

DC/DC-преобразователи типа POL для применения в аппаратуре авиационной и космической техники

Виктор Жданкин (Москва)

В статье представлен DC/DC-преобразователь MFP0507S типа POL (point-of-load), предлагаемый компанией Crane Electronics, Inc для применения в распределённых системах электропитания бортовой аппаратуры авиационной и космической техники.

Постоянное увеличение пропускной способности и функциональности электронной аппаратуры современных космических аппаратов и авиационной техники приводит к росту энергопотребления. Так, в аппаратуре целевых систем космических аппаратов применяются высокопроизводительные процессоры, цифровые сигнальные процессоры, микросхемы памяти, функциональные устройства на основе базовых матричных кристаллов, использующие несколько номиналов напряжений питания (1,2; 1,8; 3,3 В) и характеризующиеся импульсным изменением потребляемого тока.

Архитектура распределённой системы электропитания с использованием модулей POL-преобразователей давно нашла применение в телекоммуникационных системах, системах передачи данных и промышленном оборудовании [1–5]. Она позволяет минимизировать длину проводников, подводящих питание к нагрузке, и падение напряжения на них, снизить потребляемую оборудованием мощность, ограничить распространение радиопомех и обеспечить стабильность тока при импульсном потреблении.



Рис. 1. Внешний вид модуля DC/DC-преобразователя MFP0507S с горизонтальным расположением выводов для объёмного монтажа; габариты 30,48 × 30,48 × 8,79 мм

Сегодня в распределённых системах электропитания в качестве входного напряжения функциональных плат используется первичное напряжение постоянного тока, а на платах применяются неизолированные DC/DC-преобразователи, которые устанавливаются в непосредственной близости от нагрузки (point-of-load – точка нагрузки).

К преобразователям напряжения постоянного тока типа POL, предназначенным для эксплуатации в бортовой аппаратуре авиационной и космической техники, предъявляются дополнительные требования по стойкости, прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам (механическим, климатическим и специальным средам).

В 2011 г. компания Crane Electronics, Inc (США), известный производитель DC/DC-преобразователей и помехоподавляющих фильтров для авиационно-космических применений, начала производство высокоэффективного DC/DC-преобразователя типа POL MFP0507S, который является первым в серии MFP (Maximum Flexibility Power – мощность с максимальной гибкостью). Эти преобразователи обеспечивают максимальную гибкость благодаря набору управляемых функций и разработаны для формирования стабильного напряжения в широком диапазоне температур от –70 до +150°C (модели в исполнении /WT). На рисунке 1 показан внешний вид модуля MFP0507 с горизонтальным расположением выводов для объёмного монтажа.

Для обеспечения стабильного напряжения с низким уровнем пульсации DC/DC-преобразователи серии MFP не требуют каких-либо внешних компонентов. Они являются высоконадёжными, высокоэффективными

преобразователями для применения с шинами напряжения 3,3 и 5 В. Преобразователь MFP0507S обеспечивает на выходе ряд предустановленных выходных напряжений 0,64; 0,8; 1,6; 2,5 и 3,3 В. Диапазон входных напряжений составляет от 3 до 6 В с отключением модуля при пониженном входном напряжении 2,75 В и при входном напряжении выше 6 В. При этом преобразователь способен выдерживать импульсы напряжения амплитудой 15 В и длительностью 1 с.

В основе схемы неизолированного преобразователя серии MFP используется понижающий (Buck) прямоходовой преобразователь с синхронным выпрямлением. Применение синхронного выпрямителя позволяет существенно повысить КПД [6, 7] и работать синхронно в режиме холостого хода, обеспечивая высокий КПД при небольших нагрузках без отключения синхронных устройств.

Важными свойствами модуля MFP являются: использование во входном каскаде полупроводникового ключа, ограничение пускового тока, синхронизация от системного тактового генератора и возможность распределения выходного тока, что позволяет нескольким включённым параллельно устройствам питать общую нагрузку.

Модуль MFP оснащён внутренней схемой питания, которая активна при входных напряжениях ниже 2 В и обеспечивает повышенное стабилизированное напряжение питания для внутренних схем. Этот внутренний источник питания позволяет модулю обеспечивать полную мощность в нагрузке с высоким КПД при входных напряжениях приближающихся к 3 В без применения внешнего источника питания или внешнего напряжения смещения.

Преобразователи серии MFP разработаны для применения с сильноточными нагрузками с быстрым изменением тока, что является типичным для цифровых схем. Ниже представ-

лены сервисные функции и особенности применения преобразователей серии MFP.

МОНТАЖ И ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ

Модули серии MFP разработаны для установки в непосредственной близости от нагрузки, которая во многих случаях может быть размещена на печатной плате. Высокое значение КПД (до 92%) уменьшает проблемы, связанные с рассеиваемой в модуле тепловой мощностью. Максимальная тепловая мощность 1,83 Вт рассеивается при выходном напряжении 3,3 В и полной нагрузке. Это тепло почти равномерно распределяется по основанию корпуса с площадью 929 мм². Потери при полной мощности нагрузки практически не зависят от выходного напряжения. Например, при выходном напряжении 0,8 В и полной нагрузке максимальная рассеиваемая в модуле мощность опять же составляет 1,83 Вт.

Чтобы определить требования к охлаждению и отводу тепла в конкретном применении, необходимо вычислить максимальную рассеиваемую в модуле тепловую мощность с

учётом КПД и выходной мощности. Для определения КПД при фиксированном входном напряжении, выбранном выходном напряжении и нагрузке могут быть использованы графики и табличные значения, приведённые в спецификации модуля [8]. Рассеиваемая в модуле тепловая мощность (P_{diss}) – разность между входной мощностью и выходной – может быть определена по формуле $P_{\text{diss}} = P_{\text{out}}(1 - \epsilon)/\epsilon$, где P_{out} – выходная мощность; ϵ – КПД.

Установившаяся температура перегрева модуля $\Delta T = P_{\text{diss}}\Phi$, температура корпуса $T_{\text{case}} = T_{\text{base}} + \Delta T$, где Φ – тепловое сопротивление модуля, прикреплённого к плате (°C/Вт); T_{base} – температура основания корпуса модуля.

Многие применения не потребуют особых усилий по охлаждению, однако это зависит от окружающей температуры, расположенных рядом компонентов и других факторов. Если для безопасной работы модуля требуется охлаждение, может быть использован конвекционный или кондуктивный отвод тепла.

Необходимо, чтобы температура основания корпуса модуля MFP была

установлена на безопасном уровне, т.е. меньшем, чем максимальное значение температуры. Все внутренние компоненты модуля соединены с металлическим основанием корпуса. Основание – это поверхность, которая является важной в том случае, когда используется кондуктивный теплоотвод. Обычно модуль крепится к печатной плате или монтажной поверхности с использованием теплопроводящей прокладки или специальной пасты. Подобные прокладки обеспечивают, в некоторой степени, кондуктивный теплоотвод через монтажную поверхность, зависящий от величины потерь на границе раздела. В том случае, когда применяется модуль с горизонтальным расположением выводов для объёмного монтажа, теплопроводящая прокладка плотно прижимает устройство к поверхности, поэтому соединения через выводы служат только для электрических целей и не осуществляют дополнительную механическую фиксацию модуля на плате.

На тепловизионной фотографии (см. рис. 2) видно, что температура внутри корпуса превышает температуру окружающей среды на 6°C. Такое

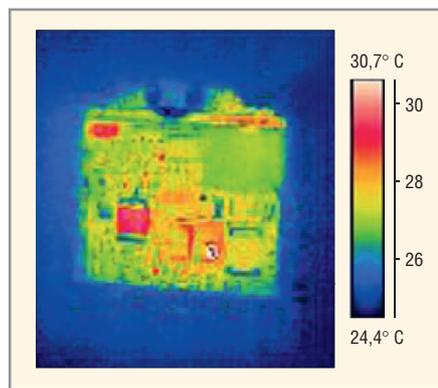


Рис. 2. Инфракрасное изображение модуля MFP при полной нагрузке при входном напряжении 6 В и выходном напряжении 3,3 В

низкое значение перегрева предоставляет разработчикам больше гибкости в вариантах конструкции платы для соответствия рекомендациям по снижению номинальных значений мощности.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФИКСИРУЮЩИХ ЛЕНТ

Для крепления модуля к печатной плате или металлической поверхности рекомендуется использовать двухсторонние клейкие материалы компании Chomerіc. Вследствие высокой эффективности модулей серии MFP, высокие характеристики теплопроводности материалов Chomerіc остаются практически невостребованными.

Следующая информация относится к модулям, прикрепленным с использованием двухсторонних клейких материалов. Модуль MFP0507S был

испытан на воздействие случайной широкополосной вибрации при использовании для фиксации на алюминиевой вибрационной установке материалов T1680 и T404. Испытания на стойкость к вибрации проводились по наиболее жесткому методу 2026 стандарта MIL-STD-883; Condition 2, Letter K, суммарное значение ускорения 51,1 g (с.к.з.) в течение 15 мин по трём осям. Отсоединений модуля от поверхности не произошло.

Рекомендуемый размер для клейких лент 29,97 × 29,97 мм. Подробная информация о применении материалов Chomerіc представлена в справочных листках и рекомендациях по применению. Материал T404 требует высокого прижимного усилия. Материал T1680 создан специально для крепления с низким усилием к корпусам гибридных интегральных микросхем, керамических и плоских корпусов.

В таблице 1 приведены основные технические параметры материалов Chomerіc – теплопроводность, температурный диапазон и выделение газа.

НАЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ И ПРИМЕНЕНИЯ

На рисунке 3 показана схема включения нескольких DC/DC-преобразователей MFP, работающих на разные нагрузки, с использованием служебных сигналов и выводов: ENABLE (внешний сигнал включения модуля), TRIM (вывод подключения внешнего резистора для регулировки выходного напряжения), SENSE (изме-

рительный вход обратной связи) и контроль выходного тока (I_{OUT} Monitoring).

Функция дистанционного включения/выключения

Вывод ENABLE предназначен для обеспечения дистанционного включения/выключения модуля. В том случае, когда вывод открыт или отсоединён, осуществляется нормальное преобразование напряжения. Подключение этого вывода к земле блокирует преобразование напряжения, что приводит к отсутствию выходного напряжения и значительному снижению потребления тока. Функция ENABLE активируется устройством с открытым коллектором, подключённым к выводу, или высоким логическим уровнем напряжения от цифрового устройства до тех пор, пока высокий логический уровень напряжения выше, чем минимальное напряжение, указанное в спецификации для разрешённого функционирования (0,8 В).

Установление последовательности включения

Запуск модуля может быть задержан при подключении к выводу ENABLE внешнего конденсатора. Это свойство является полезным при включении нескольких преобразователей POL в системе, требующей определённой последовательности включения питания при различных низковольтных нагрузках. Задержка включения составляет приблизительно 1 мс на 1 мкФ ёмкости. Более точное значение внеш-

Таблица 1. Технические характеристики материалов Chomerіc

Материал	Теплопроводность, Вт/м К	Температурный диапазон, °С	Данные по выделению газа, %TML/%CVCМ	Рекомендации по монтажу
CHO-THERM 1671 ¹	2,6	-60...200	0,76 0,07	Грубо обработанные поверхности
CHO-THERM T1680 ²	0,65	-60...200	1,27 0,23	Гладкие поверхности
THERMATTACH T404 ²	0,4	-30...125	Нет	Гладкие поверхности

¹Материал Cho-Therm T1671 является хорошим выбором для монтажа на грубо обработанные поверхности. Этот материал имеет стекловолоконный барьер с чувствительностью адгезии к давлению с одной стороны. Если необходимо, он может быть поставлен с PSA на двух сторонах.

²Клейкие ленты Thermattach T404 и Cho-Therm T1680 являются двумя наилучшими средствами для монтажа к печатной плате. Обе имеют изолирующий барьер Kapton с обеих сторон, с чувствительной к прижимному усилию адгезии (pressure sensitive adhesive – PSA).

Таблица 2. Значения ёмкости на входе ENABLE для задержки запуска

Ёмкость (C _T)	Ёмкость на входе ENABLE: задержка от момента разблокировки до начала повышения выходного напряжения (25°С)											Единица измерения
	0,22	0,33	0,47	0,68	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10	
Входное напряжение 3,3 В	0,8	1,1	1,6	2,2	3,1	4,6	6,7	1,0	14,1	20,2	29,7	мс
Входное напряжение 5 В	0,4	0,5	0,7	0,9	1,3	1,8	2,6	3,9	5,5	7,8	11,4	мс

ней ёмкости может быть найдено в таблице 2, с поправкой на изменение входного напряжения.

Указанная в таблице задержка – это время от начала приложения входного напряжения до момента начала внутреннего преобразования напряжения. Существует дополнительная задержка, когда преобразователь начинает нормальный цикл запуска и быстрое линейное нарастание до конечного выходного напряжения.

Модуль MFP оснащён функцией внешней синхронизации (см. рис. 4) частоты преобразования, которая является важнейшим свойством для конструкций с низким уровнем помех. Внутренний генератор может быть синхронизирован с частотой системного тактового генератора или источником напряжения шины. Модуль MFP разработан для синхронизации с частотой 300 кГц, но может быть синхронизирован генераторами с частотой до 400 кГц в диапазоне частот, используемом во многих DC/DC-преобразователях. В синхронизированной системе предотвращается генерирование низкочастотных гармоник в звуковом диапазоне частот. Допускается отклонение амплитуды входного сигнала на входе синхронизации в диапазоне 3...6 В. Частота преобразования зависит от температуры и входного напряжения.

Период синхронизации внешнего сигнала синхронизации может быть различным для систем, использующих тактирование с широким спектром, или для чередования синхронизирующих импульсов ведомых распределённых устройств.

Уровень постоянного напряжения на выводе SYNC может быть использован для определения состояния ключа защиты входных цепей (см. ниже). Диапазон входного напряжения для нормальных условий работы составляет 3...6 В постоянного тока (см. рис. 5). Вывод V_{IN} Common подключается к V_{OUT} Common и заземлению корпуса. В конструкции системы питания входные и выходные цепи должны использовать один и тот же земляной слой.

Дополнительные функции блокирования входа

Во входном каскаде модуля MFP имеется полупроводниковый ключ (SSS – solid state switch). Этот ключ размыкается во время аварийных режимов, включая понижение входного напряжения ниже минимального значения и

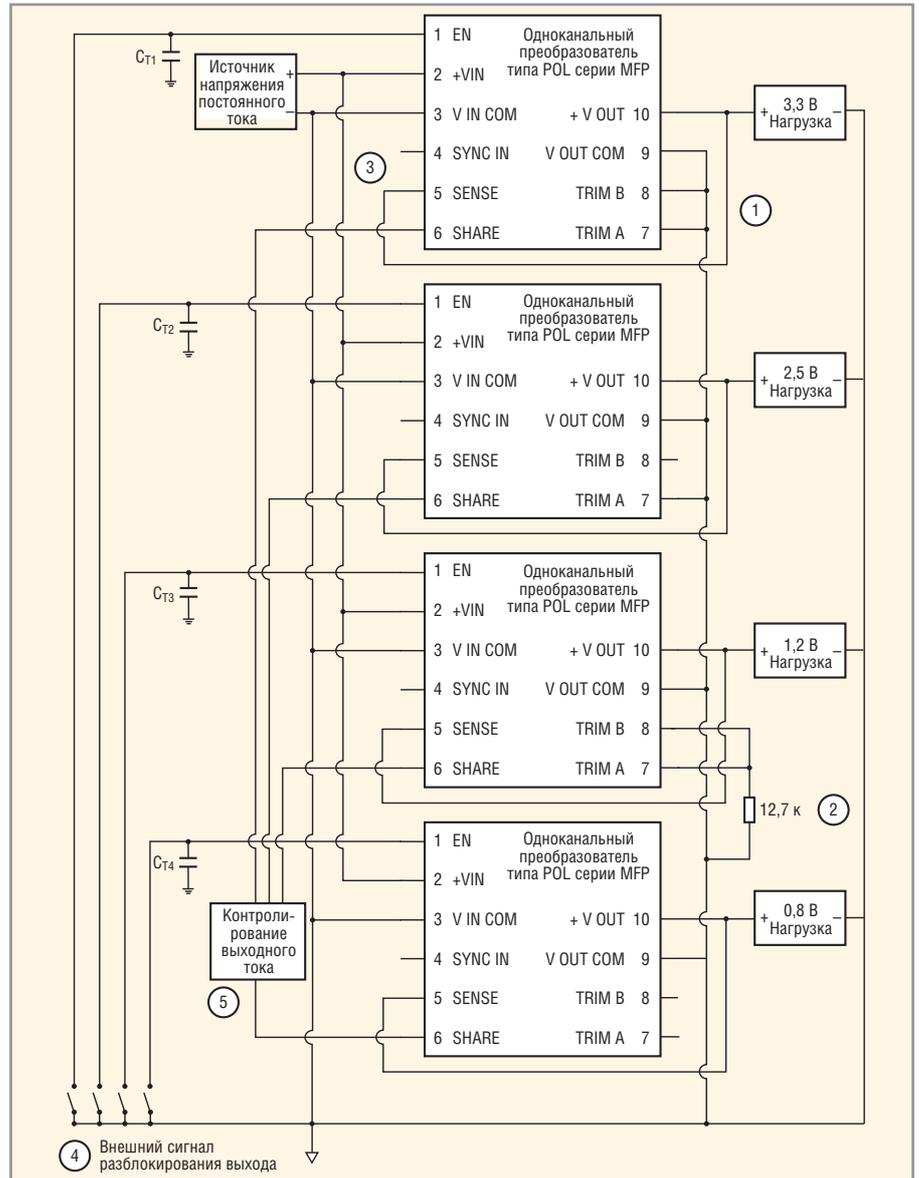


Рис. 3. Типичная схема соединений модулей MFP с использованием выводов ENABLE, TRIM, SENSE и I_{OUT} Monitoring

Цифрами в кружках обозначены: 1 и 2 – выводы 7 TRIM A и 8 TRIM B, предназначенные для установки выходного напряжения; 3 – вывод 5 Remote SENSE, предназначенный для обеспечения точной стабилизации выходного напряжения на зажимах нагрузки; 4 – вывод 1 ENABLE, предназначенный для дистанционного включения/выключения модуля и формирования последовательности выключения модулей в системе; 5 – вывод 6 SHARE, предназначен для равномерного распределения выходного тока между модулями при параллельном включении

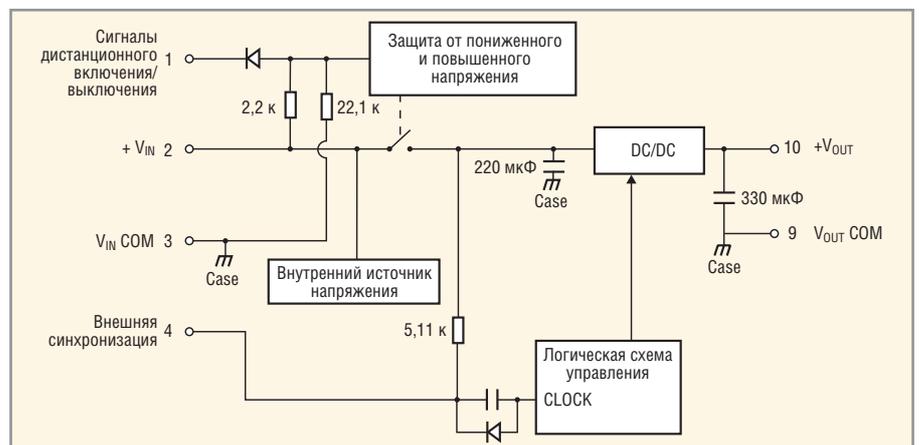


Рис. 4. Эквивалентная схема для сигналов дистанционного включения/выключения (ENABLE) и внешней синхронизации (SYNC)

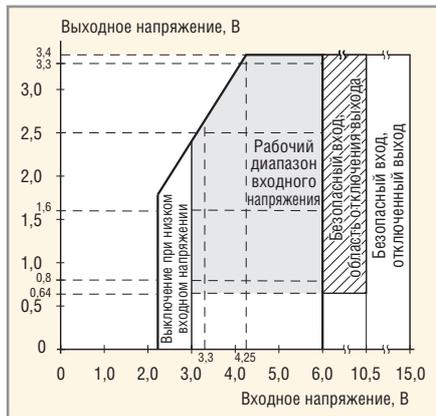


Рис. 5. Зависимость входного напряжения от максимального выходного напряжения

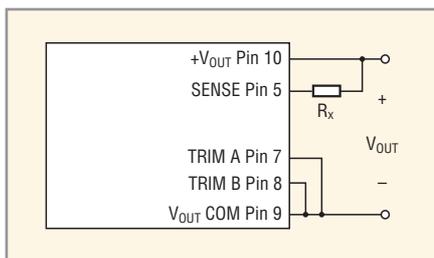


Рис. 6. Схема использования вывода SENSE для увеличения выходного напряжения V_{OUT} с 3,3 до 3,5 В

выбросы напряжения выше максимального значения. Диапазон безопасной работы включает заземление и 7 В без ограничения по времени. Ключ будет замкнут только при соблюдении

определённых внутренних условий, включая правильную работу внутреннего источника напряжения и безопасный диапазон входного напряжения.

Полупроводниковый ключ может быть использован для обеспечения дополнительного уровня надёжности, когда «нет ни одной точки в аварийном режиме» (no single point failure). Ключ может быть разомкнут заземлением вывода ENABLE. Состояние ключа может быть определено считыванием напряжения на выводе SYNC. Уровень лог. 0 на этом выводе указывает, что полупроводниковый ключ разомкнут.

Конденсатор большой ёмкости, установленный на входе, и входной полупроводниковый ключ, описанный ранее, предназначены для обеспечения взаимосвязанного ограничения пускового тока. Весьма низкое значение шума на входе и ограничитель пускового тока делает MFP уникальным среди преобразователей типа POL.

Модуль MFP оснащён измерительным входом обратной связи. Вывод SENSE предназначен для поддержания предварительно установленного напряжения путём подключения к выводу +V_{OUT} источника питания в непо-

средственной близости от нагрузки. Эта функция позволяет компенсировать до 0,3 В падения напряжения на питающей линии при медленных изменениях тока нагрузки. В том случае, когда вывод SENSE не подключён к выводу положительного напряжения модуля, выходное напряжение повысится на 0,4 В.

Выходное напряжение может быть увеличено относительно предустановленного значения не более чем на 0,2 В включением резистора между положительным выводом SENSE и выводом выходного напряжения. Величина повышения выходного напряжения уменьшит доступный диапазон регулирования внешней связью на то же самое значение. Сумма увеличенного напряжения и падения напряжения на проводниках не должна превышать 0,2 В. Увеличение напряжения дополнительным резистором может быть использовано для регулировки выходного напряжения V_{OUT} от 3,3 до 3,5 В.

Соединения должны быть сделаны как можно ближе к выводу Common и к резистору R_x (см. рис. 6). Этот способ использует функцию компенсации напряжения вывода SENSE для повышения выходного напряжения. Следовательно, отсутствует возможность компенсации падения напряжения на нагрузке.

В том случае, когда нет падения напряжения на питающей линии, значение резистора R_x (Ом) определяется по формуле:

$$R_x = \frac{1000}{\frac{0,2697}{V_{OUT} - 3,3} - 1}$$

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНОГО ТОКА

Функция распределения выходного тока обеспечивает работу нескольких модулей как единого модуля, способного обеспечить полный ток, который является суммой максимальных токов каждого из модулей, включённых параллельно. При параллельном включении модулей выводы SHARE соединяется, а выводы ведущего модуля TRIM A и TRIM B подключаются к выводу SENSE. Выводы TRIM ведущего модуля используются для установки желаемого выходного напряжения, в то время как другие, параллельно включённые модули, будут выравнивать ток и напряжение ведущего модуля (см. рис. 7).

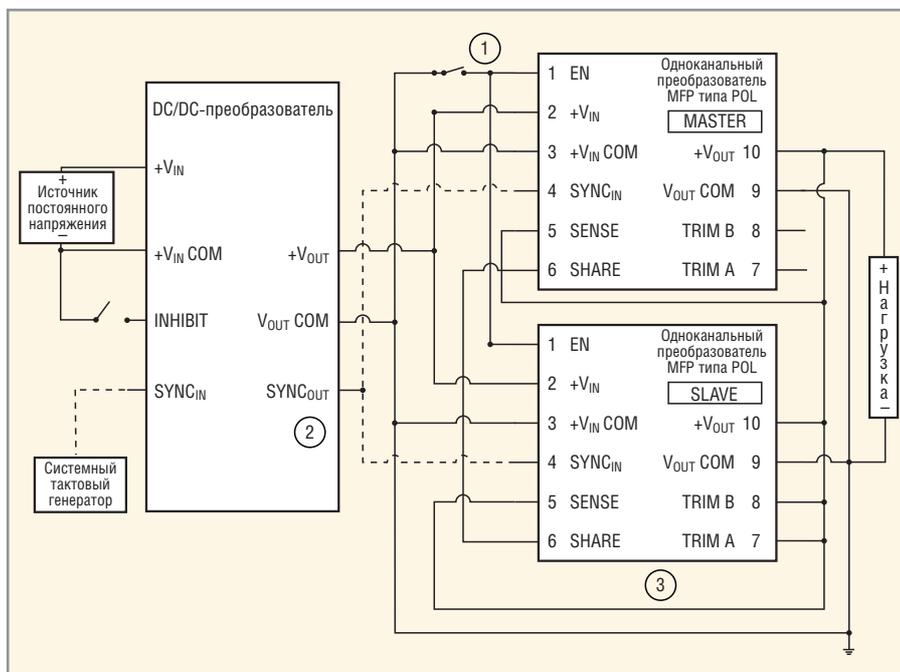


Рис. 7. Типовая схема использования выводов выравнивания выходного тока SHARE и внешней синхронизации SYNC при параллельном включении модулей MFP

Цифрами в кружках обозначены: 1 – вывод 1 ENABLE, дистанционное включение/выключение модуля; 2 – вывод 4 SYNC, синхронизация частоты работы модуля внешним частотным сигналом; 3 – выводы 7 TRIM A и 8 TRIM B, применение выводов установки выходного напряжения при параллельном соединении модулей и вывода SHARE для контроля за выходным током и обеспечения работы модуля в режиме генератора тока, управляемого напряжением, приложенным к выводу SHARE

Вывод SHARE может быть использован для текущего контроля выходного тока, так как напряжение на нём пропорционально выходному току модуля (см. рис. 3). Вывод SHARE также может быть использован для управления модулем MFP в качестве генератора тока, управляемого напряжением, поскольку выходной ток будет пропорциональным приложенному напряжению со смещением. Выходные токи, соответствующие напряжению на выводе SHARE, показаны на рисунке 8. Соединения для контроля выходного тока также показаны на рисунке 3.

Следующие два соединения являются важными для распределения тока между двумя модулями. Выводы SHARE двух (или более) модулей должны быть соединены вместе, а выводы TRIM A и TRIM B должны быть соединены вместе и закорочены с выводами VOUT и SENSE каждого из модулей, которые не являются ведущими. Ведущим модулем будет модуль с наивысшим значением предустановленного выходного напряжения. В схеме, показанной на рисунке 7, ведущий модуль с разомкнутыми выводами TRIM обеспечивает на выходе 0,8 В.

Таблица 3. Выходные напряжения, устанавливаемые с использованием конфигурирования выводов или регулировочных резисторов 1, 2

Желаемое напряжение, В	Реконфигурируемые выводы	Регулировочный резистор (R_T) ¹ между выводами «общий» и 7, 8, кОм
0,64	Фиксированный вывод SENSE V_S	Оба вывода 7 и 8 соединены с выводом SENSE (5)
0,8	Неизменное V_1	Оба вывода 7 и 8 разомкнуты
0,9	Устанавливается регулировкой	–
1,0	Устанавливается регулировкой	–
1,2	Устанавливается регулировкой	–
1,5	Устанавливается регулировкой	–
1,6	Неизменное V_2	Вывод TRIM A (7) разомкнут Вывод TRIM B (8) соединён с землёй
1,8	Устанавливается регулировкой	–
2,0	Устанавливается регулировкой	–
2,5	Неизменное V_3	Вывод TRIM A (7) соединён с землёй TRIM B (8) разомкнут
3,3	Неизменное V_4	Оба вывода 7 и 8 соединены с землёй

¹Значения резистора R_T (кОм) в таблице при выходных напряжениях V_{OUT} ниже 3,3 В и выше 0,8 В определяются по формуле $R_T = 6,031/(V_{OUT} - 0,804) - 2,4$.

²Для установки выходного напряжения в диапазоне от 3,3 до 3,5 В см. раздел, описывающий функцию SENSE, и рис. 6

Выводы TRIM A и TRIM B: установка выходного напряжения

В одноканальном модуле MFP0507S есть возможность установки на выходе любого напряжения в диапазоне от 0,64 до 3,3 В. Модуль MFP имеет пять выходных предварительно установленных напряжений, которые доступны при подключении к

нагрузке соответствующего вывода без регулировочного резистора. Разомкнутая цепь на обоих выводах TRIM обеспечивает выходное напряжение 0,8 В; заземление одного из выводов или обоих выводов обеспечивают точные выходные напряжения 1,6; 2,5 или 3,3 В. Ещё одно предварительно установленное напря-



Рис. 8. Использование вывода SHARE для контроля тока нагрузки: представлены значения выходных токов, соответствующих напряжениям на выводе SHARE

жение возможно с использованием вывода SENSE (вывод 5). Соединение обоих выводов TRIM с положительным выводом SENSE обеспечивает на выходе модуля напряжение 0,64 В. Промежуточные значения выходных напряжений могут быть установле-

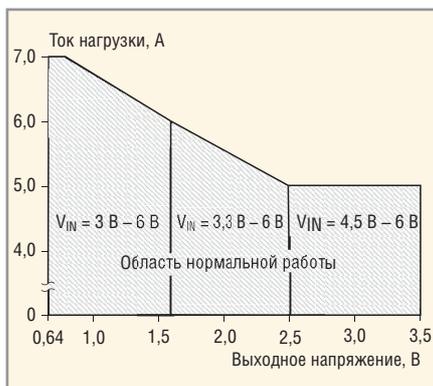


Рис. 9. Максимальные значения выходного тока при различных выходных и входных напряжениях

ны внешними регулировочными резисторами, включёнными между выводами TRIM и землёй.

Любое напряжение с промежуточным значением относительно предварительно установленных напряжений формируется добавлением регулиро-

вочного резистора между выводами Common и обоими выводами TRIM. В таблице 3 представлены выходные напряжения, обеспечиваемые соединением выводов и регулировочных резисторов.

**Выводы 9 и 10:
+Vout и Vout Common**

Топология понижающего преобразователя напряжения требует, чтобы выходное напряжение модуля MFP было всегда ниже, чем входное напряжение, по меньшей мере на 0,8 В. Точные значения допустимых выходных напряжений и токов как функции входного напряжения V_{IN} показаны на рисунке 9.

Контроль качества и доступные модели

Продукция компании Crane Electronics, Inc, предназначенная для длитель-

Таблица 4. Последовательность контроля качества изделий Class H и Class K, MIL-PRF-38534

Выполняемые проверки	NON-QML ¹		QML ²					
	/ST	/WT	CLASS H			CLASS K		
			/883	/HP	/HR	/KP	/KR	/KF
Неразрушающий контроль соединений вытягиванием, Method 2023				+	+	+	+	+
Контроль перед корпусированием, Method 2017, 2032	+	+	+	+	+	+	+	+
Термоциклирование (10 раз), Method 1010, Condition C, -55...150°C		+	+	+	+	+	+	+
Постоянное ускорение (центрифуга), Method 2001, 3000 g (Qual 5000 g)		+	+	+	+	+	+	+
PIND (обнаружение свободных частиц внутри корпуса), Test Method 2020, Condition A		+	+ ³	+ ³	+ ³	+	+	+
Контроль электрических параметров перед тестированием при крайних температурах			+	+	+	+	+	+
Электротермотренировка, Method 1015, +125°C, тип. ⁴ 96 ч 160 ч 2 × 160 ч (включая mid-BI test)		+	+	+	+	+	+	+
Окончательный контроль по электрическим параметрам, MIL-PRF-38534, Group A, Subgroups 1 и 4: +25°C (корпус) Subgroups от 1 до 6, -70, +25, +150°C (корпус) Subgroups от 1 до 6, -55, +25, +125°C (корпус)	+	+	+	+	+	+	+	+
Герметичность корпуса								
Большие течи, Dip (1×10^{-3})	+	+						
Большие течи, Method 1014, Condition C			+	+	+	+	+	+
Малые течи, Method 1014, Condition A			+	+	+	+	+	+
Рентгенография, Method 2012						+	+	+
Контроль электрических параметров после рентгеновского радиографического контроля, +25°C (корпус)						+ ³	+ ³	+ ³
Визуальный внешний контроль, Method 2009	+	+	+	+	+	+	+	+
RNA P: суммарная доза 30 крад (Si) ⁵				+		+		
RNA R: суммарная доза 100 крад (Si) ⁵					+		+	
RNA F: суммарная доза 300 крад (Si) ⁶								+
Отсутствие одиночных эффектов SEE (Single Event Effects) при LET (пороговые линейные потери энергии) заряженной частицы в веществе до 85 МэВ см ² /мг				+	+	+	+	+

Примечания:

¹/ST (стандартное) и /WT (расширенный диапазон температур) являются изделиями, не внесёнными в Перечень сертифицированных изделий, и могут не соответствовать всем требованиям технических условий MIL-PRF-38534.

²Все процедуры сертифицированы и выполняются сертифицированными операторами.

³Не требуется Центром снабжения Министерства обороны США, но выполняется для гарантирования качества изделия. PIND-контроль наличия в корпусе изделия посторонних частиц. Изделие подвергается вибрации с частотой 40...250 Гц, а акустический датчик регистрирует шум, возникающий при соударении частиц при вибрации.

⁴Температура корпуса повышается до +125°C (минимум).

⁵Осуществляется при небольшой мощности дозы облучения до номинальной суммарной дозы.

⁶Применяется небольшая мощность (LDR) дозы до суммарной дозы 100 крад.

ных специфических условий эксплуатации, подвергается эффективным отбраковочным испытаниям по ряду прямых и косвенных электрических признаков. В таблице 4 приведены установленные действующим в США военным стандартом MIL-STD-883G и техническими условиями MIL-PRF-38534 состав и последовательность испытаний, вводимых с целью выявления потенциально ненадёжных изделий. Отбраковка потенциально ненадёжных изделий за счёт дополнительных испытаний позволяет повысить надёжность продукции на порядок.

В настоящее время поставляются модули DC/DC-преобразователей серии MFP в исполнении Class H (для применения в вооружении военной технике) для эффективной отбраковки потенциально дефектных изделий, подвергающиеся при производстве испытаниям, указанным в таблице 4. В конце 2011 г. планируется начать поставки радиационно-стойких модулей серии MFP по Class K (для применения в аппаратуре ракетно-космической техники) со специфицированными значениями суммарной дозы ионизирующего излучения 30 и 100 крад (Si) и гарантиро-

ванным отсутствием одиночных эффектов при воздействии протонов и ионов естественных радиационных поясов Земли, солнечных и галактических космических лучей при значенных пороговых линейных потерь энергии (ЛПЭ) ионов в веществе до 85 МэВ см²/мг. Более подробно методика испытаний радиационно-стойких модулей DC/DC-преобразователей на воздействие ионизирующих излучений и потоков заряженных частиц, а также текущая номенклатура радиационно-стойких моделей компании Crane Electronics, Inc (торговая марка Interpoint™) представлена в [9–11].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жданкин В.К.* Преобразователи напряжения для современных высокопроизводительных цифровых систем. Современные технологии автоматизации. 2002. № 4. С. 40–50.
2. *Козенков Д.* Выбор архитектуры источника питания. Электронные компоненты. 2004. № 6. С. 69–74.
3. *Чанов Л.* Микросхемы силовой электроники в распределённых системах электропитания. Электронные компоненты. 2006. № 6. С. 45–48.

4. *Григлэнд П.* Разработка системы питания устройства с использованием POL-преобразователей. Электронные компоненты. 2009. № 6. С. 17–19.
5. *Лукин А.В.* Распределённые системы электропитания. Электронные компоненты. 1997. № 7; 1998. №№ 2, 3.
6. *Гудинаф Ф.* Повышение КПД импульсных источников питания более 90%. Электроника. 1993. № 14. С. 58–61.
7. *Мионов А.* Применение синхронных выпрямителей в импульсных стабилизаторах напряжения. Радио. 2002. № 5. С. 38–39.
8. Maximum Flexible Power (MFP) Single Output Point of Load MFP0507S Rev F – 2011.02.01. Crane Aerospace & Electronics.
9. *Жданкин В.К.* Радиационно-стойкие изделия силовой электроники фирмы Interpoint. Современная электроника. 2004. № 2. С. 46–50.
10. *Жданкин В.К.* Устойчивость гибридных DC/DC-преобразователей к воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Современные технологии автоматизации. 2005. № 3. С. 6–26.
11. *Жданкин В.К.* Результаты испытаний радиационно-стойких DC/DC-преобразователей фирмы Interpoint воздействием ионизирующих излучений низкой и высокой интенсивности. Современная электроника. 2006. № 4. С. 32–37. ©