов, работающих в режиме управляемых резисторов. Управление и контроль над режимами

работы нагрузки осуществляется встроенным микроконтроллером. Установка выходных параметров производится с помощью кнопок на лицевой панели нагрузки. Характеристики девяти моделей нагрузок, входящих в серию АКИП-1392, представлены в таблице. Внешний вид устройств показан на рис. 1.

Нагрузки серии АКИП-1392 имеют две схемы подключения к тестируемому устройству по двух- или

Таблица. Характеристики моделей серии электронных нагрузок АКИП-1392

Модель	Напряжение, В	Ток, А	Мощность, Вт
АКИП-1392-80-20-150	80	20	150
АКИП-1392-80-40-300		40	300
АКИП-1392-80-60-600		60	600
АКИП-1392-150-20-150	150	20	150
АКИП-1392-150-40-300		40	300
АКИП-1392-150-60-600		60	600
АКИП-1392-600-05-150	600	5	150
АКИП-1392-600-10-300		10	300
АКИП-1392-600-15-600		15	600



Рис. 1. Внешний вид АКИП-1392

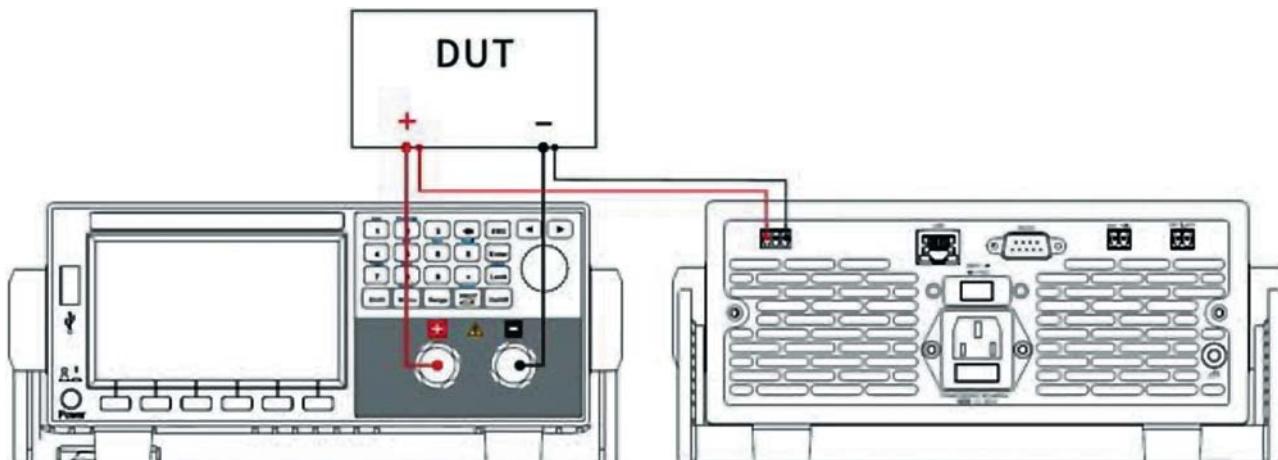


Рис. 2. Четырехпроводная схема подключения к тестируемому устройству

четырехпроводной схеме. Двухпроводная схема используется для подключения тестируемого устройства небольшой нагрузочной мощности и расположенного рядом с прибором. При подключении тестируемого устройства высокой мощности и при увеличенном расстоянии между нагрузкой электронной и тестируемым объектом возникает риск падения напряжения, что влияет на точность измерения напряжения на нагрузке. Для компенсации падения напряжения рекомендуется использовать четырехпроводную схему подключения к тестируемому устройству.

Вариант подключения тестируемого устройства по четырехпроводной схеме

Нагрузки электронные серии АКИП-1392 имеют следующие режимы защиты:

OCP	Защита от превышения тока
OVP	Защита от превышения напряжения
OPP	Защита от превышения мощности (пользовательская установка)
OC	Защита от превышения максимального тока
OV	Защита от превышения максимального напряжения
OP	Защита от превышения максимальной мощности
OT	Защита от перегрева
RV	Защита от обратного напряжения
RC	Защита от обратного тока

Помимо стандартных режимов работы нагрузки: стабилизация тока (CC), стабилизация напряжения (CV), стабилизация сопротивления (CR), стабилизация мощности (CW) и возможности создания тестовых последовательностей из 200 шагов, электронные нагрузки серии АКИП-1392 позволяют комбинировать данные режимы (рис. 2):

- CVCC — комбинированный режим CV + CC;
- CRCC — комбинированный режим CR + CC;
- CPCC — комбинированный режим CP + CC;
- CVCR — комбинированный режим CV + CR.

Также обладают рядом дополнительных режимов и функциональных возможностей, расширяющих область применения данного оборудования.

Режим качания частоты (Sweep)

Нагрузка поддерживает режим качания частоты, позволяющий быстро определить напряжение тестируемого устройства, через преобразование частоты (рис. 3). В этом режиме задаются два значения тока I_{max} и I_{min} и частота переключения между этими значениями. Нагрузка пропускает через себя ток разного уровня с заданной частотой, при этом у тестируемого устройства меняется напряжение, а нагрузка измеряет входное напряжение.

В результате на экране нагрузки отображается значение напряжения V_{max} и V_{min} . Таким образом, этот режим позволяет определить рабочее напряжение тестируемого устройства, если оно нам изначально неизвестно.

Тест аккумуляторных батарей питания

В данном случае сначала задается тестовый режим, а затем условия разряда (рис. 4). Есть три условия разряда АКБ, при которых тест может быть остановлен: уровень напряжения на батарее, уровень емкости батареи и длительность разряда по времени. Тест останавливается по достижении одного из трех этих условий. Напряжение батареи, ток разряда, время разряда и способность разряда отображаются на дисплее нагрузки во время тестирования.

Функция тестирования перегрузки по току

В данном тесте нагрузка пошагово увеличивает ток (I_z), пока не будет достигнуто установленное значение тока (I_{end}), или напряжение на входе не станет меньше установленного значения (V_{stop}). В этом случае срабатывает защита от перегрузки по току (рис. 5).

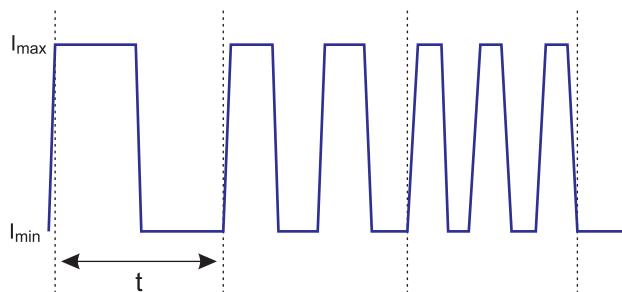


Рис. 3. Режим качания частоты (Sweep)

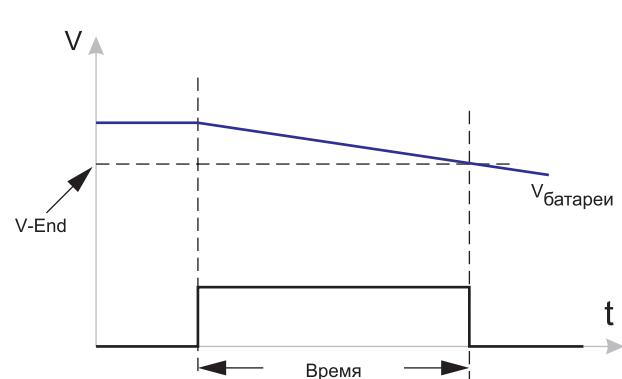


Рис. 4. Тест батареи питания АКБ

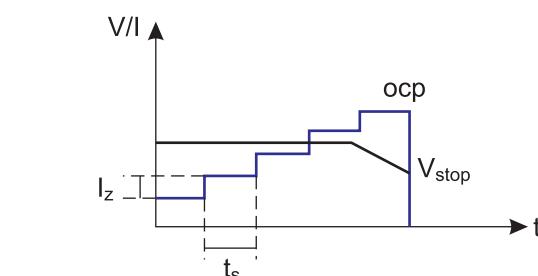


Рис. 5. Тестирование перегрузки по току

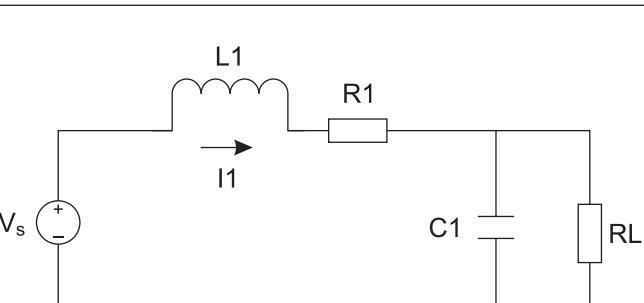


Рис. 6. Имитация емкостной и индуктивной нагрузки

Имитация емкостной и индуктивной нагрузки

Режим моделирования импеданса отличается от стандартных режимов CC/CV/CR/CP. Тест моделирования импеданса может имитировать фактическую индуктивную реактивность, импеданс и емкостную реактивную нагрузку, так что ток может быть ближе к реальной ситуации. Тест моделирования импеданса может имитировать емкостную нагрузку, чтобы предотвратить генерацию активным устройством импульсами.

ного тока при работе нагрузки, что приведет к срабатыванию защиты от перегрузки по току OCP активного устройства (рис. 6).

Имитация LED — нагрузки (CR-LED)

В данном режиме работы нагрузка имитирует светодиод с различными параметрами (рис. 7).

В дополнение к штатным измерениям, таким как измерение напряжение, тока и мощности, электронные нагрузки серии АКИП-1392 позволяют измерить скорость нарастания, а также уровень пульсаций.

Электронные нагрузки серии АКИП-1392 благодаря встроенной функции QC Detect могут быть использованы для тестирования источников питания, поддерживающих функ-

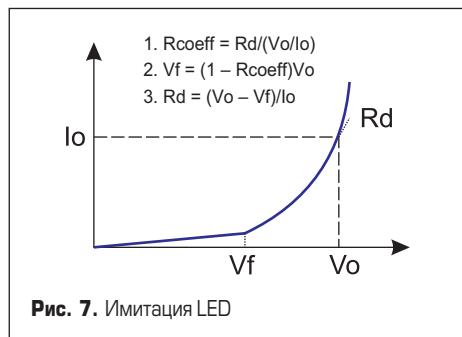


Рис. 7. Имитация LED

цию быстрой зарядки. При активации данной функции нагрузка автоматически сканирует подключенное тестируемое устройство на момент поддержки протокола быстрой зарядки. Нагрузки серии АКИП-1392 поддерживают новые протоколы PD3.1 (совместимые с PD3.0

и PD2.0), VOOC, QC3.0, QC2.0, AFC, SCP, FCP и другие протоколы быстрой зарядки.

Электронные нагрузки серии АКИП-1392 имеют интерфейсы дистанционного управления RS-232, USB и LAN. Для управления и программирования поддерживаются протоколы SCPI и ModBus.

Новая серия электронных нагрузок АКИП-1392 — это многофункциональный прибор, позволяющий выполнять тестирование источников питания не только в «классическом» статическом режиме, но и в динамическом режиме, полностью моделирующим поведение реальной нагрузки. Использование дополнительных режимов работы нагрузки и встроенные измерительные функции позволяют минимизировать число других средств измерения, применяемых при тестировании и поверке источников питания.

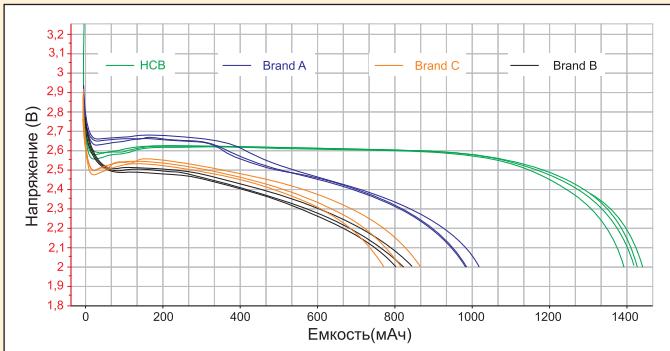
Li-MnO₂ элементы питания серии Arrow от HCB Battery

Компания HCB Battery расширила Li-MnO₂ серию, представив элементы питания Arrow. Наработки компании позволили эффективно повысить емкость элемента, скорость разряда и производительность при низких температурах.

В составе положительных электродов новой серии Arrow используются многокомпонентные молекулярные проводники, что создает высокоэффективную зону электрохимической реакции на положительном электроде, значительно уменьшая явление электрохимической поляризации батареи и дальнейшее снижение внутреннего сопротивления.

Снижение внутреннего сопротивления гарантирует, что элементы питания сохранят исключительно высокий коэффициент эффективного использования емкости при различных сценариях, продлевая срок службы устройств.

В условиях разряда постоянным током 1 А до падения напряжение 2 В остаточная емкость элемента CR123A составляет более 1400 мА·ч, что является лучшим показателем на рынке. Низкое внутреннее сопротивление позволяет устройству поддерживать более высокое рабочее напряжение и более стабильную передачу сигнала.



Элементы питания серии Arrow сохраняют высокую производительность в условиях низких температур в режиме импульсного разряда, — например, CR123A способен обеспечивать стабильное рабочее напряжение выше 2,5 В при нагрузке 30 Ом при температуре -40 °C.

<https://macrogroup.ru/>

Новая серия прецизионных источников опорного напряжения ZJR1004 от компании ZJW



Компания ZJW представляет новую серию прецизионных источников опорного напряжения ZJR1004, разработанных для требовательных применений в промышленной и измерительной электронике. Эти микросхемы сочетают исключительную стабильность, низкий уровень шума и широкий диапазон рабочих условий, что делает их идеальным решением для систем с высоким разрешением (>14 бит), таких как прецизионные

измерительные приборы, тестовое оборудование и высокоточные АЦП/ЦАП.

Микросхемы ZJR1004, построенные на базе технологии bandgap, сочетают в себе передовые инженерные решения и экономическую эффективность. Благодаря низкому энергопотреблению, высокой нагрузочной способности и широкому температурному диапазону, они подходят для проектов любой сложности — от портативных устройств до промышленных систем.

Ключевые преимущества ZJR1004:

- сверхнизкий температурный дрейф (<3 ppm/°C) гарантирует стабильность напряжения в диапазоне от -40°C до +125 °C, даже в экстремальных условиях;
- высокая начальная точность ($\pm 0,05\%$) минимизирует необходимость калибровки, сокращая время и затраты на разработку;

- широкий выбор напряжений: выбор из 2,048; 2,5; 3; 3,3; 4,096; 5 и 10 В;
- минимальный шум: всего 2,1 ppm_P-P (в полосе 0,1–10 Гц);
- мощный выход: ток нагрузки до 20 мА;
- широкий диапазон напряжения: от 2,8 В (или $V_{\text{ых}} + 0,3$ В) до 40 В;
- энергоэффективность: потребление 160 мкА в режиме ожидания.

Области применения:

- высокоточные АЦП/ЦАП и системы сбора данных;
- промышленные контроллеры и измерительные приборы;
- медицинское оборудование и лабораторная электроника;
- оптические коммуникации и инфраструктура «умных сетей» (Smart Grid);
- решения для энергетики и автоматизации с повышенными требованиями к надежности.

22–31
декада
науки и технологий

22–25 апреля 2025

СВЯЗЬ

37-я международная
выставка «Информационные
и коммуникационные технологии»

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

www.sviaz-expo.ru



Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



12+
Реклама

Организатор

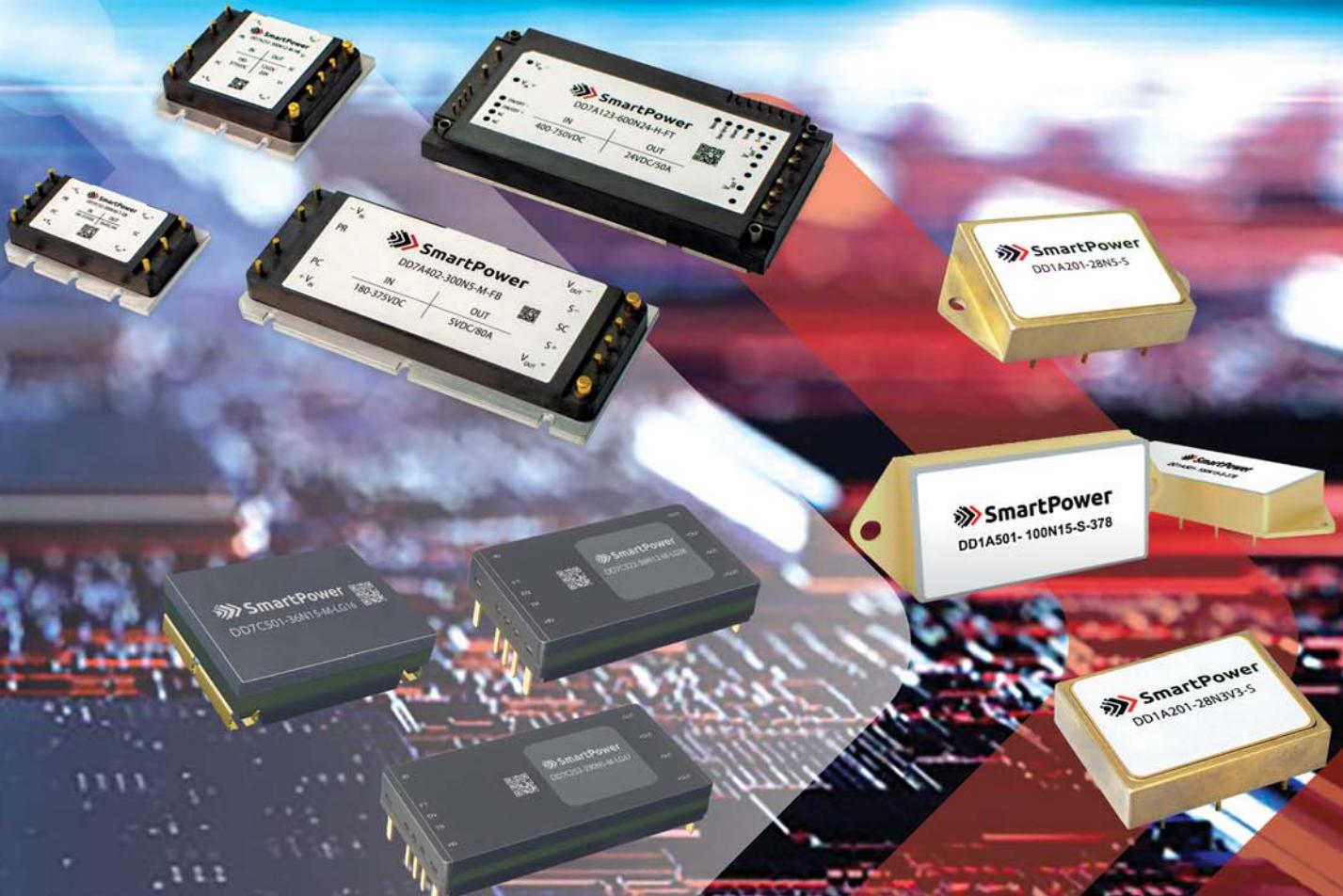


Под патронатом



В рамках



ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И ФИЛЬТРЫ
ДЛЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

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