

50-Вт POL-преобразователь напряжения с повышенным уровнем радиационной стойкости

Виктор ЖДАНКИН,
инженер,
viktor@prochip.ru

В статье представлен импульсный регулятор напряжения с повышенным уровнем радиационной стойкости для распределенных систем электропитания бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА), предназначенных для развертывания на низких круговых орбитах со сроками активного функционирования менее пяти лет. Модули соответствуют требованиям к программам NASA Class D и могут применяться в аппаратуре КА для сбора данных, которые расширяют научные исследования, но не являются критичными для успеха выполняемой задачи.

Относительно новая философия NewSpace по проектированию бортовой аппаратуры КА с соблюдением баланса между бюджетом, ограниченными короткими сроками вывода изделий на рынок и потенциальной избыточностью конструкции, подробно рассматривалась в [1–2]. В этих статьях представлены DC/DC-преобразователи серии VSC, разработанные компанией VPT в соответствии с требованиями космических программ с короткими сроками активного функционирования с приемлемым уровнем радиационной устойчивости в сочетании с высокими функциональными показателями при небольшой стоимости.

Применение в функциональной части бортовой аппаратуры КА современных вычислительных и управляющих систем микроконтроллерной и микропроцессорной техники для обработки большого объема цифровых и аналоговых данных в реальном времени требует использования подсистем питания на основе преобразователей напряжения с низкими выходными напряжениями и максимальной скоростью нарастания тока нагрузки. Такие преобразователи напряжения без гальванической развязки размещаются в непосредственной близости от нагрузки (Point of Load, POL), что позволяет существенно снизить влияние распределительной сети.

Для проектов NewSpace и других низкоорбитальных программ компания VPT (США) создала импульсный регулятор напряжения без гальванической развязки типа POL VSCPL1210SG/ES+ с повышенным уровнем радиационной стойкости для применения в системах распределенного электропитания с промежуточной шиной. Для формирования промежуточной шины номиналом 5 или 12 В можно использовать 100-Вт модули DC/DC-преобразователей серии VSC.

Конструкция модуля VSCPL1210SG/ES+ для поверхностного монтажа делает возможным обтекаемую пайку оплавлением наряду с другими SMT-компонентами для упрощенной интеграции на уровне платы. Выводы выполнены из меди с покрытием золотом поверх никелевого покрытия. Для соответствия требованиям космической техники используется краска и этикетки с низким газовыделением при вакуумно-тепловом воздействии.

Внешний вид герметизированного модуля регулятора напряжения приведен на рис. 1.

Основные характеристики регулятора напряжения:

- выходная мощность: до 50 Вт;
- ток нагрузки: 10 А;
- высокое значение КПД: до 94%;

- пульсация выходного напряжения:
 - при $V_{IN} = 5\text{ В}$, $V_{OUT} = 3,3\text{ В}$ в диапазоне частот 20 Гц...10 МГц: 25 мВ (пик-пик), максимальное значение: 60 мВ;
 - при $V_{IN} = 12\text{ В}$, $V_{OUT} = 5\text{ В}$ в диапазоне частот 20 Гц...10 МГц: 50 мВ (пик-пик), максимальное значение: 120 мВ;
- коэффициент неустойчивости по току изменении нагрузки от холостого хода \rightarrow 100%: 0,2%;
- отклонение выходного напряжения при скачке нагрузки 50% \rightarrow 100%: 80 мВ (пик.); максимальное значение: 120 мВ (пик.);
- время переходного процесса к установившемуся значению: 30 мкс (макс.: 100 мкс);
- задержка при включении ($V_{IN} 0\text{ В} \rightarrow 5$ или 12 В): 8 мс;
- перерегулирование ($V_{IN} 0\text{ В} \rightarrow 5$ или 12 В): 15 мВ (пик.);
- среднее время наработки до отказа (MTBF): 22,5 млн ч, рассчитанное по MIL-HDBK-217F для температуры корпуса 55 °С при эксплуатации в условиях орбитального космического полета (Space Flight, SF);
- длительная работа без снижения выходной мощности в диапазоне температур $-55...105^\circ\text{C}$;
- габаритные размеры: 30,48×30,48×10,16 мм;
- вес: 32 г.



Рис. 1. Внешний вид конструкции регулятора напряжения VSCPL1210SG/ES+ для поверхностного монтажа

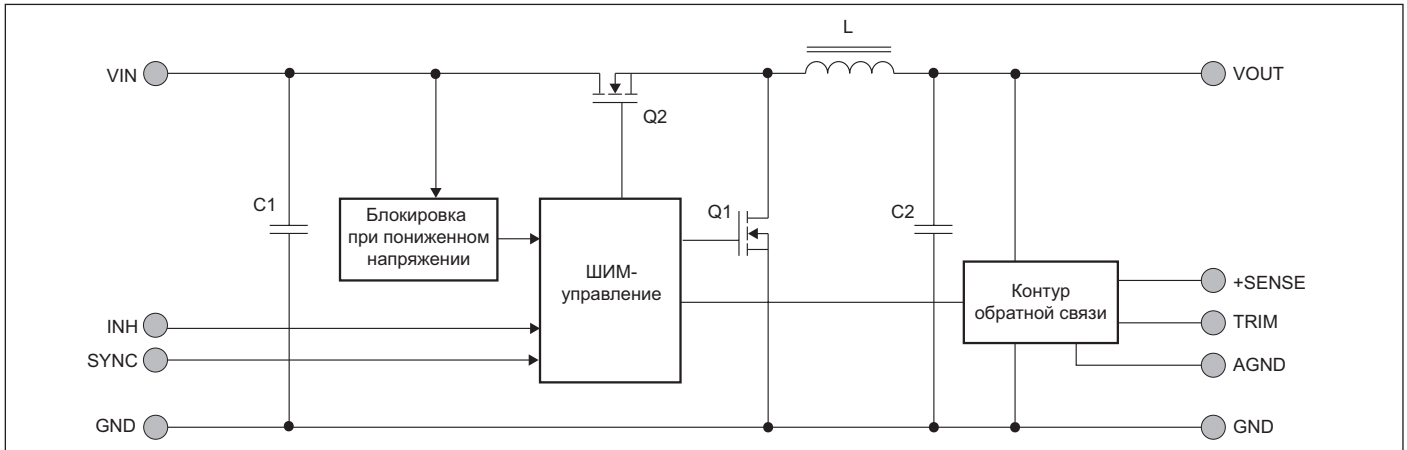


Рис. 2. Схема понижающего импульсного регулятора напряжения VSCPL1210SG/ES+ с синхронным выпрямлением

Описание топологии, сервисные и защитные функции

Преобразователь напряжения VSCPL1210SG/ES+ является неизоллированным понижающим импульсным регулятором напряжения с постоянной высокой рабочей частотой (200–300 кГц) и синхронным выпрямлением. Преобразователь предназначен для работы в диапазоне входных напряжений 4,5–13,2 В и обеспечивает пониженное (0,8–5 В), точно стабилизированное установленное выходное напряжение с высокой эффективностью (КПД до 94%). Модуль оптимизирован для применения в низковольтных распределенных системах электропитания в качестве локализованного к нагрузке стабилизатора.

В схеме преобразователя на входе и выходе установлены необходимые для нормальной работы конденсаторы. Для соответствия техническим характеристикам на входе требуется установить танталовый конденсатор емкостью 100 мкФ. Преобразователь устойчиво работает без емкостной нагрузки, допускается установка на выходе емкости до 5000 мкФ.

Принцип работы импульсных регуляторов постоянного напряжения подробно описан и проанализирован в многочисленных работах; например, свойства импульсных регуляторов напряжения детально рассмотрены в [1]. В этом же источнике представлены способы получения регулировочных характеристик, расчет параметров дросселя и выходного конденсатора, при которых осуществляется работа в режиме непрерывного тока.

Схема понижающего импульсного стабилизатора напряжения VSCPL1210SG/ES+ приведена на рис. 2. Транзистор Q2 управляется импульсами от схемы управления – контроллера широтно-

импульсного модулятора; коммутируемый транзистор Q1, используемый в качестве синхронного ключа вместо привычного диода Шоттки, обеспечивает прохождение тока дросселя после запаривания транзистора Q2. Применение режима синхронного выпрямления позволяет повысить на несколько процентов КПД при больших выходных токах.

Конденсатор C2 улучшает фильтрацию напряжения на нагрузке. Режим работы преобразователя изменяется управляющим сигналом, формируемым ШИМ-контроллером в зависимости от уровня выходного напряжения. Регулятор работает в режиме непрерывного тока в дросселе, при котором этот ток не принимает нулевых значений за период T управляющего сигнала. Транзисторы в этом режиме испытывают меньшие токовые нагрузки. Среднее значение тока в дросселе равно постоянному току в нагрузке, поскольку переменная составляющая этого тока проходит через конденсатор C2. Импульсное напряжение на ключе Q2 имеет амплитуду V_{IN} . Такое же максимальное напряжение имеется на запертом транзисторе Q1, но оно имеет отрицательное значение. Напряжение на дросселе импульсное, причем среднее значение его за период равно нулю.

Выходное напряжение регулятора пропорционально коэффициенту заполнения импульсов управляющего сигнала и всегда меньше входного вследствие падения напряжения на ключе Q2, коммутируемом транзисторе Q1 и сопротивлении меди дросселя: при любом значении коэффициента заполнения $V_{OUT} < V_{IN}$.

При малых токах нагрузки возникает обратный ток дросселя, что снижает эффективность. При этом выходной конденсатор разряжается не только через нагрузку, но и через открытый транзистор Q1. Это

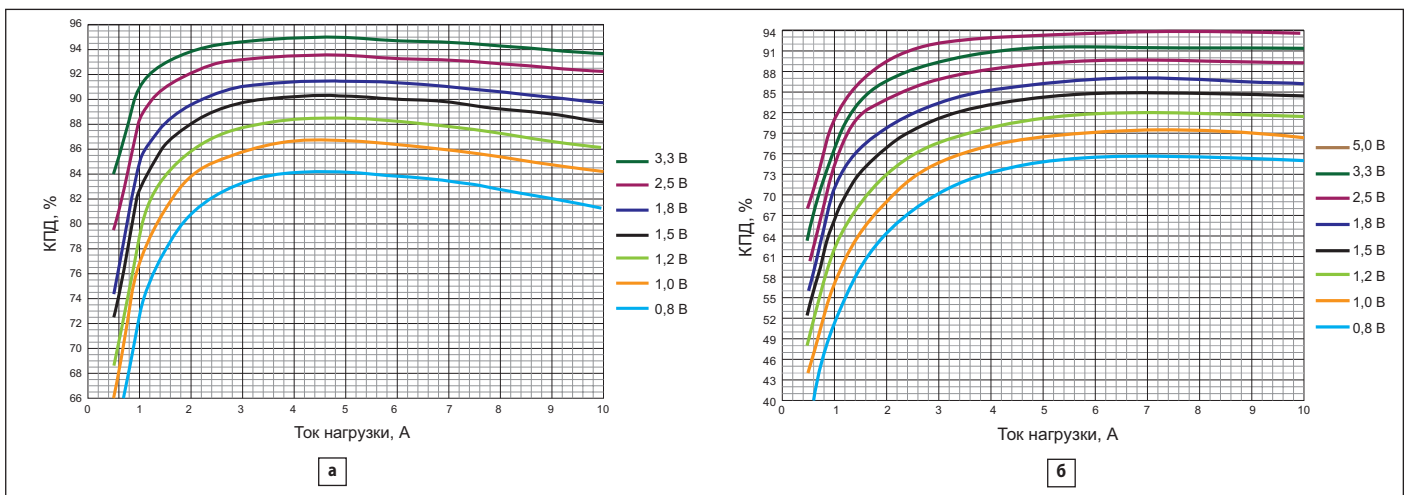


Рис. 3. Зависимость КПД преобразователя от тока нагрузки при входном напряжении: а) 5 В; б) 12 В

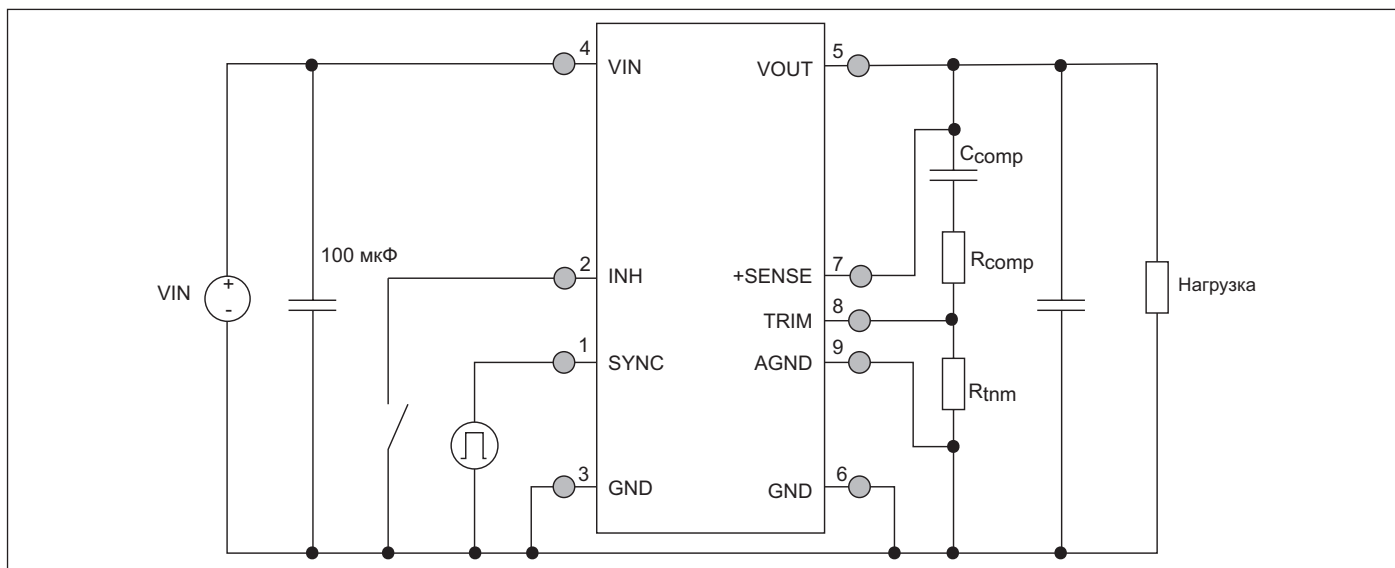


Рис. 4. Типовая схема включения регулятора напряжения VSCPL1210SG/ES+

приводит к дополнительным потерям и снижению эффективности. В режиме ограничения обратного тока транзистор Q1 отключается, когда ток индуктивности (дросселя) снижается до нулевого значения, что препятствует протеканию обратного тока.

При снижении тока нагрузки сокращается длительность рабочего цикла. Минимальное значение, до которого может уменьшиться длительность рабочего цикла, определяется быстродействием схемы управления затворами транзисторов и непосредственно транзисторами. При достижении этого значения контроллер периодически пропускает часть импульсов, что эквивалентно снижению частоты коммутации. Таким образом, при работе в этом режиме два фактора позволяют повысить эффективность: ограничение обратного тока снижает статические потери, а уменьшение частоты коммутации – динамические потери ключевых транзисторов.

Высокое значение КПД (до 94%) в номинальном режиме работы уменьшает перегрев и повышает надежность. На рис. 3 показаны зависимости КПД модуля от тока нагрузки для входных напряжений 5 и 12 В при разных выходных напряжениях. Уменьшение КПД при выходных мощностях близким к максимальной объясняется ростом потерь в компонентах модуля. Однако сокращение потерь составляет максимум 2% при выходном напряжении 0,8 В.

На входе и выходе схемы регулятора установлены конденсаторы для нормальной работы. Для соответствия указанным техническим характеристикам на входе требуется установить танталовый конденсатор емкостью 100 мкФ. Преобразователь устойчиво работает без емкостной нагрузки, допускается установка на выходе емкости до 5000 мкФ. Типовая схема включения регулятора напряжения приведена на рис. 4.

Внешний резистор, подключенный к выводам TRIM и AGND, устанавливает выходное напряжение. В том случае, если резистор не используется, выходное напряжение устанавливается равным 0,6 В. Для обеспечения точной настройки выходного напряжения рекомендуется применять резисторы с допустимым отклонением от номинала 0,1%. Для выбора номинала резисторов в справочном листке приведена таблица по выбору резисторов и формула для расчета значения резистора в зависимости от требуемого выходного напряжения. Максимальное значение устанавливаемого выходного напряжения составляет 5 В.

Для компенсации в контуре управления стабилизатора напряжения должна быть подключена последовательная RC-цепь между выводами +SENSE и TRIM. Рекомендации по выбору значений элементов корректирующей цепи даны в справочном листке. Требуемые значения резистора и конденсатора зависят от емкости внешних

конденсаторов и их эквивалентного последовательного сопротивления (ESR). Если внешний конденсатор не используется, тогда $R_{COMP} = 20$ Ом, $C_{COMP} = 2,7$ нФ. В качестве конденсатора C_{COMP} рекомендуется применять керамические конденсаторы из диэлектрических материалов C0G или NP0, емкость которых незначительно меняется в зависимости от действующего напряжения и стабильна во всем диапазоне температур.

Импеданс входного источника напряжения может взаимодействовать с преобразователем и влиять на технические характеристики. Высокое значение импеданса источника часто вызывается длинными соединительными проводами или другими компонентами, установленными последовательно с входом. В некоторых случаях для стабилизации работы системы на вход необходимо установить дополнительный конденсатор с минимальной емкостью 100 мкФ, поддерживающий входное напряжение в переходных режимах. Установленные керамические конденсаторы в схеме регулятора уменьшают перенапряжения на транзисторах MOSFET, а также ослабляют токовую нагрузку на добавленные на вход внешние конденсаторы. Для конденсатора емкостью 100 мкФ и более среднеквадратичное действующее значение токов дополнительных конденсаторов определяется, в основном, их совместным ESR. В справочном листке приводятся графики, определяющие среднеквадратичное действующее значение общего тока в дополнительных конденсаторах при разных отношениях V_{OUT}/V_{IN} . Для построения графиков учитывались наихудшие условия по току нагрузки, внутренняя емкость и рабочая частота. Кроме того, приводятся формулы для расчета тока, эквивалентная схема с источником импульсного тока для оценки среднеквадратичного тока. В некоторых случаях, с учетом допустимых отклонений, температуры и влияния смещения постоянного напряжения для снижения среднеквадратичного тока через внешний танталовый конденсатор необходимо установить на вход внешний керамический конденсатор большой емкости.

Для обеспечения соответствия требованиям к пульсациям выходного напряжения и параметрам переходного процесса к установившемуся значению при скачках тока нагрузки необходимо выбрать выходные конденсаторы. Соответствие требованиям к динамическому процессу выполняется с помощью достаточно небольшого выходного импеданса. Пиковый выходной импеданс для преобразователей с высокой рабочей частотой, подобным VSCPL1210SG/ES+, обычно определяется величиной ESR выходной емкости. По этой причине выходные конденсаторы должны быть выбраны так, чтобы установить определенное максимальное значение ESR. Общее значение ESR – это параллельное соединение ESR внутреннего конденса-

тора и дополнительных конденсаторов. Количество дополнительных конденсаторов вычисляется с учетом заданных требований к параметрам переходного процесса, максимального скачка тока на нагрузки и ESR каждого дополнительного конденсатора. Необходимо убедиться, что дополнительная емкость не превышает значения максимальной допустимой емкости для конкретного выходного напряжения (до 5000 мкФ), используя формулу:

$$C_{\text{OUT-MAX}} = 10000 \text{ мкФ} / V_{\text{OUT}}$$

Пульсацию выходного напряжения можно определить с помощью эквивалентной схемы из справочного листка, созданной с учетом наихудших условий – влияния допусков компонентов, предельных температур ($-55 \dots 105^\circ\text{C}$) и радиации (30 крад).

Поскольку источники питания в космической аппаратуре подвергаются воздействию жестких факторов, в источнике питания обязательно наличие комплекта защитных и сервисных функций для безопасной эксплуатации и изменения режимов питания для борьбы с нарушениями функционирования в результате радиационного воздействия.

Схема блокировки при пониженных напряжениях на входе имеет некоторый гистерезис. При входных напряжениях ниже порогового значения (в диапазоне 4–4,45 В) регулятор остается в выключенном состоянии. Когда входное напряжение превысит пороговое значение напряжения, регулятор включится. При входных напряжениях ниже рабочего диапазона, но выше порогового напряжения выключения (3,3–3,8 В) регулятор достигает своего максимального значения коэффициента заполнения импульсов, а выходное напряжение может выйти за пределы стабилизации.

Регулятор использует функцию мягкого запуска выходного напряжения для его линейного изменения в управляемом режиме, исключая перерегулирование и ограничивая пусковой ток при включении. Детально система плавного старта для запуска преобразователей напряжения, используемых в распределенных системах электропитания, рассмотрена в [3]. Работа схемы плавного старта от выходного напряжения обеспечивает его постоянство независимо от тока нагрузки. Время нарастания выходного напряжения составляет примерно 6 мс. Функция плавного старта активна, если модуль включается при подаче входного напряжения, или при разблокировке входа дистанционного включения (INHIBIT). Время задержки при включении определяется от подачи входного напряжения (или разблокировки входа INHIBIT) до достижения выходным напряжением 90% своего установившегося значения.

При возникновении режима короткого замыкания нагрузки (ток на выходе примерно 25 А) регулятор выключается и переходит в пульсирующий режим работы, в котором он периодически включается для определения наличия перегрузки и выключается, если это подтверждается. После устранения причины перегрузки система плавного старта регулятора позволяет возобновить работу в нормальном режиме. В режиме короткого замыкания в преобразователе рассеивается небольшая мощность в пределах 0,7–2 Вт.

Модуль рассчитан на работу с полной мощностью до 105°C . Работа выше 105°C допускается с пониженной мощностью. Точнее, выходная мощность должна линейно понижаться от наибольшего значения при 105°C до половины номинальной мощности при температуре корпуса 110°C и до нулевой мощности при 115°C . Рабочая температура определяется на основании нижней плоскости корпуса. Регулятор позволяет осуществлять кондуктивный отвод тепла (то есть за счет теплопроводности) при соединении теплоотводящей нижней поверхности корпуса с радиатором, металлическими элементами конструкции, печатной платой или другими теплоотводящими поверхностями. Схема регулятора содержит много полупроводниковых компонентов. Максимальная температура перегрева на участке «полупроводниковый переход – корпус» при полной нагрузке равна 26°C . По известным значениям мощности потерь, температуре перегрева и тепловому сопротивлению можно определить температуру кор-

пуса, при которой модуль способен работать без радиатора (дополнительного теплоотвода). Уникальная технология корпусирования позволяет отводить тепло через две плоскости.

Для управления несколькими модулями при определении последовательности подачи выходного напряжения можно использовать вход выключения внешним сигналом со стороны входа (INHIBIT). Эта функция также востребована в таких применениях, как удержание модуля в выключенном состоянии для сохранения энергии в течение времени, когда не требуется выходное напряжение; задержка включения преобразователя длится до тех пор, пока не установится входное напряжение.

Синхронизация от внешнего генератора обеспечивает работу нескольких модулей на одной рабочей частоте, что позволяет уменьшить пульсации потребляемого тока. Частота внешнего синхросигнала должна быть в диапазоне 250–300 кГц (частота синхронизации выше рабочей частоты ШИМ-контроллера), а коэффициент заполнения синхроимпульсов находится в пределах 20–80%.

При размещении нагрузки на некотором удалении от преобразователя для исключения влияния падения напряжения на соединительных проводах или дорожках печатной платы имеется возможность использовать функцию внешней обратной связи. Сигнал обратной связи поступает непосредственно с входных контактов нагрузки и подается на вывод +SENSE.

Обеспечение гарантированной радиационной стойкости

Компания применяет традиционный подход к радиационным испытаниям для гарантирования характеристик изделия при эксплуатации в условиях космического пространства. Внутренний план гарантирования радиационной стойкости коммерческих изделий при эксплуатации в космической аппаратуре документирует технологические процессы и методы для обеспечения параметров коммерческих изделий в условиях воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства, включая дозовые и одиночные эффекты. Кроме того, преобразователи напряжения квалифицированы на восприимчивость к длительному воздействию низкоинтенсивного излучения (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS) испытаниями образцов низкоинтенсивным облучением 10–100 мрад (Si)/с до накопленной дозы 30 крад (Si). Испытания на стойкость к воздействию радиации по дозовым эффектам проводились на установке гамма-излучений с источником ионизирующих излучений изотопа ^{60}Co .

Параметры радиационной устойчивости гарантируются сочетанием определения параметров как на уровне модулей, так и испытанием выборки отдельных партий всех чувствительных к радиации полупроводниковых компонентов в модуле облучением высокой интенсивности. В табл. 1–2 кратко приведены процедуры радиационных испытаний полупроводниковых элементов и модулей; кратко изложена программа гарантирования параметров радиационной стойкости модулей.

Испытания на стойкость к одиночным сбоям от воздействия тяжелых заряженных частиц проводились на циклотроне с облучением набором из четырех ионов с длинами свободного пробега в кремнии более 90 мкм. При испытаниях по определению значений переходных ионизационных реакций поддерживался минимальный интегральный поток (флюенс) $1 \cdot 10^6$ ионов/ см^2 , а минимальный флюенс $1 \cdot 10^7$ частиц/ см^2 обеспечивался при испытаниях по определению катастрофических эффектов. Плотность потока ионизирующих частиц поддерживался в пределах 10^3 – 10^5 частиц/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

Испытания на стойкость к воздействию ионизирующих излучений по одиночным необратимым эффектам выполнялись при наивысших пороговых ЛПЭ 48 МэВ· $\text{см}^2/\text{мг}$ при максимальном входном напряжении и полной нагрузке. Это абсолютный наихудший режим работы, при котором не наблюдались катастрофические одиночные эффекты SEB, SEGR и SEL.

Таблица 1. Радиационные испытания и показатели радиационной стойкости

Радиационные условия		Приемочные испытания полупроводниковых элементов (RLAT)	Определение параметров модуля
Суммарная накопленная доза	высокая интенсивность облучения	30 крад (Si)	30 крад (Si)
	низкая интенсивность облучения	–	30 крад (Si)
Одиночные эффекты	катастрофические (необратимые) (SEB, SEGR, SEL)	не применяется	≥ 42 МэВ·см ² /мг
	обратимые (SET, SEU, SFFI)	не применяется	≥ 30 МэВ·см ² /мг

Таблица 2. Краткое изложение плана гарантирования радиационной стойкости (RHA)

Испытание	План RHA для модулей серии VSC
Суммарная накопленная доза	Чувствительные компоненты подвергаются приемочным радиационным испытаниям до накопленной дозы 40 крад (Si) по методу 1019 стандарта MIL-STD-883. Изготовленные преобразователи испытываются до накопленной дозы 30 крад (Si).
Длительное воздействие низкой мощности дозы (ELDRS)	Преобразователи испытывались облучением низкой интенсивности 10–100 мрад (Si)/с до 30 крад (Si).
Воздействие заряженных частиц, вызывающих одиночные сбои (SEE)	Преобразователи квалифицированы до пороговых линейных потерь энергии (ЛПЭ) ≥ 42 МэВ·см ² /мг, при которых возникают необратимые одиночные эффекты (SEL, SEB, SEGR) и до ЛПЭ ≥ 30 МэВ·см ² /мг, когда возникают ионизационные реакции в виде импульсов напряжения на выходе (SET) и функциональные прерывания при воздействии тяжелых заряженных частиц.
Приемочные радиационные испытания партий компонентов (RLAT)	Все партии чувствительных к радиации полупроводниковых компонентов подвергаются испытаниям на стойкость к накопленной дозе облучением высокой или низкой интенсивности.

Таблица 3. Процедуры испытаний, применяемые в технологическом процессе изготовления преобразователя

Процедура испытаний	Модуль VSCPL1210SG/ES+ (исполнение/ES+)
Визуальный внутренний контроль модуля (перед герметизацией)	IPC-A-610, Class 3
Термоциклы	MIL-STD-883, метод 1010, условие B, температура –55...125°C, 10 циклов
Электротермотренировка	96 ч при 105°C
Визуальный внешний контроль	внутренняя процедура

Детально программа гарантирования радиационной стойкости изделий для применения в программах NewSpace изложена в [5].

Отбраковочные технологические испытания

В процессе изготовления преобразователей проводятся 100%-отбраковочные испытания. Их целью является отбраковка менее надежных изделий по сравнению с требованиями технических условий. Состав испытаний включает в себя процедуры, приведенные в табл. 3.

В ходе испытаний вызывается отказ потенциально ненадежных изделий, и повышается надежность партии оставшихся изделий.

При термоциклировании температура меняется быстро и часто в указанном диапазоне с охлаждением в воздухе. Термоциклы позволяют ускорить скрытые дефекты в конструкции изделия. Термоциклирование с нагреванием и охлаждением в воздухе, в основном, оказывает влияние на внутренние межсоединения.

В процессе электротермотренировки изделие работает при максимально допустимом напряжении и максимально возможной температуре; при этом ускоряется срабатывание механизмов отказов изделия. Электротермотренировка является эффективным средством ускорения срабатывания эксплуатационных механизмов отказов, которое дает много информации за короткое время. После электротермотренировки допустимый процент дефектных изделий не должен превышать 5%, как указано в стандарте MIL-STD-883 [6].

Отбраковка потенциально ненадежных изделий за счет дополнительных испытаний позволяет повысить надежность изделий на 1,5 порядка и выше по сравнению с уровнем качества изделий массовой продукции.

Заключение

Новый импульсный регулятор напряжения гарантирует высокую стабильность рабочих характеристик в жестких условиях эксплуатации в бортовой аппаратуре КА. Параметры радиационной стойкости соответствуют требованиям к изделиям для применения в программах NASA Class D и других низкоорбитальных программах со сроками активного функционирования менее пяти лет.

Комплект сервисных функций и защит позволяет упростить конструкцию дополнительных устройств управления и контроля, а также устройств защиты в составе блока источника электропитания на борту КА за счет сокращения числа внешних элементов обвязки и дополнительных элементов, реализующих требуемые функции, что позволяет снизить массогабаритные характеристики бортовой аппаратуры.

Литература

- Жданкин В. Серийные DC/DC-преобразователи с повышенной радиационной стойкостью для аппаратуры низкоорбитальных космических аппаратов. Электронные компоненты. 2025. №10.
- Жданкин В. Баланс стоимости и надежности в DC/DC-преобразователях для проектов NewSpace. Современная электроника. 2026. №2.
- Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. Москва. Техносфера. 2006. ISBN 5-94836-051-2.
- Котов В., Рудаковский Д. Система плавного старта для DC/DC-конверторов. Силовая электроника. 2012. №2.
- Brandon Witcher. Radiation Hardness Assurance: VPT's Approach to NewSpace DC-DC Converter Reliability. White Paper // <https://www.vptpower.com>.
- Горлов М., Строгонов А., Шацких Д. Технологические тренировки интегральных схем. Компоненты и технологии. 2009. №4.