

Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи из КНР

Часть 2

Виктор Безродный (Москва)

Увеличение функциональности электронной аппаратуры современных космических аппаратов (КА) способствует возрастанию электропотребления. Уменьшение удельной массы систем электропитания обеспечивается применением систем постоянного повышенного напряжения. Для создания систем электропитания КА необходимо использование модулей преобразования напряжений, способных функционировать от источников повышенного напряжения и выдерживать длительное воздействие полей ионизирующего излучения космического пространства без отказов и сбоев. В статье представлены радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи для применения в системах электропитания КА с постоянным повышенным напряжением 100 В производства одного из НИИ Китайской Народной Республики.

Исследование дозового поведения и одиночных локальных эффектов

Одной из важнейших характеристик качества DC/DC-преобразователей, предназначенных для применения в аппаратуре ракетно-космической техники, является радиационная стойкость. В условиях космического полёта электронное оборудование подвергается воздействию широкого спектра различных элементарных частиц и энергий. Особое значение имеет воздействие полей ионизирующих излучений космического пространства, которые вызывают дозовые эффекты, как результат воздействия электронов и протонов (частицы низких энергий до 1 МэВ) и одиночные события радиационных эффектов, как результат воздействия галактических и солнечных космических лучей – тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) и протонов (частицы высоких энергий свыше 1 МэВ).

Радиационная стойкость электронных компонентов контролируется по результатам их испытаний на источниках радиационных воздействий – моделирующих установках и имитаторах (лазерных, рентгеновских, изотопных и др.).

Импульсные стабилизаторы напряжений, выполненные по толстоплёночной гибридной технологии, состоят из ключевого MOSFET-транзистора, диодов, микросхемы ШИМ, схемы ЧИМ, операционного усилителя и др., которые чувствительны к эффектам от

ионизирующего излучения единичного события. Причём дозовые механизмы отказов и механизмы отказов от одиночных локальных эффектов различны для основных узлов импульсных стабилизаторов напряжения [1].

Результаты испытаний образцов DC/DC-преобразователей HD/DC/100-5R-15/SP

В качестве источника радиации при испытаниях на предельно накопленную дозу использовался источник ионизирующего воздействия (гамма-излучение) на изотопе ^{60}Co (имитирующая установка Пекинского университета) с низкой мощностью дозы 0,1 рад (Si)/с, обеспечивающий адекватные проявления моделирования доминирующих эффектов в электронных компонентах, вызываемых воздействием ионизирующих излучений космического пространства. Необходимо отметить, что суммарная доза мощности ионизации на земной орбите не превышает 10 мрад (Si)/с. Для некоторых типов электронных компонентов эффекты от ионизирующего излучения зависят от интенсивности, с которой происходит ионизация. Особенно потенциально чувствительными к эффектам от ионизирующего излучения при очень низких мощностях дозы являются биполярные интегральные микросхемы (операционные усилители, компараторы), которые широко применяются в импульсных стаби-

лизаторах напряжения. Поэтому важно, чтобы испытания проводились при условиях, близких к условиям работы в космосе. Ранее испытания электронных компонентов на предельно накопленную дозу выполнялись при высокой интенсивности облучения, обычно больше 50 рад (Si)/с (некоторые изготовители радиационно-стойких преобразователей напряжения осуществляли испытания при мощностях дозы 9 рад (Si)/с до обнаружения влияния мощности дозы ионизирующего излучения на дозовые эффекты в структуре различных полупроводников).

Испытывались два образца 15-ваттных модулей HD/DC/100-5R-15/SP до суммарной накопленной дозы 20 крад (Si) и 100 крад (Si) при температуре +25°C с последующим отжигом при температуре окружающей среды. Известно, что чувствительные к радиационным воздействиям параметры и соответствующие критерии отказа сложных изделий в значительной степени зависят от режима функционирования. В данном случае испытания проводились при входном напряжении 120 В и при нагрузках от 1/4 до 1/3 от номинальной нагрузки. В ходе радиационных испытаний контролировались следующие параметры: ток потребления, выходное напряжение, входные токи управляющих сигналов, коэффициент влияния тока нагрузки на выходное напряжение. По результатам испытаний подтверждён показатель суммарной накопленной дозы 1000 Гр (Si) (100 крад (Si)).

Испытания модуля HD/DC/100-28-15/SP в России посредством имитационного моделирования дозовых эффектов рентгеновским источником (рентгеновский имитатор) с максимальной мощностью дозы 10 рад (Si)/с подтвердили уровень дозовой стойкости 100 крад (Si).

При радиационных испытаниях контролировались следующие параметры: выходное напряжение, пульсации выходного напряжения, коэффициент полезного действия, время установления выходного напряжения.

По результатам измерений электрических параметров было выявлено их соответствие заявленным требованиям. По результатам замеров параметров в процессе и после воздействия механических и климатических факторов было выявлено соответствие модуля HDCD/100-28-15/SP требованиям модели ВВФ.

Исследование одиночных локальных эффектов

Одиночные заряженные частицы космического пространства вызывают большое количество эффектов в изделиях электронной техники. В настоящее время эти эффекты являются одной из главных причин, ограничивающих стойкость радиоэлектронной аппаратуры на борту космического аппарата. Гибридные импульсные преобразователи напряжения обеспечивают стабилизированное напряжение питания одного или нескольких функциональных блоков космической аппаратуры. Таким образом, необратимые эффекты (тиристорный эффект и катастрофический отказ), а также одиночные переходные эффекты на выходе преобразователя могут нарушить функционирование целых блоков космической аппаратуры. Детальный анализ показателей стойкости гибридных импульсных стабилизаторов при воздействии тяжёлых заряженных частиц проведён в работах [2, 3]. Экспериментально подтверждена зависимость характеристик одиночных эффектов в гибридных преобразователях напряжения от электрического режима в целом и от работы обратной связи в частности.

В соответствии с планом проведения испытаний (утверждённым China Academy of Space Technology) радиационно-стойких DC/DC-преобразователей с входным напряжением 100 В были проведены испытания модуля HDCD/100-5-20/SP на стойкость к ТЗЧ. Испытания проводились на циклическом ускорителе тяжёлых ионов с постоянным магнитным полем (циклотрон) с облучением короткопробежными ионами ксенона (Xe) с длиной свободного пробега в крем-

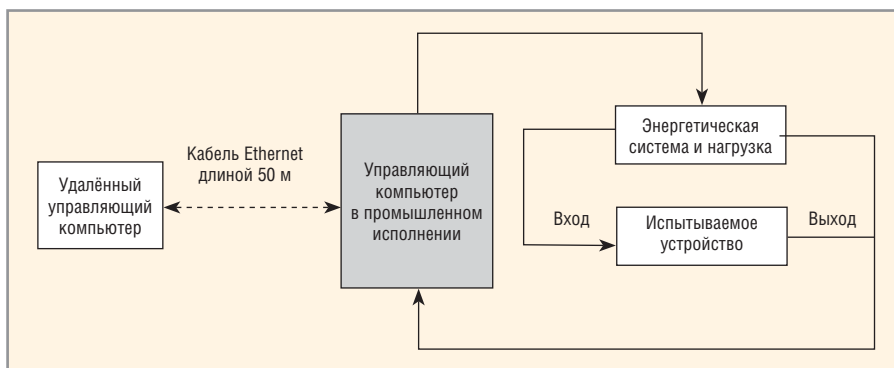


Рис. 12. Функциональная схема аппаратной части испытательного комплекса

нии 64,7 мкм. Энергия ионов циклотрона 868,3 МэВ.

Перед испытаниями верхняя часть металлического корпуса была удалена с сохранением работоспособности образца. Однотактный прямоходовой преобразователь HDCD/100-5-20/SP содержит силовой радиационно-стойкий транзистор MOSFET BYU25CS, выполненный по технологии VDMOSFET (вертикальные полевые транзисторы с двойной диффузией).

Контрольно-измерительная система включает в свой состав промышленный управляющий компьютер с платой сбора данных, систему питания и нагрузку, а также удалённый управляющий компьютер. Управляющий компьютер в промышленном исполнении собирает и хранит информацию об одиночных переходных эффектах на выходе преобразователя, тогда как система питания и нагрузок обеспечивает входную мощность и выходную нагрузку, а также осуществляет контроль входного тока DC/DC-преобразователя. Удалённый управляющий компьютер подключает промышленный управляющий компьютер через сеть Ethernet и управляет всеми режимами промышленного управляющего компьютера. На рисунке 12 показана функциональная схема испытательного комплекса.

Управляющий компьютер осуществляет контроль напряжения на всех выходах DC/DC-преобразователя в реальном масштабе времени и входного тока. Отказом преобразователя считается ситуация, в которой выходное

напряжение равно 0 или на выходе возникают колебания напряжения.

Когда напряжение превысит заданный выходной порог (10% от установленного значения напряжения, ширина импульса >5 мс), каждое отклонение от нормального значения и аномальные временные интервалы отклонений напряжения должны записываться, пока выполняется общее воздействие.

Результаты испытаний преобразователя HDCD100-5-20/SP на циклотроне облучением тяжёлыми ионами представлены в таблице 4. Обе приведённые в таблице модели проверки (120 В входное напряжение, 100% нагрузка и 100 В входное напряжение, 80% нагрузка) являются наихудшими условиями смещения. Тем не менее, устройства выдержали испытание. Поэтому не проводились испытания облучением при входном напряжении 100 В, холостой ход, а также при входном напряжении 80 В и 50-процентной нагрузке.

Анализ результатов испытаний

При облучении образца радиационно-стойкого DC/DC-преобразователя HDCD/100-5-20S/SP с силовым ключом на VDMOSFET BYU25CS ионами Хе не были зафиксированы ни катастрофические отказы (эффект «зашёлкивание»), ни одиночные переходные эффекты (переходная ионизационная реакция в виде импульсов напряжения в выходных цепях) до значительной линейной потери (ЛПЭ) энергии иона 65,2 МэВ × см²/мг и флюенса ионов 1,00 × 10⁷ частиц/см². Это показывает, что допустимым порогом ЛПЭ,

Таблица 4. Результаты испытаний 100-вольтовых преобразователей серии HDCD/100 в области одиночных эффектов*

| Модель | Номер | Модель проверки | Ион | Значение ЛПЭ, МэВ × см ² /мг | Флюенс (интегральный поток), число частиц/см ² | Отказы | Одиночные переходные эффекты | Примечание |
|------------------|-------|---|-----|---|---|--------|------------------------------|---|
| HDCD/100-5-20/SP | 40# | 100 В, 80% нагрузка (3,2 А) (зона MOSET, ШИМ) | Xe | 65,2 | 1,00 × 10 ⁷ | 0 | 0 | Однотактная прямоходовая структура, BYU25CS |
| HDCD/100-5-20/SP | | 120 В, 100% нагрузка (4 А) (зона MOSET, ШИМ) | | | | | | Однотактная прямоходовая структура, BYU25 |

* Плотность потока ионизирующих частиц составляла 40000 частиц/см² × с.

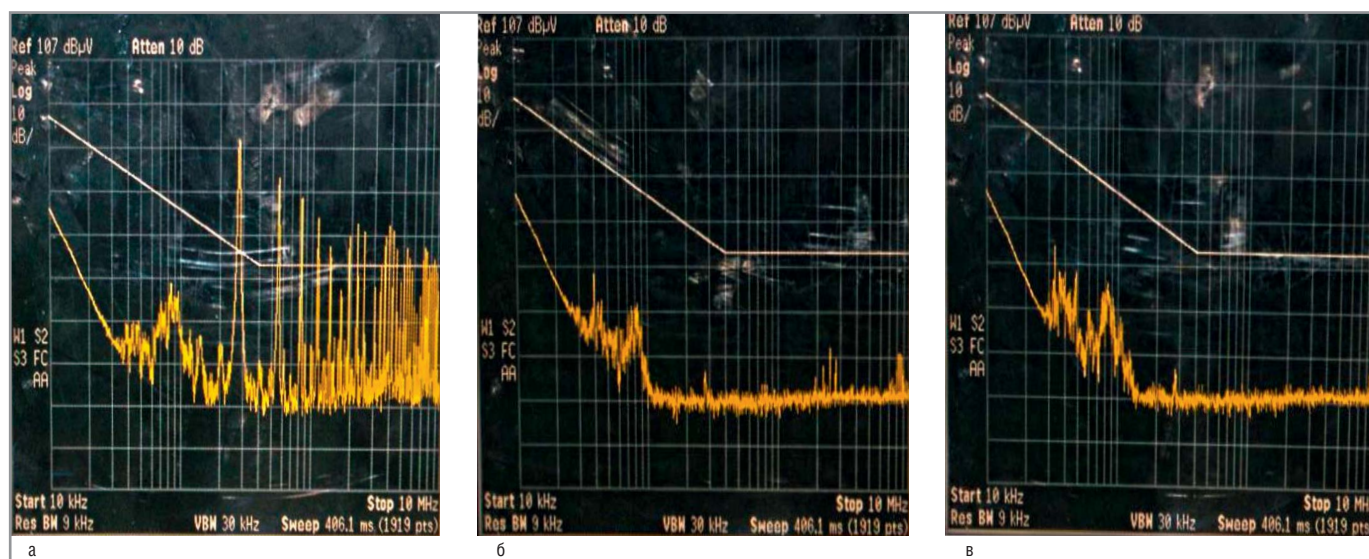


Рис. 13. Эффективность применения помехоподавляющих фильтров на выходе модуля преобразователя HDСD/100-5-5/SP:

а – без фильтра на входе частотный спектр помех, создаваемых модулем, превышает нормы стандарта MIL-STD-461, нормирующая кривая CE102; б – уровень помех, создаваемых модулем, с применением фильтра HFN100-461-80; в – с применением фильтра HFE100-461-300

при котором не происходит катастрофического отказа и одиночных переходных эффектов у радиационно-стойких DC/DC-преобразователей серии HDСD, является значение более чем 65,2 МэВ × см²/мг.

Необходимо заметить, что в апреле 2013 г. в соответствии с требованиями заказчика были выбраны четыре модели DC/DC-преобразователей (HDСD/100-512-30/T1, HDСD/100-5-20/SP, HDСD/100-28-65/SP, HDСD/100-12-30/D1) для испытаний на воздействие отдельными тяжёлыми заряженными частицами с ЛПЭ 65 МэВ × см²/мг. Экспериментальная проверка подтвердила стойкость к воздействиям ТЗЧ по эффекту одиночных сбоев с ЛПЭ 65 МэВ × см²/мг. Четыре модели, отобранные для проведения испытаний, выполненные по одноканальной структуре, с одним, двумя и тремя выходными каналами с выходными мощностями от 20 до 65 Вт. Основные компоненты (ШИМ-контроллер, импульсно-амплитудный модулятор, транзистор VDMOSFET и компаратор) и конструкция всех выбранных для испытаний преобразователей являются идентичными.

Поэтому результат испытаний HDСD/100-15-30/SP (30-ваттная мо-

дель) может представлять уровень стойкости HDСD/100-15-30/SP к воздействию ТЗЧ – этот параметр может достигать значения 65 МэВ × см²/мг.

Помехоподавляющие фильтры для применения с DC/DC-преобразователями серии HDСD/100

Импульсные преобразователи напряжения обеспечивают высокие энергетические и массогабаритные характеристики, но при работе транзисторных ключей, вследствие резкого изменения тока, в силовых цепях возникают радиопомехи в широком диапазоне частот. Чтобы уменьшить помехи, в модулях преобразователей используются фильтры радиопомех, как во входных, так и в выходных цепях. Для дополнительного ослабления кондуктивных помех от импульсных преобразователей напряжения на входе предлагается установка модулей фильтрации серий HFN100 и HFE100. Фильтры выполнены по гибридно-плёночной технологии в металлических корпусах, герметизация которых осуществляется шовно-роликовым соединением, так как пайка оплавлением хорошо подходит для соединения разнородных материалов, происходит при достаточ-

но низких температурах за один цикл и наиболее экономична. Основные технические параметры фильтров представлены в таблице 5.

Эффективность применения помехоподавляющих фильтров HFN100-461-80 и HFE100-461-300 на входе DC/DC-преобразователя HDСD/100-5-5/SP показана на рисунке 13. Применение фильтров значительно снижает уровень пульсаций напряжения на входе DC/DC-преобразователя: напряжение радиопомех значительно ниже нормирующей кривой CE102 (диапазон частот кондуктивных помех от 10 кГц до 10 МГц) стандарта MIL-STD-461E. Коэффициент ослабления помех фильтрами HFN100-461-50/80 и HFE100-461-100/300 на частоте 200 кГц – 35 дБ, на частоте 500 кГц – 45 дБ, на частоте 1000 кГц – 40 дБ, на частоте 2000 кГц – 40 дБ.

В соответствии с количеством DC/DC-преобразователей, используемых в системе, необходимо рассчитывать входной ток при низком напряжении (80 В), так как входной ток преобразователя максимальный при низком входном напряжении.

На основе упомянутых выкладок можно рационально выбрать число фильтров и выходные токи фильтров, необходимых для применения в системе.

Один фильтр может быть соединён с множеством различных DC/DC-преобразователей. На рисунке 14 показано соединение фильтра и нескольких преобразователей.

Фильтры серии HFE100-461-100/300 оснащены функцией дистанционно-

Таблица 5. Помехоподавляющие фильтры для работы в сети постоянного напряжения 100 В

| Модель | Мощность, Вт | Входное напряжение, В | Ток, А | Габариты (Д × Ш × В), мм | Масса, г |
|----------------|--------------|-----------------------|--------|--------------------------|----------|
| HFN100-461-50 | 50 | 80...120 | 0,5 | 51 × 28,94 × 8,68 | 30...40 |
| HFN100-461-80 | 50 | | 0,8 | 51 × 28,94 × 8,68 | 30...40 |
| HFE100-461-100 | 100 | | 1 | 76,7 × 38,6 × 10,66 | 75...85 |
| HFE100-461-300 | 100 | | 3 | 76,7 × 38,6 × 10,66 | 75...85 |

го управления, которая активна при низком уровне напряжения (<0,2 В). Модуль фильтра работает нормально при высоком уровне напряжения (2...5 В), или когда он свободен. В случае, когда на управляющий вход подан низкий уровень напряжения, входной ток будет составлять менее 20 мА. Выходное напряжение при этом – менее 0,5 В. На рисунке 15 представлена схема подключения командного входа управления фильтров HFE100-461-100/300.

Для рационального расчёта теплового режима фильтров полезными являются данные по внутреннему тепловому сопротивлению, приведённые в таблицах 6 и 7.

Для эффективного использования помехоподавляющих фильтров в системе необходимо учитывать некоторые рекомендации.

Правилом установки фильтра является эффективное отделение источника сетевого напряжения от DC/DC-преобразователя. Фильтр не будет выполнять свои функции должным образом, если ЭМП-фильтр неправильно смонтирован. Как вариант, он может работать некорректно. Несколько советов:

- Самое лучшее место установки фильтра – на вводе источника постоянного напряжения. Корпус фильтра и источника напряжения должны быть плотно соединены вместе и затем подключены к системе.
- Входная шина и выходная шина фильтра должны быть разделены, чтобы исключить взаимодействие, так как это может снизить параметры фильтра. Обычно применяется частично соединённый с «землёй» фильтр. Если это невозможно, должен быть использован экранированный ввод для уменьшения связи через общий импеданс.
- Для соединения фильтра необходимо использовать витую пару, что снижает часть высокочастотных помех.
- Низкочастотные характеристики фильтра связаны с объёмом. В том случае, когда необходимы хорошие характеристики в области низких частот, необходимо применять фильтр с большими габаритными размерами.
- Заземляющий проводник фильтра должен быть как можно короче и электромагнитную связь между входными и выходными выводами фильтра необходимо уменьшить до минимума, что не может повлиять на

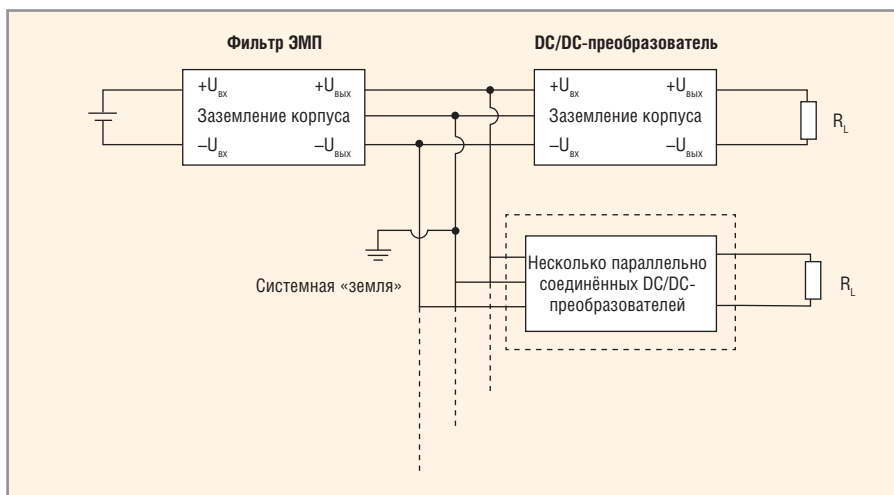


Рис. 14. Соединение фильтра и DC/DC-преобразователей

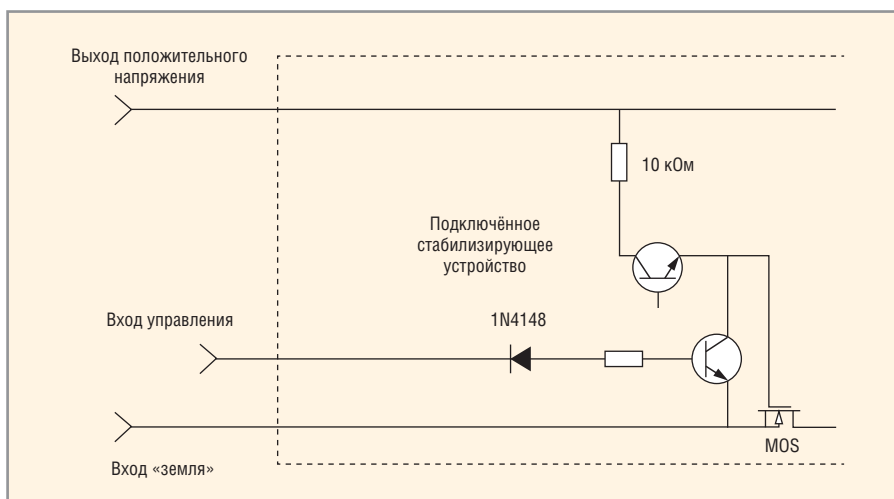


Рис. 15. Подключение командного входа управления включением/выключением фильтров серии HFE100-461-100/300

Таблица 6. Данные для расчёта теплового режима фильтров HFE100-461-100/300

| Модель | Тепловой импеданс, °C/Вт | Габаритные размеры теплоотвода, мм | Рассеиваемая мощность, Вт | Материал теплоотвода |
|----------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| HFE100-461-100 | 0,5 | 20 × 20 × 2 | 5,5 | Медь |
| HFE100-461-300 | | | | |

Таблица 7. Данные для расчёта теплового режима фильтров HFN100-461-50/80

| Модель | Тепловой импеданс, °C/Вт | Габаритные размеры теплоотвода, мм | Рассеиваемая мощность, Вт | Материал теплоотвода |
|---------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| HFN100-461-50 | 5 | 10 × 10 × 2 | 0,24 | Медь |
| HFN100-461-80 | | | | |

подавляющий эффект системы экранирования электромагнитных помех. Идеальный способ монтажа фильтра и источника питания представлен на рисунке 16.

Практические рекомендации по применению фильтров радиопомех совместно с импульсными источниками питания представлены в многочисленных зарубежных и отечественных публикациях, а также в рекомендациях компаний-производителей модулей импульсных источников питания

и фильтров радиопомех для уменьшения уровня радиопомех до допустимых значений в конкретных применениях [4, 5, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ характеристик представленных радиационно-стойких DC/DC-преобразователей серии HDCD/100 для применения в новых типах космической аппаратуры с сетью постоянного напряжения 100 В позволяет сделать вывод, что предлага-

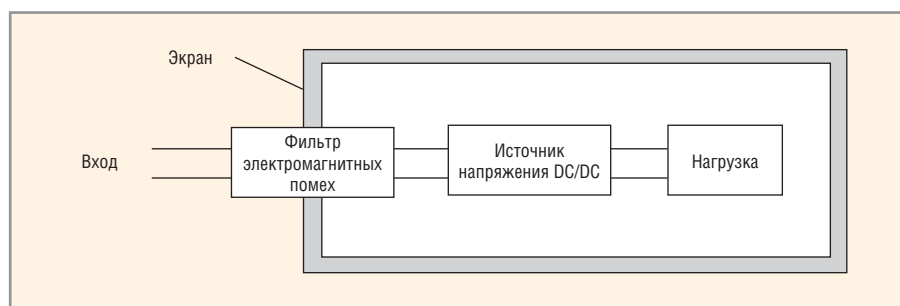


Рис. 16. Схематическое представление идеального монтажа связи ЭМП-фильтра и источника

емые преобразователи можно рассматривать в качестве замены аналогичных изделий ведущих американских производителей (с обзором радиационно-стойких DC/DC-преобразователей производства США для сетей 100 В можно ознакомиться в статье [7]).

Выбрана топология преобразователей, стойкая к воздействию ионизирующих излучений и функционирующая при высоком входном напряжении. Применён высоковольтный радиационно-стойкий транзистор MOSFET с вертикальной структурой, обладающий балансом между относительно высокими потерями на переключение и низкими потерями на проводимость, при этом преодолены противоречивые требования, которые предъявляются полевому транзистору, располо-

женному на первичной стороне преобразователя.

Конструкция преобразователей характеризуется компактными габаритами и небольшим весом и приспособлена для условий космического полёта.

Необходимо отметить, что КПД представленных изделий (особенно мало-мощных) меньше, чем КПД подобных изделий производства компаний из США. Кроме того, у них нет функции внешней синхронизации и не предлагается ряд моделей с низкими уровнями напряжения (менее 5 В, то есть 3,3 В и менее) для питания современных цифровых нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Никифоров А.Ю. Анализ радиационного пове-

дения импульсных стабилизаторов напряжения. Микроэлектроника. 2012. №4. Том 41.

2. Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В. Эффекты от отдельных ядерных частиц во вторичных источниках питания. Спецтехника и связь. 2011. №4–5.
3. Кессаринский Л.Н., Борисов А.А., Бойченко Д.В., Ахметов А.О. Влияние электрического режима на показатели стойкости импульсных стабилизаторов к одиночным сбоям от ТЗЧ. Микроэлектроника. 2015. №1. Том 44.
4. Найвельт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И. и др. под ред. Найвельта Г.С. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. М. Радио и связь. 1986.
5. Робертс Стив. Решение проблем пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация. Компоненты и технологии. 2015. №8.
6. Борисов В.Ф., Лавренков О.П., Назаров А.С., Чекмарёв А.Н. под ред. Назарова А.С. Конструирование радиоэлектронных средств. М. Изд-во МАИ. 1996.
7. Жданкин В.К. Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи для систем электроснабжения космических аппаратов нового поколения с постоянным повышенным напряжением (100 В). Электропитание. 2014. №1.



Новости мира News of the World Новости мира

Минкомсвязь доработает правила использования спектра радиолюбителями

Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации разработало проект приказа, который предлагает упрощение действующих правил радиообмена для радиолюбителей с учётом сложившейся практики.

Так, из действующих требований к использованию радиочастотного спектра любительской службой и любительской спутниковой службой в РФ будут исключены дополнительные требования для формирования позывных сигналов, а также ограничения по времени использования любительских радиомаяков. Проект приказа размещён на Федеральном портале проектов нормативных правовых актов для проведения общественного обсуждения.

Также проектом приказа предлагается исключить Крымский федеральный округ из условной нумерации федеральных округов в связи с вступлением в силу Указа Президента РФ №375 от 28 июля 2016 г. и преобразованием Крымского федерального округа (ФО) в Южный ФО.

Планируемый срок вступления в силу приказа – первый квартал 2017 г.

www.minsvyaz.ru

«Микроэлектроника 2016» собрала около 100 российских разработчиков

Как сообщает Госкорпорация Ростех, около 100 российских научных центров и компаний приняли участие в отраслевом форуме «Микроэлектроника 2016», который прошёл с 26 по 30 сентября 2016 г. в крымской Алуште. Организаторами мероприятия выступили НИИ микроэлектронной аппаратуры «Прогресс» холдинга «Росэлектроника» и НП «ГЛОНАСС».

Форум «Микроэлектроника» впервые в новейшей истории России прошёл в прошлом году. Однако подобные мероприятия регулярно проводились в крымском Гурзуфе в 1970–1990 гг.

В этом году в рамках форума прошла научная конференция «Интегральные схемы и микроэлектронные модули», а также деловая программа. В частности, на конференции выступили представители крупнейших

предприятий холдинга «Росэлектроника»: АО «НПП им. А.И. Шокина «Исток», НПП «Пульсар», НИИ «Феррит-Домен», Новосибирского завода полупроводниковых приборов, НИИМА «Прогресс» и других компаний Ростеха.

Кроме того, были представлены доклады ведущих сотрудников исследовательских центров и университетов России. Всего в рамках восьми тематических секций конференции был представлен 191 доклад.

В рамках форума 30 сентября прошёл сеанс видеосвязи с другим отраслевым мероприятием – конференцией «Перспективные рынки – взгляд в будущее», которая прошла под эгидой Минпромторга с 29 сентября по 1 октября 2016 г. на базе саратовского НПП «Алмаз», входящего в «Росэлектронику».

Кроме того, в рамках форума состоялся финал конкурса стартап-проектов по микроэлектронике «Фестиваль инноваций», организованный при поддержке Зеленоградского нанотехнологического центра, кластера космических технологий фонда «Сколково» и Центра развития социальных инноваций «Технологии возможностей».

www.rostec.ru

POWER ELECTRONICS



ufi
Approved
Event

13-я Международная выставка компонентов
и систем силовой электроники

25–27 октября 2016
Москва, Крокус Экспо



Реклама

Организаторы:



+7 (812) 380 6003 / 07 / 00
power@primexpo.ru

Получите электронный билет:
powerelectronics.ru

