

Радиационно-стойкие линейные стабилизаторы напряжения со сверхнизким падением напряжения для ракетно-космической техники

В статье представлены новые радиационно-стойкие линейные стабилизаторы напряжения серии IRUH3301 компании International Rectifier (группа подразделений компании «Высоконадежные изделия» — HiRel). Интегрально-гибридные стабилизаторы характеризуются сверхнизким падением напряжения 0,4 В при токе нагрузки 3 А. Они предназначены для применения в распределенных системах электропитания космических аппаратов и транспортных космических кораблей в качестве локализованных к нагрузке стабилизаторов, а также для дополнительной стабилизации напряжения после DC/DC-преобразователей.

Виктор ЖДАНКИН

Введение

Всеобъемлющая интеллектуализация борта является устойчивой тенденцией, которая влияет на концепцию создания радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (КА). В бортовой аппаратуре КА (подсистеме сигнальной обработки, центральном бортовом компьютере, аппаратуре ввода/вывода информации и др.) широко применяются высокопроизводительные специальные процессоры, а также ПЛИС с низким напряжением питания и большим током потребления. Эти цифровые микросхемы, с точки зрения электропитания, являются мощными и динамичными. Для их питания, как правило, используются эффективные импульсные преобразователи.

Однако применение этих преобразователей связано с таким недостатком, как влияние шумов. В результате предпочтение зачастую отдается линейным стабилизаторам напряжения с небольшим падением напряжения [1]. Специфическим и одним из важнейших требований к электронным компонентам, предназначенным для применений в составе аппаратуры КА, является радиационная стойкость, которая во многом определяет вероятность безотказной работы бортовых систем и, как следствие, длительность срока активного существования (САС) КА. (В настоящее время стоит задача обеспечения САС КА в течение 10–15 лет.)

Для обеспечения питанием СБИС и ПЛИС, требовательных к уровню шумов, компания International Rectifier предлагает радиационно-стойкие (RAD-Hard) линейные стабилизаторы напряжения (LCH) со сверхнизким падением напряжения (ULDO) серии IRUH3301, выполненные по интегрально-гибридной технологии с применением КМОП-микросхемы типа «кремний на изоляторе». В таблице 1 приведены основные характеристики LCH серии IRUH3301, а на рис. 1 показан внешний вид стабилизатора в компактном 8-выводном корпусе Flat Pack для поверхностного монтажа. Необходимо заметить, что доступны также модели в металлических корпусах MO-078 для монтажа в отверстия печатной платы.



Рис. 1. Внешний вид линейного стабилизатора напряжения со сверхнизким падением напряжения, выполненного в компактном 8-выводном корпусе Flat Pack

Таблица 1. Технические характеристики интегрально-гибридных линейных стабилизаторов напряжения серии IRUH3301

Код	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Корпус
IRUH330118AK	3,3	1,8	3	8-выводной Flat Pack
IRUH330118AP	3,3	1,8	3	8-выводной Flat Pack
IRUH330125AK	3,3	2,5	3	8-выводной Flat Pack
IRUH330125AP	3,3	2,5	3	8-выводной Flat Pack
IRUH330133AK	5	3,3	3	8-выводной Flat Pack
IRUH330133AP	5	3,3	3	8-выводной Flat Pack
IRUH3301A1AK	3,3	Регулируемое	3	8-выводной Flat Pack
IRUH3301A1AP	3,3	Регулируемое	3	8-выводной Flat Pack
IRUH3301A2AK	5	Регулируемое	3	8-выводной Flat Pack
IRUH3301A2AP	5	Регулируемое	3	8-выводной Flat Pack

Схемотехническое решение и особенности применения

Упрощенная принципиальная схема ЛСН серии IRUH3301 приведена на рис. 2. (В стабилизаторе с регулировкой выходного напряжения верхний резистор делителя напряжения отсутствует и к средней точке делителя напряжения подключается внешний резистор: вывод V_{SENSE} заменяется на вывод внешнего резистора ADJ.)

Стабилизаторы серии IRUH3301 выполнены по хорошо известной схеме компенсационного стабилизатора с последовательным включением регулирующего элемента (РЭ), в котором заданные характеристики выходного напряжения обеспечиваются с помощью цепи обратной связи, воздействующей на регулирующий элемент [2–7]. Стабилизация напряжения в стабилизаторе с последовательным включением РЭ осуществляется посредством автоматического изменения его сопротивления под действием управляющего сигнала, называемого сигналом ошибки. Сигнал ошибки формируется с помощью усилителя ошибки на основании сравнения части выходного напряжения стабилизатора и напряжения источника опорного напряжения. Изменения входного напряжения или тока нагрузки приводят к соответствующему изменению сопротивления РЭ и падению напряжения на нем. Для нормальной работы стандартного интегрального стабилизатора входное напряжение должно превышать выходное напряжение по крайней мере на 3 В. Для стабилизаторов с большими выходными токами и небольшими напряжениями такое падение напряжения приводит к значительным потерям мощности и увеличению размеров элементов рассеивания тепла. Существенное снижение падения напряжения на стабилизаторе достигается путем применения в качестве регулирующего элемента *rpr*-транзистора [3, 4, 6]. В качестве базового тока выходного транзистора РЭ используется ток стока транзистора МДП (MOSFET). Минимальное падение напряжения на стабилизаторе равно напряжению насыщения коллектор — эмиттер транзистора РЭ и не превышает 0,4 В.

На рис. 3 показана схема типового включения линейного стабилизатора с фиксированным выходным напряжением. (Вывод SHDN распаян так, что модуль постоянно находится в состоянии ON — «Включен».)

В моделях с функцией регулировки выходного напряжения необходимо устанавливать внешний резистор R_1 , подключаемый к выводу ADJ, номинал которого определяется в соответствии со следующей формулой:

$$R_1 = (V_{OUT}/0,8 - 1) \times 499.$$

В таблице 2 приведены ближайшие (в пределах допуска 0,1%) значения сопротивления резистора R_1 для получения заданных значений выходного напряжения.

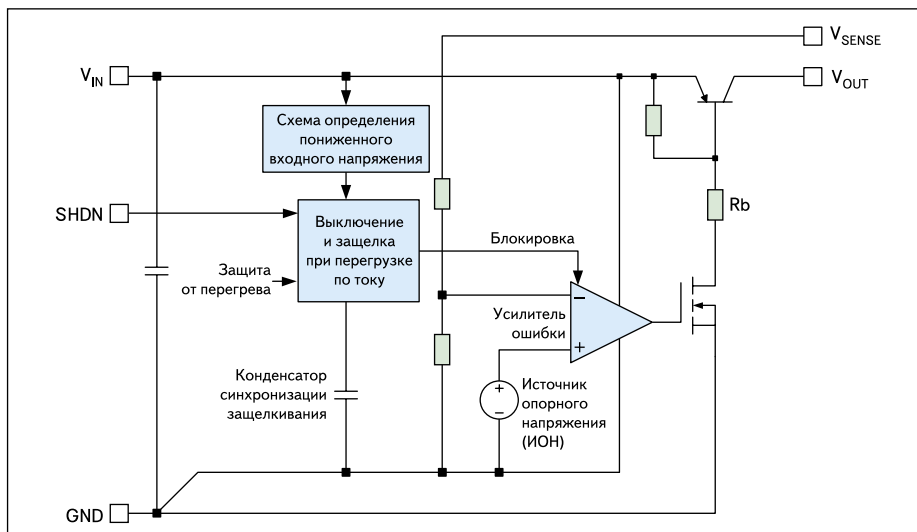


Рис. 2. Упрощенная схема ЛСН серии IRUH330118AK/AP без функции регулировки выходного напряжения

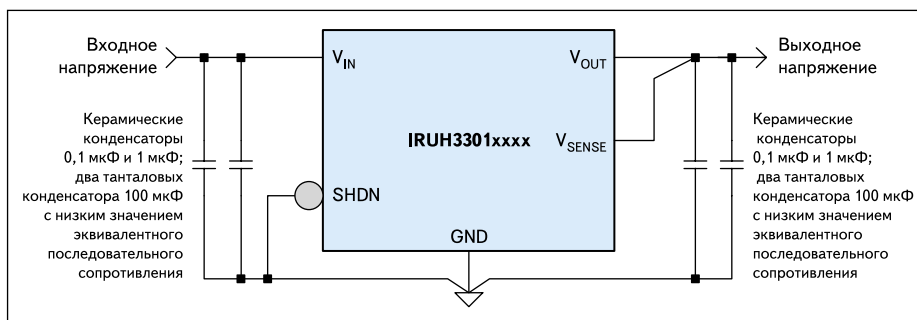


Рис. 3. Типовая схема включения линейного стабилизатора с фиксированным выходным напряжением

Таблица 2. Значения сопротивления резистора R_1 для обеспечения заданных значений выходного напряжения

Выходное напряжение V_{OUT} , В	0,9	1	1,2	1,5	1,8	2,5	3,3
Ближайшее значение сопротивления резистора R_1 с допуском 0,1%, Ом	61,9	124	249	437	619	1060	1560

Токковая и тепловая защита

Защита от перегрузки в стабилизаторах серии IRUH3301 обеспечивается посредством функции синхронизированной защелки. Ток управления внутренним регулирующим *rpr*-транзистором ограничивается резистором R_b (рис. 2), стоящим между базой транзистора и МДП-транзистором схемы управления. Если при перегрузке по току падение напряжения на этом резисторе превысит 0,5 В (номинальное), сработает функция защелки. Время защелкивания (t_{latch}) номинально составляет 10 мс. В том случае когда состояние перегрузки по току длится менее времени t_{latch} защелка не будет установлена. Если защелка установлена, ток управления регулирующего *rpr*-транзистора будет отключен. Состояние защелкивания будет сохраняться до тех пор, пока будет иметь место один из следующих режимов:

- 1) Напряжение на выводе SHDN установлено выше 1,2 В, а затем опустилось ниже 0,8 В.
- 2) Напряжение на выводе V_{IN} опустилось ниже 1,7 В.

В том случае когда температура корпуса ИМС стабилизатора превышает номинальное значение +140 °С, схема тепловой защиты установит внутреннюю защелку и блокирует ток управления регулирующего *rpr*-транзистора, как уже было описано. После падения температуры корпуса ниже номинального значения +125 °С защелка может быть сброшена при использовании любого из двух перечисленных режимов.

Блокировка при пониженном входном напряжении

Функция блокировки при входном напряжении ниже номинального не допускает работу устройства, когда входное напряжение V_{IN} ниже, чем 1,74 В (номинальное значение). Существует гистерезис с номиналом 100 мВ выше этого значения.

Диапазон входного напряжения

Устройство полностью функционально, когда входное напряжение V_{IN} выше, чем 2,8 В. Стабилизатор входит в режим бло-

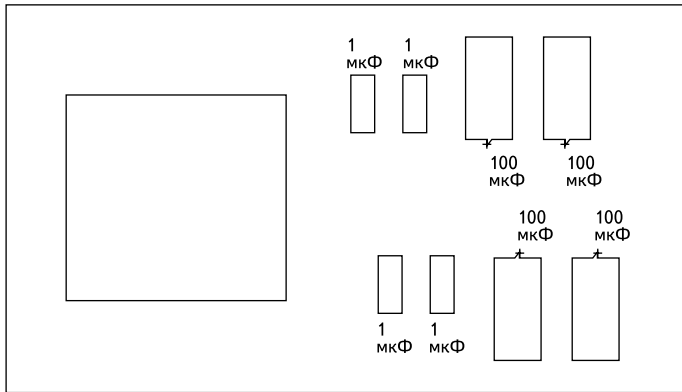


Рис. 4. Первый слой печатной платы с установленным стабилизатором IRUH3301 и блокировочными конденсаторами



Рис. 5. Зависимость тока нагрузки от температуры корпуса стабилизатора без понижения мощности при максимальном рассеивании

кировки при пониженном входном напряжении $V_{IN} < 1,7$ В (номинальное значение). Когда $V_{IN} < 2,8$ В, выходное напряжение V_{OUT} будет отслеживать V_{IN} и может произойти отклонение от установленного значения. Для замедления скорости повышения V_{OUT} при медленном изменении V_{IN} следует применять конденсатор большой емкости.

Дистанционное выключение

Стабилизатор может быть выключен подачей на вывод SHDN напряжения более 1,2 В. Стабилизатор возвращается в рабочий режим, когда напряжение на выводе SHDN будет установлено ниже порога отключения 0,8 В. В том случае когда не требуется применять дистанционное выключение, вывод SHDN следует соединить с GND.

Входные конденсаторы

Для правильной работы устройства необходимо установить входные блокировочные емкости: два высокочастотных керамических конденсатора (0,1 и 1 мкФ) и два танталовых конденсатора с низким эквивалентным последовательным сопротивлением емкостью 100 мкФ (AVX TPS или эквивалентные), размещаемые в непосредственной близости к выводу V_{IN} . Если конденсатор входного источника установлен на расстоянии более 100 мм от стабилизатора, рекомендуется применять дополнительный входной конденсатор. Конденсатор с большей емкостью улучшает подавление пульсаций, способствуя улучшению стабильности выходного напряжения.

Выходные конденсаторы

Для обеспечения устойчивости при импульсном изменении тока нагрузки требуется установить выходные блокировочные конденсаторы: два керамических конденсатора (0,1 и 1 мкФ) и два танталовых конденсатора с низким эквивалентным последовательным сопротивлением емкостью 100 мкФ (AVX TPS или эквивалентные). Для снижения уровня пульсаций может быть установлено несколько дополнительных керамических конденсаторов емкостью 1 мкФ. Не рекомендуется

применение конденсаторов емкостью больше 1 мкФ, так как они могут вызвать нестабильность выходного канала.

Использование танталового конденсатора с емкостью больше указанной рекомендуется для улучшения переходной характеристики при импульсном изменении тока нагрузки. Верхний предел значения емкости обуславливается запаздывающим срабатыванием защелки при перегрузке по току и может быть до 10 000 мкФ, чтобы при этом не вызывать защелкивания устройства во время запуска.

Основные правила компоновки печатной платы

Весьма важным является обеспечение низкого значения полного сопротивления соединительных линий между выходом стабилизатора и нагрузкой. В связи с этим настоятельно рекомендуется использовать сплошные слои печатной платы для питания и «земли». Если импеданс платы не поддерживается небольшим, может возникнуть высокочастотная генерация, обусловленная влиянием паразитных последовательных сопротивлений и индуктивностей на запас регулирования по частоте и фазе контура.

Вывод V_{SENSE} должен быть соединен непосредственно с выводом V_{OUT} по возможности более коротким проводником на печатной плате.

Установку выходных конденсаторов необходимо производить в непосредственной близости от контактов V_{OUT} и GND и делать соответствующую трассировку на печатной плате с максимально допустимыми правилами проектирования ширины проводника. Следует избегать использования переходных отверстий для монтажа этих конденсаторов. На рис. 4 показано размещение элементов на первом слое печатной платы; на рисунке видно, что керамические конденсаторы устанавливаются в непосредственной близости от выходов стабилизатора.

Соответственно, входные конденсаторы должны быть размещены настолько близко к контакту V_{IN} .

Для расчета тепловых режимов стабилизатора можно воспользоваться зависимостью

выходного тока от температуры его корпуса, представленной на рис. 5.

К выходному напряжению интегрально-гибридных линейных стабилизаторов серии IRUH3301 предъявляются высокие требования по точности необходимого номинала. Логические устройства, такие как FPGA и микропроцессоры, которые являются нагрузками для этих схем, имеют тенденцию к снижению собственного рабочего напряжения и сокращению допустимого диапазона изменения напряжения. Исходя из этого, современный стабилизатор должен обладать высокой точностью выходного напряжения, сохраняющейся в условиях воздействия переменной температуры, радиации и других дестабилизирующих факторов, большим сроком службы и способностью обеспечивать низкий уровень напряжения (до 1 В и ниже).

В стабилизаторах новой серии IRUH3301 в процессе общего улучшения их параметров по сравнению с характеристиками моделей предшествующих серий был реализован ряд решений, направленных на обеспечение более высокой точности и более низкого значения минимального выходного напряжения. Наряду с этим новая разработка использует микросхему управления, созданную по технологии «кремний на изоляторе», которая обеспечивает очень хорошую радиационную стойкость по отношению к накопленной дозе, улучшая тем самым стабильность напряжения при воздействии ионизирующего излучения. Кроме того, технические характеристики в отношении одиночных эффектов от воздействия протонов и ионов также стали значительно лучше. Применение внутреннего источника опорного напряжения с низким напряжением позволяет стабилизаторам новой серии обеспечивать выходные напряжения, снижающиеся до 0,8 В, что соответствует требованиям эксплуатации современных цифровых устройств.

Ресурсные испытания

Результаты ресурсных испытаний стабилизаторов серии IRUH3301 по методу 1005 стандарта MIL-STD-883 представлены на рис. 6.

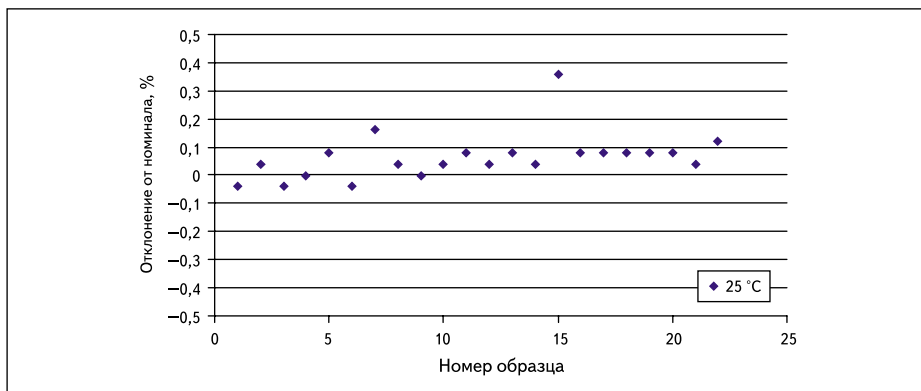


Рис. 6. Результаты ресурсных испытаний для IRUH3301

ELDRS — повышенная устойчивость к воздействию ионизирующих излучений небольшой интенсивности

Испытания на определение устойчивости полупроводниковых интегральных микросхем к воздействию ионизирующих излучений небольшой интенсивности применяются для изделий, которые могут выдавать отказы при мощности дозы излучения ниже 50 рад (Si)/с. Методика испытаний была выработана на основе метода 1019 Ionizing Radiation (условие D) стандарта MIL-STD-883. Этот метод устанавливает основные требования к выполнению испытаний. Согласно условию D, которое применяется для микросхем, выполненных на биполярных транзисторах по технологии BiCMOS или принадлежащих к смешанному типу (аналоговые и цифровые), устройства подвергаются воздействию низкоинтенсивного радиационного облучения с мощностью дозы не более 10 мрад (Si)/с. Исключение составляют те случаи, когда суммарная доза выше 25 крад (Si): здесь полное время воздействия радиации должно быть не менее 1000 ч, а мощность дозы должна быть определена из суммарной дозы (включая любые факторы тестирования) и времени воздействия радиации.

Полученные результаты воздействия ионизирующего излучения небольшой интенсивности представлены на рис. 8: образцы № 1–5 нагружены током 50 мА при входном

При разработке этих изделий выдвигалось требование получить значение отклонения от номинала $\pm 1\%$. Самый большой вклад в отклонение от номинала стабилизатора вносит старение интегральной микросхемы регулятора. При разработке этой микросхемы была поставлена цель добиться предела отклонения, вызываемого старением, величиной в 1%. Резисторы имеют максимальное значение отклонения $\pm 0,5\%$ при ресурсных испытаниях в течение 2000 часов, типовое значение составляет около 1/10 от указанного максимума [8].

Накопленная доза радиации

Во время разработки своих изделий, предназначенных для применения в аппаратуре ракетно-космической техники, которая при эксплуатации подвергается воздействию ионизирующих излучений заряженных частиц, компания International Rectifier проводит квалификационные испытания изделий на воздействие ионизирующих излучений и одиночных ядерных частиц. Отчеты по результатам испытаний находятся в свободном доступе на сайте компании или доступны по запросу. Таким образом, гарантируется доступ к информации об устойчивости к воздействию радиации и другим внешним воздействующим факторам. Зачастую получить такую информацию от других поставщиков высоконадежной техники не представляется возможным [9].

В качестве руководства по разработке процедуры испытания использовался метод 1019 Ionizing Radiation (условие A) стандарта MIL-STD-883G. Этот метод устанавливает основные требования к выполнению испытаний. Согласно условию A стандарта, мощность дозы ионизирующего излучения должна быть между 50 и 300 рад (Si)/с от источника типа ^{60}Co . Интенсивность облучения может быть разной для каждого значения суммарной дозы, однако мощность дозы не должна различаться более чем на $\pm 10\%$ во время каждого облучения.

Устойчивость к воздействию накопленной дозы радиации отражает рис. 7: образцы № 1–5 нагружены током 50 мА при входном напряжении 6,8 В, образцы № 6–11 включены

в схему с входным напряжением 0 В, а образец 12 использовался в качестве контрольного, то есть не подвергался воздействию радиации. Согласно требованиям стандарта, чтобы произвести оценку IRUH3301 при накопленной дозе до 300 крад (Si), тест был проведен при уровне дозы на 50% большем, поэтому в результатах фигурируют и данные, полученные для 500 крад. Отклонения выходного напряжения, связанные с воздействием накопленной дозы радиации, лежат в пределах от 0,5% до -1% номинала. Этот показатель был проверен на выборочной основе для каждой партии кремниевых пластин. Он значительно лучше, чем аналогичный показатель для предыдущей серии, который с прежней версией микросхемы управления мог изменяться до 6% при 500 крад (Si) [10].

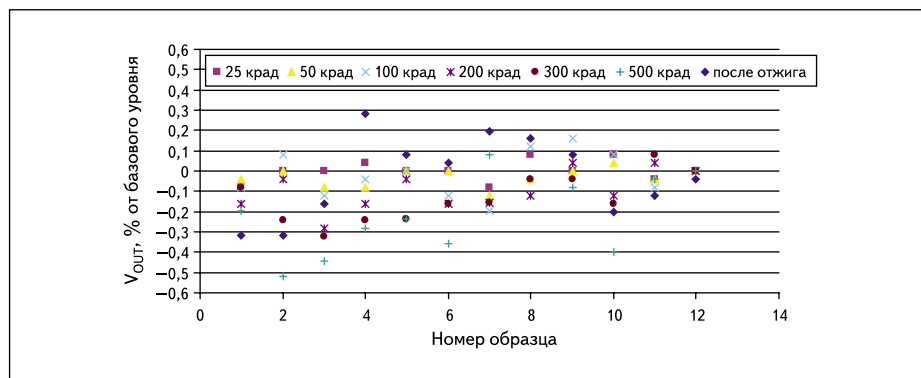


Рис. 7. Устойчивость выходного напряжения к воздействию ионизирующего излучения

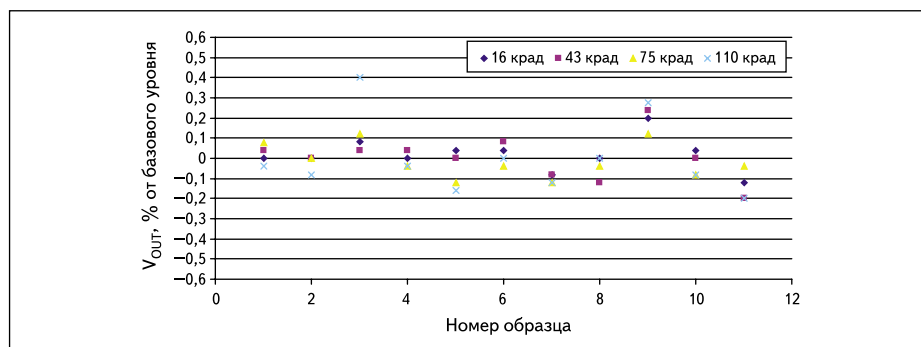


Рис. 8. Устойчивость выходного напряжения к воздействию ионизирующего излучения низкой интенсивности

напряжении 6,8 В, образцы № 6–10 включены в схему с входным напряжением 0 В, а образец 11 использовался в качестве контрольного, то есть не подвергался воздействию радиации [11]. Как видно на графике, они тоже лежат в пределах от 0,5% до –1% номинала, заданных в спецификации.

Стойкость к воздействию потока нейтронов

Для стабилизаторов напряжения серии IRUH3301 были проведены испытания с целью определения влияния повреждений структуры полупроводникового материала, связанных с воздействием потоков нейтронов, на технические характеристики этих устройств. Все тестируемые образцы были подвергнуты воздействию потоков нейтронов 10^{11} и 10^{12} нейтрон/см². После воздействия потока нейтронов с уровнем выше 10^{12} нейтрон/см² было выявлено ухудшение в отношении напряжения на регулировочном транзисторе и порогов срабатывания функции защелкивания при перегрузке по току, однако даже в этом случае устройства сохраняли свою работоспособность и основные электрические характеристики вплоть до значений порядка 10^{13} нейтрон/см². Испытания проводились в соответствии с требованиями метода 1017 Neutron Irradiation стандарта MIL-STD-883. Подробно процедура испытаний и их результаты описаны в [12].

Результаты испытаний на воздействие отдельных ядерных частиц

Необходимо отметить, что на долю одиночных эффектов от воздействия ионов естественных радиационных поясов Земли, солнечных и галактических космических лучей приходится до 35% зарегистрированных отказов.

В декабре 2005 года компания International Rectifier испытала стабилизаторы напряжения серии IRUH3301 на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц и исследовала одиночные эффекты от воздействия частиц.

Устройства подвергались воздействию отобранных пучков ионов. При этом контролировались эффекты перехода микросхем в состояние повышенного потребления тока из-за срабатывания тиристора, образованного одним из транзисторов схемы в паре с паразитным транзистором (Single Event Latch-up, SEL), и переходные ионизационные реакции в виде импульсов напряжения в выходных цепях (Single Event Transient, SET). Для определения стойкости стабилизаторов к воздействию отдельных частиц были выбраны следующие виды ионов: криптон (Kr), ксенон (Xe) и золото (Au). Уровни энергий, пороговые линейные потери энергии (ЛПЭ) иона в веществе и глубина проникновения

Таблица 3. Разновидности ионов, применяемые при тестировании

Ион	Энергия, МэВ	Угол	Эффективное значение ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Глубина проникновения в кремний, мкм
⁸⁴ Kr	1032	0°	27,8	134
¹²⁹ Xe	1512	0°	51,5	120
¹⁹⁷ Au	2247	0°	85,4	118

всех выбранных частиц ионов представлены в таблице 3.

Все образцы стабилизаторов были испытаны при значениях ЛПЭ 85,4 МэВ·см²/мг, и не было обнаружено переходов микросхем в состояние повышенного потребления тока (SEL) во всем диапазоне входных напряжений. Во время выполнения всех испытаний на SEL ни в одном из тестируемых образцов не было обнаружено катастрофических отказов.

Результаты испытаний на SET показывают чувствительность изделий к амплитуде входного напряжения. Вначале три образца были испытаны при входном напряжении 7 В и токе нагрузки 1 А с уровнем ЛПЭ 27,8 МэВ·см²/мг и с использованием пучков ионов Kr. При входном напряжении 7 В в каждом образце наблюдались импульсы положительного напряжения на выходе. Входное напряжение понижалось, и проводилось повторное тестирование до тех пор, пока не было установлено значение входного напряжения, при котором не наблюдались импульсы напряжения на выходе (SET). При уровне ЛПЭ 27,8 МэВ·см²/мг два образца не имели реакции в виде импульсов напряжения при входном напряжении 4 В, а третий образец — при входном напряжении 3,7 В. При уровне ЛПЭ 51,5 МэВ·см²/мг два образца показали свою невосприимчивость при входном напряжении 3,8 В, а третий образец — при входном напряжении 4 В. ЛПЭ 85,4 МэВ·см²/мг не вызвали SET у всех трех образцов при входном напряжении 3,8 В.

В результате испытаний было установлено, что стабилизаторы устойчивы к SET при входном напряжении 3,3 В и минимальном значении входного напряжения 2,9 В. Тестирование не выявило импульсов отрицательного напряжения более 180 мВ у каждого из образцов во всем диапазоне входных напряжений. Наблюдались только два случая появления отрицательного напряжения на выходе, но оба они были квалифицированы как ошибочные (закрывающая шторка оказывалась на линии пучка, что нарушало условия испытаний).

В качестве примера конкретного изделия можно привести стабилизатор IRUH33PA13B20K. В результате испытаний было выявлено, что он невосприимчив к SEL при ЛПЭ 85 МэВ·см²/мг. Также установлено, что на его выходе будут отсутствовать импульсы напряжения более 200 мВ при входных напряжениях 3,7 В и ниже и уровнях ЛПЭ до 85 МэВ·см²/мг. Более подробно

с процедурой тестирования стабилизатора напряжения IRUH33PA13B20K на воздействие ионов и результатами испытаний можно ознакомиться в [13].

Заключение

Результаты испытаний показывают, что компенсационные стабилизаторы напряжения серии IRUH3301 имеют улучшенные показатели стабилизации напряжения $\pm 3\%$. В типовых применениях, требующих высокой надежности, допустимые отклонения составляют примерно $-2,4 \dots +2,6\%$. Это существенно лучше по сравнению с предшествующими сериями стабилизаторов, которые имели точность установки выходного напряжения примерно $-4 \dots +8\%$.

Необходимо заметить, что улучшенные показатели присущи только тому варианту исполнения стабилизатора, в основе которого — интегральная схема управления собственной разработки. В ближайшее время планируется выпуск новой модели этой схемы, с чем связаны надежды на дальнейшее улучшение технических характеристик стабилизаторов.

Литература

1. Нос С. Обеспечение электрического питания ПЛИС с помощью мощных линейных LDO-стабилизаторов // Электронные компоненты. 2010. № 6.
2. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: справочник / Г. С. Найфельд, К. Б. Мазель, Ч. И. Хусаинов и др. Под ред. Г. С. Найфельда. М.: Радио и связь, 1985.
3. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: учеб. пособие. М.: Солон-пресс, 2008.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справ. рук. Пер. с нем. М.: Мир, 1982.
5. Источники вторичного электропитания / С. С. Букреев, В. А. Головацкий, Г. Н. Гулякович и др. Под ред. Ю. И. Конева. М.: Радио и связь, 1983.
6. Березин О. К., Костиков В. Г., Шахнов В. А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Три Л, 2000.
7. Ци Денг. LDO-регуляторы // Электронные компоненты. 2008. № 8.
8. Thompson M. F., Brandt J. A. DC Output Regulation of the IRUH3301xxxx: Application Note AN-1161. International Rectifier.
9. Покровский И. Семинар РА «Росавиакосмос» // Электронные компоненты. 2002. № 8.
10. IRUH3301 Voltage Regulator Total Ionizing Dose Test Report. International Rectifier. July 2010.
11. IRUH3301 Voltage Regulator Enhanced Low Dose Rate Sensitivity Test Report. International Rectifier. July 2010.
12. IRUH3301 Neutron Test Report. International Rectifier. Oct. 2010.
13. IRUH3301 Single-Event Effects Test Report. International Rectifier. Dec. 2005.