

Окончание. Начало в № 12'2021

Радиационно стойкие модули DC/DC-преобразователей напряжения для систем электроснабжения с постоянным напряжением

Виктор БЕЗРОДНЫЙ

Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи серии HDCD/(20-50) с выходной мощностью 30 Вт

Одноканальные преобразователи напряжения этого ряда выполнены по прямоходовой структуре. Гальваническая развязка в контуре регулирующей обратной связи обеспечивается трансформатором. Для корректирования выходного напряжения применяется метод широтно-импульсной модуляции, формирующий регулирующие сигналы в виде импульсов, изменяющихся по ширине при неизменной частоте следования. Микросхема ШИМ-контроллера реализована в радиационно стойком исполнении. Для прямого управления амплитудой тока дросселя посредством сигнала ошибки используется внутренний контур регулирования.

Представленные в справочной документации слишком упрощенные структурные схемы одно- и двухканальных моделей не показывают, каким образом решается вопрос снижения перегрузки по напряжению силового МОП-транзистора, исключения насыщения сердечника трансформатора. Предположительно для размагничивания сердечника трансформатора в одноканальных моделях используется резонансное размагничивание: во время запертого состояния силового ключа трансформатор размагничивается через резонансную цепочку, состоящую из индуктивности намагничивания и емкости, образованной емкостями силового ключа, первичной обмотки и всеми емкостями на вторичной стороне, приведенными к первичной стороне, включая емкость выпрямительного диода.

Мы продолжим рассматривать основные технические и эксплуатационные характеристики радиационно стойких модулей DC/DC-преобразователей китайской компании, входящей в Китайскую корпорацию электронных технологий (China Electronics Technology Group Corporation — CETC). При разработке этих модулей особое внимание уделялось обеспечению радиационной стойкости и электромагнитной совместимости.

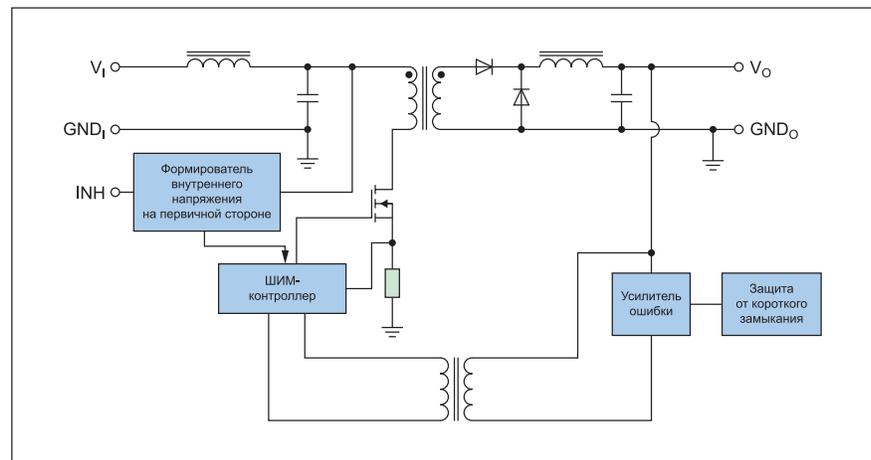


Рис. 12. Структурная схема одноканальной модели 30-Вт преобразователя напряжения серии HDCD/(20-50)

Таблица 8. Номенклатура и общие характеристики 30-ваттных DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50)

Модель	Выходная мощность, Вт	Выходное напряжение, В	КПД, % при полной нагрузке	Габаритные размеры, мм
HDCD/(20-50)-3R3-20F/SP	20	3,3	28 В: 74 42 В: 73	73,91×28,69×10,16
HDCD/(20-50)-5-25F/SP	25	5	28 В: 77 42 В: 77	73,91×28,69×10,16
HDCD/(20-50)-12-30F/SP	30	12	28 В: 85 42 В: 85	73,91×28,69×10,16
HDCD/(20-50)-15-30F/SP	30	15	28 В: 86 42 В: 85	73,91×28,69×10,16
HDCD/(20-50)-5-25F/D1	25	±5	28 В: 77 42 В: 77	73,91×28,69×10,16
HDCD/(20-50)-12-30F/D1	30	±12	28 В: 84 42 В: 83	73,91×28,69×10,16
HDCD/(20-50)-512-30F/T1	30	5/±12	28 В: 74 42 В: 72	68,59×34,29×10,29
HDCD/(20-50)-515-30F/T1	30	5/±15	28 В: 74 42 В: 72	68,59×34,29×10,29

Двухканальные модули выполнены по обратногоходовой структуре. Структурная схема одноканальной модели приведена на рис. 12.

Основные параметры одно-, двух- и трехканальных моделей преобразователей представлены в таблице 8.

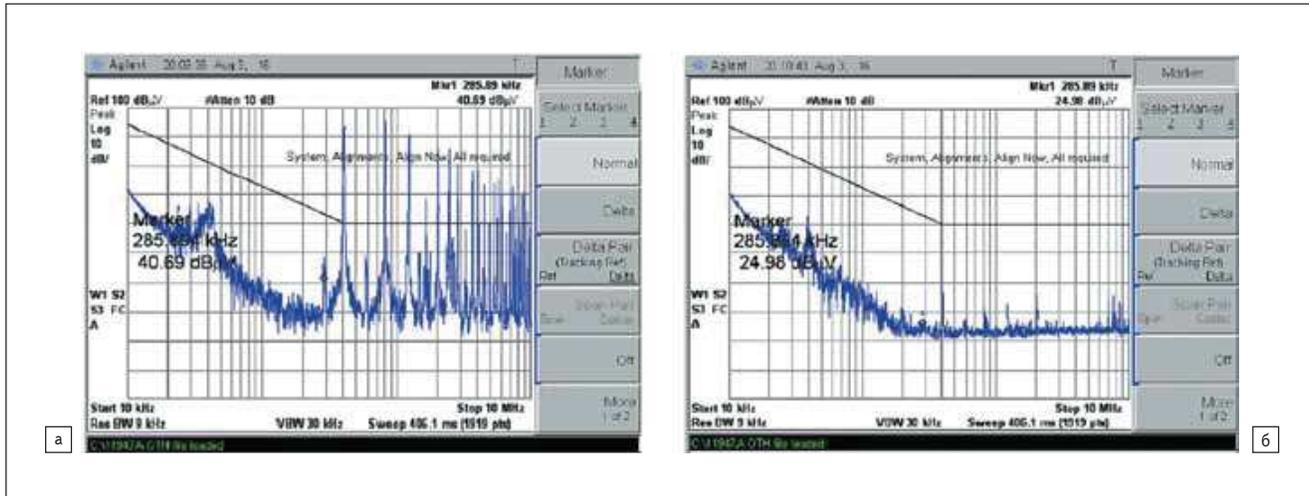


Рис. 13. Осциллограммы кондуктивных помех на входе модуля преобразователя напряжения HDCC/(20-50)-515-30F/T1:

а) уровень кондуктивных помех на входе без фильтра;

б) уровень кондуктивных помех при подключении внешнего фильтра значительно ниже нормирующей кривой CE102 стандарта MIL-STD-461

Для обеспечения работы модулей, действующих в составе аппаратуры в различных режимах, они снабжены следующими сервисными функциями: защита от короткого замыкания и пониженного входного напряжения, дистанционное включение/выключение, регулировка выходного напряжения подключением внешнего потенциометра (для одноканальных моделей), синхронизация рабочей частоты внешним сигналом частотой 400–500 кГц.

Установленный на входе преобразователя LC-фильтр обеспечивает подавление высокочастотных помех до уровня, допустимого для многих применений. Но поскольку высокий импеданс индуктивного типа может повлиять на устойчивость работы модуля, в непосредственной близости от его входа следует установить демпфирующий конденсатор. Для использования в качестве демпфирующего оптимальен алюминиевый электролитический конденсатор. Если подавление помех посредством встроенных на выходе фильтров оказывается недостаточным, рекомендуется применять внешние фильтры.

Для снижения пульсирующего входного тока предлагается устанавливать внешние фильтры HFMC/(20-50)-461-135 рядом с входом DC/DC-преобразователя. Вносимое затухание фильтра — 50 дБ на частоте 500 кГц, 40 дБ на частоте 1 МГц. Пример эффективности применения внешнего фильтра на входе трехканального преобразователя HDCC/(20-50)-515-30F/T1 показан на рис. 13.

Если подавление помех с помощью встроенных на выходе фильтров оказывается недостаточным, рекомендуется применять внешние фильтры.

Стабилизация напряжения у двухканальных модулей осуществляется только по каналу положительного напряжения. Выходное отрицательное напряжение ре-

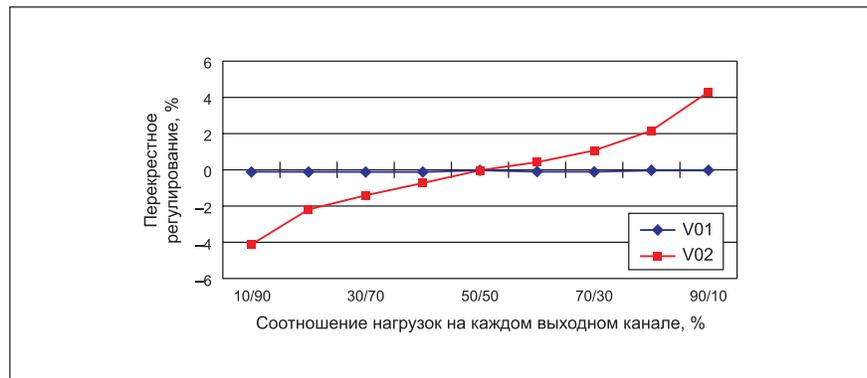


Рис. 14. График зависимости степени перекрестного регулирования при изменении нагрузки для преобразователя HDCC/(20-50)-12-30F/D1

гулируется только за счет магнитной связи обмотки с обмоткой трансформатора положительной полярности, поэтому требуется симметричная сбалансированная нагрузка. Если нагрузка не сбалансирована, при конструировании системы питания необходимо руководствоваться графиком зависимости относительного изменения напряжения на выходе отрицательного напряжения, вызванного изменением нагрузки на выходе положительного напряжения (перекрестное регулирование). В качестве примера на рис. 14

приведен график зависимости степени перекрестного регулирования при изменении нагрузки в канале положительного напряжения для двухканального преобразователя HDCC/(20-50)-12-30F/D1.

Перекрестное регулирование составляет 6% при изменении нагрузки от 30 до 70% и от 70 до 30% при начальном условии загрузки каждого канала 50%/50%.

Как указано в технической спецификации трехканального модуля HDCC/(20-50)-515-30F/T1, при нагрузке основного регулирую-

Таблица 9. Тепловые сопротивления некоторых моделей 30-Вт модулей серии HDCC/(20-50)

Модель	Тепловой импеданс, °С/Вт	Размеры радиатора, мм	Мощность, Вт	Материал радиатора
HDCC/(20-50)-3R3-20F/SP	5,05	140×45×1	10	Медь
HDCC/(20-50)-5-25F/SP	4,64	140×45×1	8,5	Медь
HDCC/(20-50)-12-30F/SP	6,07	140×45×1	5,5	Медь
HDCC/(20-50)-15-30F/SP	6,07	140×45×1	5,5	Медь
HDCC/(20-50)-5-25F/D1	4,13	140×45×1	8,5	Медь
HDCC/(20-50)-12-30F/D1	6,97	140×45×1	4,8	Медь
HDCC/(20-50)-512-30F/D1	2,38	300×370×1	11	Медь
HDCC/(20-50)-515-30F/D1	2,38	300×370×1	11	Медь

мого канала 5 В/2 А, при изменении тока нагрузки на каналах ± 15 В от 200 до 466 мА и от 466 до 200 мА степень перекрестного регулирования составляет 6%; начальное условие: загрузка основного канала 5 В/4 А, каждый из каналов ± 15 В имеет нагрузку 333 мА.

В таблице 9 приведены значения внутренних тепловых сопротивлений для некоторых моделей модулей рассматриваемого ряда. Тепловые сопротивления позволяют определить температуру перегрева модуля относительно окружающей среды и, используя графики зависимости КПД от выходной мощности и графики зависимости допустимой мощности от внешней температуры, рассчитать размеры радиатора.

Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи серии HDCD/(20-50) с выходной мощностью 65 Вт

Одно- и двухканальные DC/DC-преобразователи этого ряда доступны в исполнении с горизонтальным расположением выводов для объемного монтажа. Модули обеспечивают гальваническую развязку входных и выходных цепей, имеют встроенные входные и выходные фильтры. Упрощенные структурные схемы одно- и двухканальных прямоходовых преобразователей приведены на рис. 15. Номенклатура и общие характеристики 65-Вт DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50) представлены в таблице 10.

Для регулирования напряжения используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой (350–500 кГц) и обратной связью по напряжению. Специализированная радиационно стойкая микросхема ШИМ-контроллера осуществляет возбуждение, управление и защиту преобразователя.

Для обеспечения работы модулей в составе электронной аппаратуры они снабжены следующими сервисными функциями: защита от короткого замыкания и пониженного напряжения на входе, вход дистанционного включения/выключения (по первичной и вторичной цепи), равномерное распределение тока нагрузки между включенными параллельно модулями (только для одноканальных моделей), сигналы синхронизации частоты преобразования внешним синхросигналом, формирование выходного сигнала синхронизации. Для исключения влияния падения напряжения на соединительных проводниках, соединяющих выходные контакты преобразователя с нагрузкой, применяется внешняя обратная связь. Обратная связь для стабилизации напряжения на нагрузке берется непосредственно с входных питающих контактов питаемой аппаратуры. Для подключения цепей внешней обратной связи служат входы преобразователя SENSE+ и SENSE–.

За счет параллельного включения можно увеличить мощность, повысить надежность

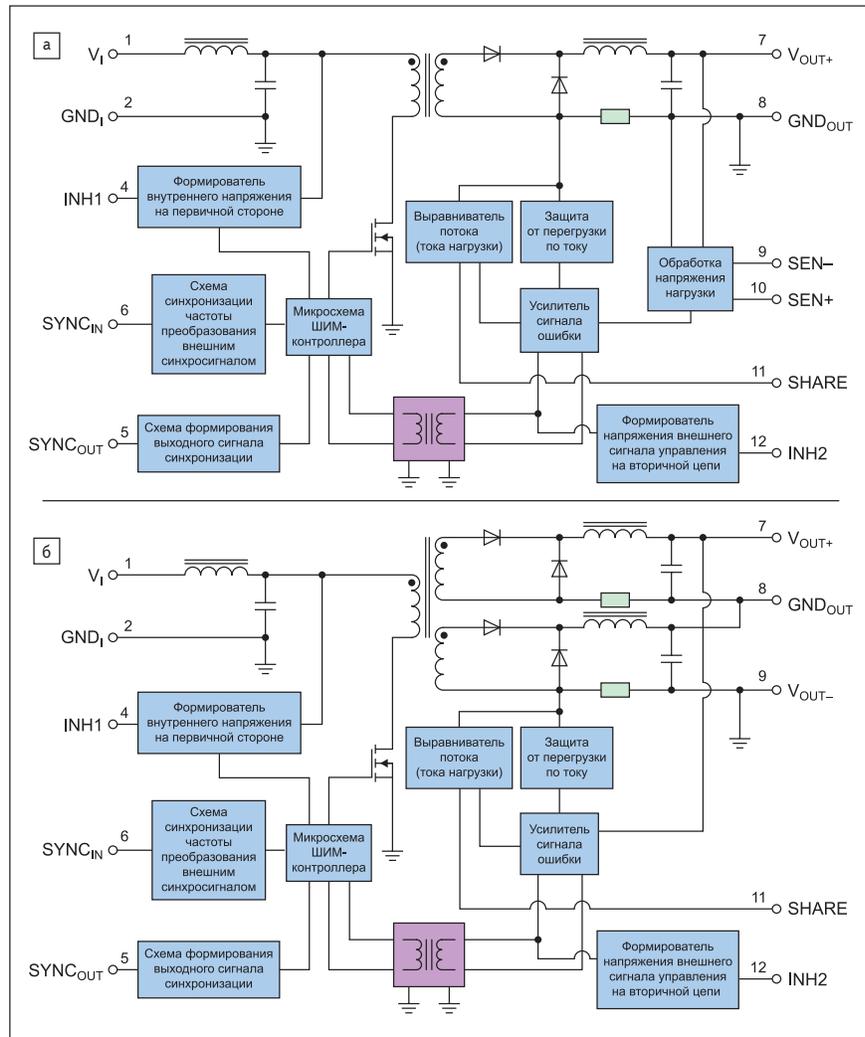


Рис. 15. Структурные схемы 65-Вт прямоходовых преобразователей напряжения серии HDCD/(20-50): а) одноканальный преобразователь; б) двухканальный преобразователь

Таблица 10. Номенклатура и общие характеристики 65-Вт DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50)

Модель	Выходная мощность, Вт	Выходное напряжение, В	КПД, % при полной нагрузке	Габаритные размеры, мм
HDCD/(20-50)-5-50/SP	50	5	28 В: 78 42 В: 77	76,7×38,6×10,16
HDCD/(20-50)-12-60/SP	60	12	28 В: 83 42 В: 82	76,7×38,6×10,16
HDCD/(20-50)-15-65/SP	65	15	28 В: 84 42 В: 83	76,7×38,6×10,16
HDCD/(20-50)-5-50/D1	50	± 5	28 В: 77 42 В: 77	76,7×38,6×10,16
HDCD/(20-50)-12-60/D1	60	± 12	28 В: 85 42 В: 84	76,7×38,6×10,16

аппаратуры, используя принципы резервирования отдельных модулей преобразователей напряжения. Допускается параллельно включать до трех одноканальных модулей. На рис. 16 показана структурная схема параллельного соединения трех модулей при работе на общую нагрузку. Все выводы равномерного распределения тока (Share) соединяются вместе. Проводники цепи внешней обратной связи (Sense) каждого модуля должны соединяться в общей физической

точке у нагрузки совместно с проводами, соединяющими выходы преобразователей, и обратными проводами. Выходной сигнал синхронизации SYNC_{OUT} используется для синхронизации частоты преобразования параллельно включенных модулей от одного ведущего преобразователя. Эта функция позволяет синхронизировать рабочую частоту преобразователей с желаемой для конкретного применения частотой (400–500 кГц). При этом устраняются частоты биений, создава-

емых несколькими преобразователями, подключенными к одной шине. Более подробно вопросы использования и организации интерфейса входов дистанционного включения/выключения и синхронизации DC/DC-преобразователей обсуждаются в статье [12].

Из приведенной упрощенной структурной схемы прямоходового преобразователя напряжения не понятно, каким образом решается вопрос поглощения выброса напряжения на стоке силового МОП-транзистора и уменьшения пульсирующего входного тока преобразователя. Можно предположить, что для обеспечения оптимальной характеристики мягкого переключения полупроводниковых компонентов силовой схемы применяется резонанс выходной емкости силового ключа при нуле напряжения, а размагничивание сердечника трансформатора осуществляется вследствие механизма размагничивания от взаимодействия индуктивности намагничивания и конденсатора, расположенного на вторичной стороне, — реализуется автоматический механизм размагничивания. Такое предположение сделано в связи с тем, что в представленной структурной схеме отсутствует внешняя схема размагничивания. Подробно принцип работы прямоходового преобразователя напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием рассмотрен в статье [13].

Для снижения уровня высокочастотных электромагнитных помех на входе преобразователя применяется внутренний LC-фильтр, а для дополнительного подавления помехи рекомендуется установить внешний фильтр HFE/(20-50)100-461-500 с вносимым затуханием 40 дБ на частоте 1 МГц. Схема помехоподавляющего фильтра приведена на рис. 17. Фильтр подавляет синфазную и дифференциальную составляющие помехи. Фильтр выполнен по толстопленочной гибридной технологии в герметичном металлическом корпусе с горизонтальным расположением выводов для объемного монтажа. Габаритные размеры 76,2×38,1×10,16 мм, масса 79 г.

Перекрестное регулирование для двухканальных моделей составляет 6–10% (в зависимости от модели) при изменении нагрузки от 30 до 70% и от 70 до 30% при начальном

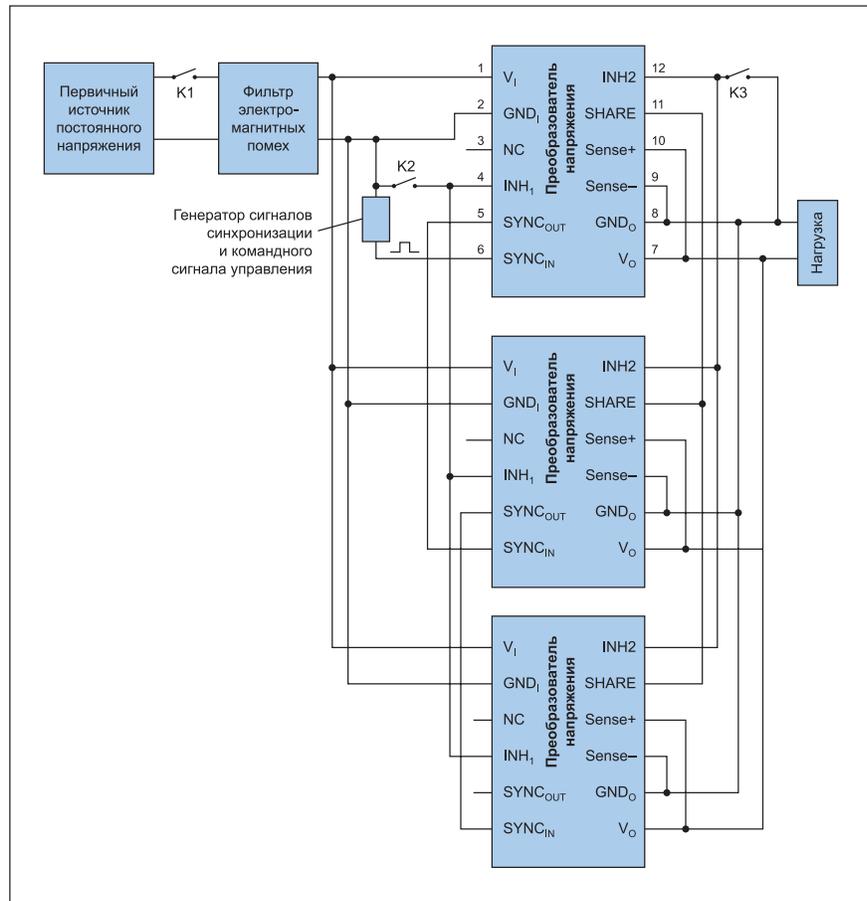


Рис. 16. Схема параллельного соединения модулей для работы на общую нагрузку

распределения нагрузки между каналами 50%/50%. Требуется применять симметричную сбалансированную нагрузку, если же нагрузка не сбалансирована, то необходимо учитывать график перекрестного регулирования, который представлен в сопроводительной документации.

Для поддержания максимальной температуры корпуса +125 °С или ниже необходимо обеспечить отвод тепла на внешний теплоотвод, находящийся в тесном контакте с основанием корпуса преобразователя. В таблице 11 приведены значения внутреннего теплового

сопротивления модуля на участке элемент — подложка, указаны размеры радиатора для заданной рассеиваемой мощности.

Для повышения эффективности кондуктивного теплоотвода рекомендуется между основанием корпуса и радиатором поместить наполнитель с высокой тепловой проводимостью. В качестве наполнителя используют теплопроводящие пасты и прокладки, которые заполняют неровности микрорельефа поверхностей, повышая теплопередачу. Для эксплуатации в космических условиях допускается применять только наполнители

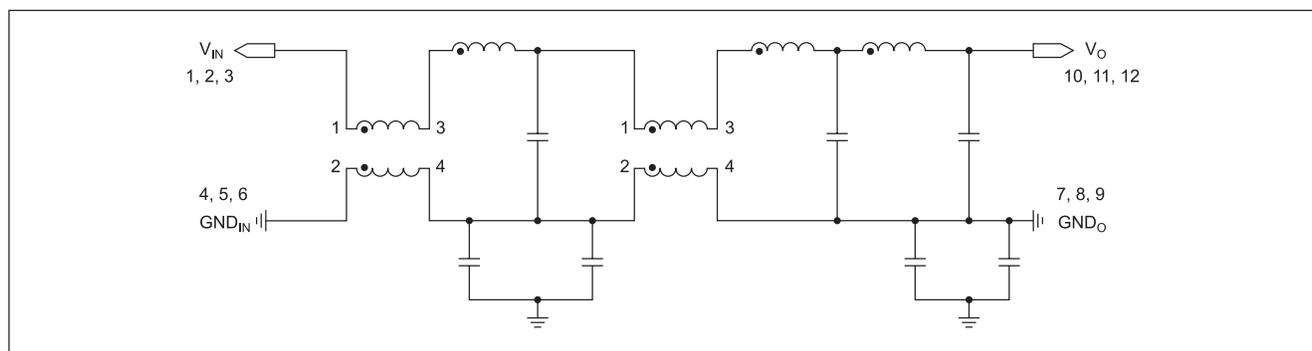


Рис. 17. Схема фильтра электромагнитных помех HFE/(20-50)-100-461-500

Таблица 11. Тепловые сопротивления некоторых моделей 65-Вт модулей серии HDCD/(20-50) и размеры теплоотводов

Модель	Тепловое сопротивление, °C/Вт	Размеры радиатора, мм	Мощность, Вт	Материал радиатора
HDCD/(20-50)-15-65/SP	2,71	300×200×3	16,3	Медь
HDCD/(20-50)-5-50/D1	2,48	300×200×3	18,5	Медь
HDCD/(20-50)-12-60/D1	2,89	300×200×3	15	Медь

Таблица 12. Радиационно стойкие гибридно-пленочные преобразователи напряжения типа POL для установки рядом с нагрузкой

Модель	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки, А	КПД, % при полной нагрузке	Габариты, (Д·Ш·В), мм	Корпус
HNFA0510SS	0,8–3,3	10	92	27,57×27,57×8,9	Металлический
HNFA0516SS	0,8–3,3	16	89	–	С двухрядным расположением выводов

с низким выделением газов при вакуумно-тепловом воздействии и низким содержанием летучих конденсирующихся веществ.

Этот ряд преобразователей средней мощности не имеет моделей с выходными напряжениями 3,3 В и ниже. Современным высокоскоростным цифровым микросхемам требуются напряжения 1,5–2,8 В. Уменьшение выходного напряжения до 3,3 В и ниже у источников питания на основе выпрямителей с диодами Шоттки приводит к значительному снижению КПД из-за возрастающих потерь в выходных диодах. Для повышения КПД импульсных преобразователей необходимо заменять диоды Шоттки полевыми транзисторами с низким сопротивлением в открытом состоянии и использовать схемы с синхронными выпрямителями. Однако это требует проведения довольно длительных работ по конструированию и испытанию новых преобразователей с синхронными выпрямителями и одновременного обеспечения высокой радиационной стойкости законченного изделия.

Для питания низковольтных нагрузок предлагается применять неизолированные преобразователи напряжения со специфицированными показателями радиационной стойкости, установленные в непосредственной близости от нагрузки. Об этом и пойдет речь в следующем разделе.

Радиационно стойкие понижающие неизолированные преобразователи напряжения для систем распределенного электропитания низковольтных нагрузок

Современные высокопроизводительные микросхемы (FPGA, DSP, MCU, ASIC), широко применяемые в электронной аппаратуре космических аппаратов, требуют напряжения 0,8–3,3 В с большими скоростями нарастания переходных токов. Размещение источника питания в непосредственной близости от нагрузки позволяет существенно снизить влияние

распределительной сети. При использовании локального преобразователя (Point-of-Load — POL) требуется значительно меньшая длина проводников печатной платы, а сам источник питания разрабатывается таким образом, чтобы обеспечить скорость переходных процессов в токе нагрузки за счет способов компенсации с помощью обратной связи в режиме большого сигнала [14].

Для организации распределенной архитектуры системы электропитания с напряжением 5 В для промежуточной шины предлагается две модели неизолированных преобразователей напряжения, построенных по топологии понижающих Виск-преобразователей с синхронным выпрямлением (табл. 12). Применение синхронного выпрямления, преобразование с частотой 500 кГц (диапазон изменения 395–585 кГц) обеспечивает их компактность, высокую эффективность и превосходные динамические характеристики. В качестве преобразователей промежуточной шины, обеспечивающих развязку и понижение постоянного напряжения входной шины, можно использовать радиационно стойкие DC/DC-преобразователи HDCD/(20-50)-5-50/SP (выходная мощность 65 Вт) и HDCD/(20-50)-5-25F/SP (выходная мощность 25 Вт). Наиболее важным является размещение локального модуля питания как можно ближе к потребителю, чтобы свести к минимуму индуктивность соединительных проводников, а также применять широкие дорожки на плате для обеспечения протекания больших токов.

Стабилизаторы напряжения типа POL предназначены для длительной работы в аппаратуре космической техники в широком диапазоне температур. Гарантируется сохранение параметров в условиях воздействия ионизирующего излучения. Работоспособность сохраняется при суммарной накопленной дозе радиации 100 крад, гарантируется отсутствие необратимых катастрофических отказов и одиночных сбоев при воздействии заряженных частиц с линейными потерями энергии (ЛПЭ) 75 МэВ·см²/мг.

Заключение

Рассмотренные радиационно стойкие DC/DC-преобразователи характеризуются высокими показателями радиационной стойкости, высокой надежностью, необходимым набором сервисных функций, что позволяет успешно использовать их в системах электропитания ракетно-космической техники.

Литература

1. Рентюк В. Системы питания и перспективы использования GaN в космических аппаратах. Часть 1. Питание КА, общие принципы // Силовая электроника. 2019. № 6.
2. Рентюк В. Системы питания и перспективы использования GaN в космических аппаратах. Часть 2. Питание КА, практические решения // Силовая электроника. 2020. № 1.
3. Бендиков М. А., Ганичев Н. А. Электронная импортозависимость и пути ее преодоления (на примере космической промышленности) // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 3.
4. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. В 2 кн. М.: Техносфера, 2015.
5. Лысенко П. Китайская радиационно стойкая ЭКБ на российском рынке // Современная электроника. 2021. № 6.
6. Безродный В. Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи из КНР. Часть 1 // Современная электроника. 2016. № 7.
7. Безродный В. Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи из КНР. Часть 2 // Современная электроника. 2016. № 8.
8. Кессаринский Л. Н., Бойченко Д. В., Никифоров А. Ю. Анализ радиационного поведения импульсных стабилизаторов напряжения // Микроэлектроника. 2012. Т. 41. № 4.
9. Горячев В., Чуприн А. Источник вторичного электропитания для специальной бортовой аппаратуры. Формирование внутреннего напряжения питания // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 10.
10. Жданкин В. Управление пусковым током в DC/DC-преобразователях // Компоненты и технологии. 2016. № 8.
11. Сергеев Б. С. Сглаживающие фильтры однотактного преобразователя с обратным включением диода // Электропитание. 2013. № 4.
12. Жданкин В. Дистанционное управление и внешняя синхронизация преобразователей напряжения // Компоненты и технологии. 2017. № 5.
13. Герасимов А. А., Кастров М. Ю. Разработка прямоходового преобразователя постоянного напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием // Практическая силовая электроника. 2011. № 41.
14. Лукин А. В. Новые направления развития преобразователей постоянного напряжения (по материалам зарубежной печати) // Электропитание. 2011. № 2.