

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049(470)

АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ*

© 2012 г. Л. Н. Кессаринский^{1,2}, Д. В. Бойченко^{1,2}, А. Ю. Никифоров^{1,2}

¹ ОАО “Экспериментальное научно-производственное объединение
Специализированные электронные системы” (ЭНПО СПЭЛС)

² Институт экстремальной прикладной электроники (ИЭПЭ)
Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”

E-mail: lnkes@spels.ru; dvboy@spels.ru; aynik@spels.ru

Поступила в редакцию 16.12.2011 г.

Проанализирована типовая структура современных гибридных микросхем импульсных стабилизаторов напряжений (ИСН). Проведены экспериментальные исследования дозовых и одиночных локальных ионизационных эффектов в базовых блоках современных импульсных стабилизаторов напряжений. Предложена модель импульсных стабилизаторов напряжений для анализа одиночных эффектов, и выполнена ее экспериментальная верификация. Выявлены наиболее радиационно-чувствительные базовые блоки импульсных стабилизаторов напряжений. Даны рекомендации по повышению их радиационной стойкости.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач при разработке космической аппаратуры является создание эффективной системы электропитания. В основе современной системы питания, как правило, находится импульсный стабилизатор напряжений.

Современные импульсные стабилизаторы напряжений представляют собой сложные гибридные устройства, к которым предъявляются жесткие требования по стабильности и точности выходного напряжения, максимальной выходной мощности, гибкости управления. Использование импульсных стабилизаторов напряжений в космической аппаратуре также накладывает требования по радиационной стойкости. В ходе эксплуатации в радиационной обстановке космического пространства импульсные стабилизаторы напряжений подвергаются воздействиям электронов и протонов радиационных поясов Земли, которые вызывают дозовые ионизационные эффекты, а также тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства, вызывающих одиночные локальные ионизационные эффекты [1–3].

Вследствие дозовых эффектов происходят постепенная временная деградация основных параметров-критериев годности импульсных стабилизаторов напряжений, прежде всего точностных параметров стабилизации выходного напряжения, а также катастрофические отказы.

Проведенные экспериментальные исследования дозового поведения более 50 типов современных импульсных стабилизаторов напряжений отечественного и иностранного производства показывают разнообразие их уровней стойкости в диапазоне от 1.2 до 360 крад (рис. 1). Широкий набор вариантов реализации приводит к сильному разнообразию показателей стойкости импульсного стабилизатора напряжений даже в пределах “близких” по характеристикам семейств. Таким образом, актуальна задача выявления наиболее чувствительных к действию радиации узлов для выработки рекомендаций по повышению уровней дозовой стойкости импульсного стабилизатора напряжений [4, 5].

Одиночные локальные ионизационные эффекты в импульсных стабилизаторах напряжений проявляются в виде мощных коротких импульсных откликов электрических параметров (токов, напряжений) и реже — катастрофических отказов. Описание наиболее критичных узлов и блоков импульсных стабилизаторов напряжений, а также конкретные экспериментальные данные по их стойкости к тяжелым заряженным частицам и высокоэнергетичным протонов) в отечественной литературе практически отсутствуют, поэтому их получение также, безусловно, актуально.

Основными узлами импульсных стабилизаторов напряжений являются:

- мощный ключевой элемент;
- усилитель ошибки;
- гальваническая развязка сигнала обратной связи;

* Работа выполнена в ОАО “ЭНПО СПЭЛС” и Институте экстремальной прикладной электроники (ИЭПЭ) НИЯУ МИФИ на основании Госконтракта с Минобрнауки России от 22.10.2010 г. № 13.G36.31.007.

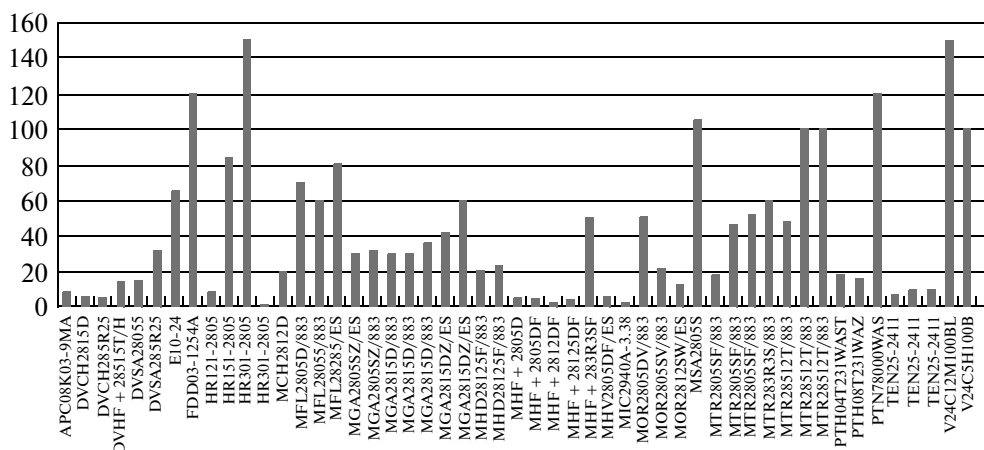


Рис. 1. Уровни стойкости импульсных стабилизаторов напряжения.

– широтно-импульсный модулятор.

В процессе исследований был проведен анализ строения каждого блока современных импульсных стабилизаторов напряжений. Затем были отобраны объекты для экспериментальных исследований – типовые представители элементной базы, используемой при создании импульсных стабилизаторов напряжений. Полученные экспериментальные результаты анализировались с точки зрения особенностей функционирования микросхемы в составе блока импульсных стабилизаторов напряжений. На основе анализа делался вывод о радиационной чувствительности функционального узла в составе импульсных стабилизаторов напряжений и его влиянии на характеристики преобразователя в целом.

2. АНАЛИЗ ДОЗОВЫХ ЭФФЕКТОВ БЛОКОВ В ИМПУЛЬСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЙ

Ключевые элементы

В качестве ключевых элементов в современных импульсных стабилизаторах напряжений используют мощные дискретные МОП-транзисторы. Основными дозовыми механизмами отказа данного типа транзисторов являются эффекты, связанные с накоплением объемного заряда в подзатворном диэлектрике, толщина которого достигает десятков микрон. Для *n*-канальных мощных МОП-транзисторов характерно уменьшение величины порогового напряжения, которое по мере накопления поглощенной дозы приводит к отпиаранию транзистора. Для *p*-канальных МОП-транзисторов характерно увеличение порогового напряжения по модулю с ростом величины поглощенной дозы, вплоть до напряжения пробоя затвора. Типовые вольтамперные характеристики (ВАХ) *n*- и *p*-канальных МОП-транзисто-

ров при разных значениях уровня поглощенной дозы представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Видно постепенное смещение ВАХ-транзисторов: *n*-канального – в сторону полностью открытого состояния транзистора; *p*-канального – в сторону закрытого состояния. Описанное влияние дозовых эффектов экспериментально подтверждено для более двух десятков современных мощных МОП-транзисторов, применяемых в импульсных стабилизаторах напряжения.

В составе импульсных стабилизаторов напряжений деградация ключевого элемента, выполненного на основе мощных МОП-транзисторов, приводит к постепенному изменению (росту или снижению) выходного напряжения и увеличению тока потребления (из-за радиационного “приоткрывания” транзистора). Таким образом, основным результатом анализа ключевых элементов является установленный относительно низкий типовой уровень стойкости блока импульсного стабилизатора напряжений (обычно до 16 крад) при использовании *n*-канальных МОП-транзисторов. Использование *p*-канальных мощных МОП-транзисторов значительно повышает уровень отказа ключевого элемента импульсного стабилизатора напряжений, но требует большей амплитуды управляющего напряжения (затвористок), что возможно при условии использования дополнительного задающего блока.

Усилители ошибки

Усилитель ошибки – элемент обратной связи импульсных стабилизаторов напряжений, реагирующий на разницу между выходным и опорным напряжениями, и генерирующий управляющий сигнал в случае отклонения выходного напряжения от заданной величины. В качестве усилителя ошибки применяют микросхемы операционного усилителя или компаратора напряжений.

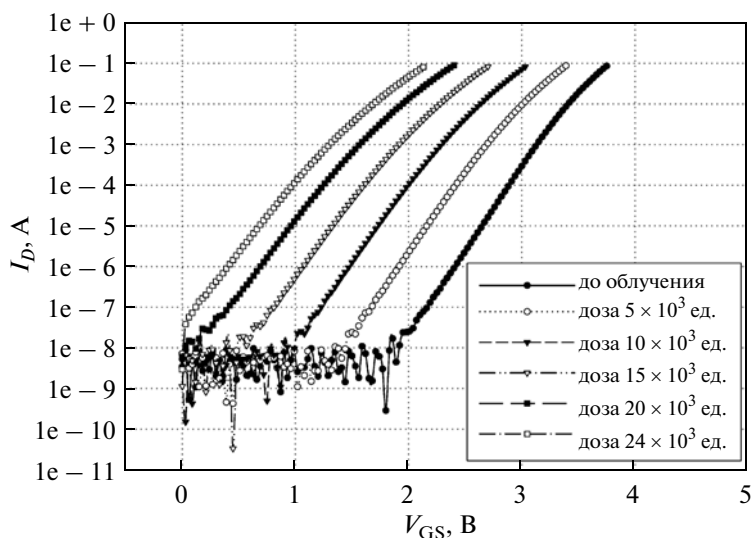


Рис. 2. Зависимости тока стока от напряжения затвор-исток транзистора IRF1640GPBF (n -канальный) при разных уровнях поглощенной дозы.

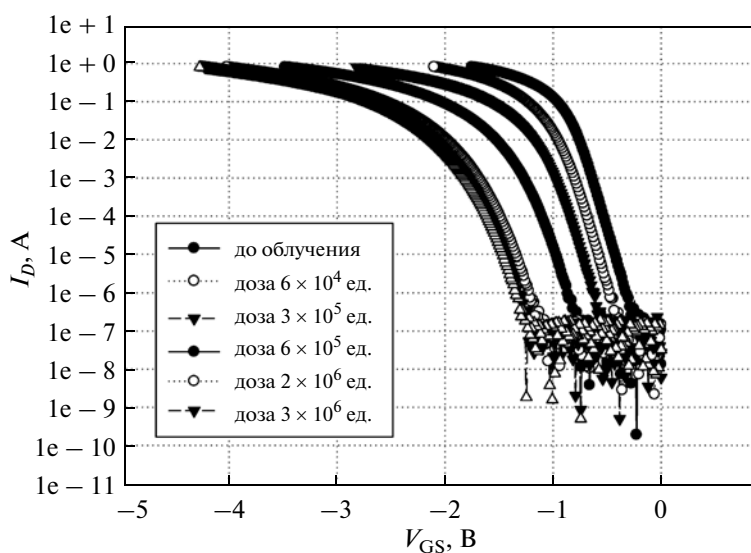


Рис. 3. Зависимости тока стока от напряжения затвор-исток транзистора IRLML6401 (p -канальный) для разных уровней поглощенной дозы.

Несмотря на то, что радиационное поведение данного класса элементов хорошо описано [6], литературные данные не учитывают особенности современных операционного усилителя и компаратора напряжений (широкое применение КМОП-технологии, переход на меньшие топологические нормы, ужесточение требований к характеристикам операционного усилителя и компаратора напряжений), а также особенности их работы в составе импульсных стабилизаторов напряжений. Обзор литературных данных [6–8] показывает, что основными дозовыми эффектами данного класса микросхем являются рост входно-

го напряжения смещения, рост входных токов, изменение тока потребления. В результате экспериментальных исследований дозовых отказов в более семидесяти современных типов операционного усилителя и компаратора напряжений (без учета особенностей работы в составе импульсных стабилизаторов напряжений) было установлено, что уровень параметрического отказа большинства типов не превышает 30 крад. На рис. 4, 5 показаны типовые зависимости критерияльных параметров данного класса микросхем от уровня поглощенной дозы: напряжения смещения и входного тока.

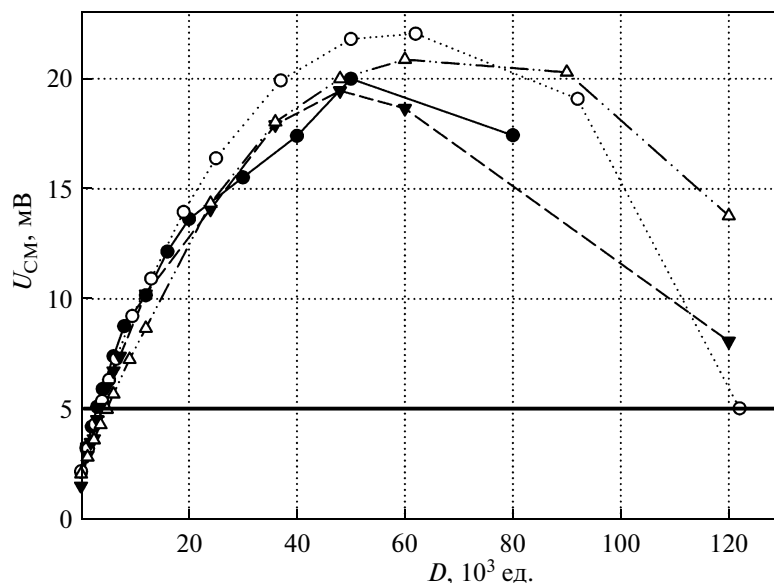


Рис. 4. Зависимости напряжения смещения ИС AD830AR от уровня поглощенной дозы.

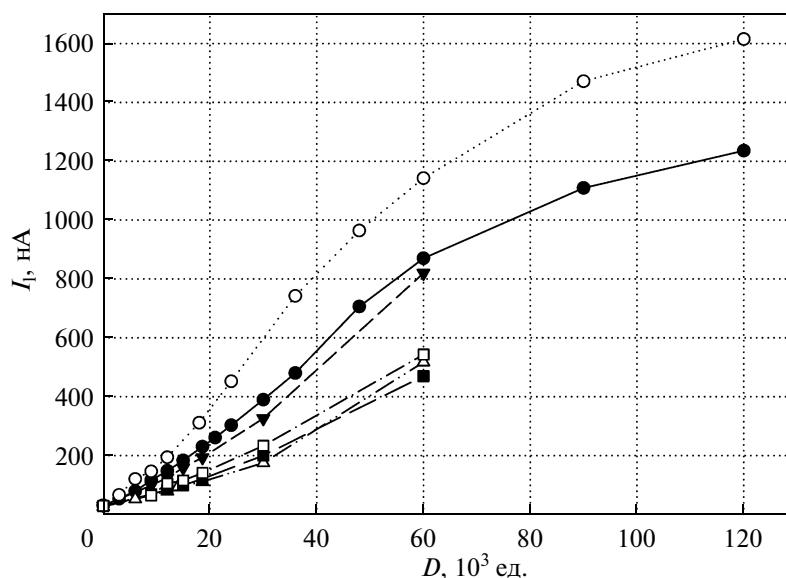


Рис. 5. Зависимости входного тока ИС CMP04FS от уровня поглощенной дозы.

Однако специфика режима работы усилителя ошибки в современных импульсных стабилизаторах напряжений позволяет практически нивелировать дозовую деградацию критериальных параметров операционного усилителя и компаратора напряжений. Как показывает схематехническое моделирование, рост входных токов усилителя ошибки до десятков мкА и рост входного напряжения смещения нуля у ОУ до десятков мВ практически не сказываются на характеристиках ИСН и не влияют на работу преобразователя в целом. Критический уровень поглощенной дозы, начиная с которого деградация усилителя ошибки сказывается на характеристиках ИСН, для большинства применений превышает 80 крад. Таким обра-

зом, элемент усилителя ошибки начинает влиять на характеристики современных импульсных стабилизаторов напряжений при относительно высоких уровнях дозового воздействия.

Блок гальванической развязки сигнала обратной связи

В качестве гальванической развязки для формирования сигнала цепи обратной связи используют оптопары или трансформаторы. Основным элементом оптопары является светодиод, выполненный из составного полупроводника. Одним из лидеров создания радиационно-стойких оптопар является фирма Avago Technologies. Приме-

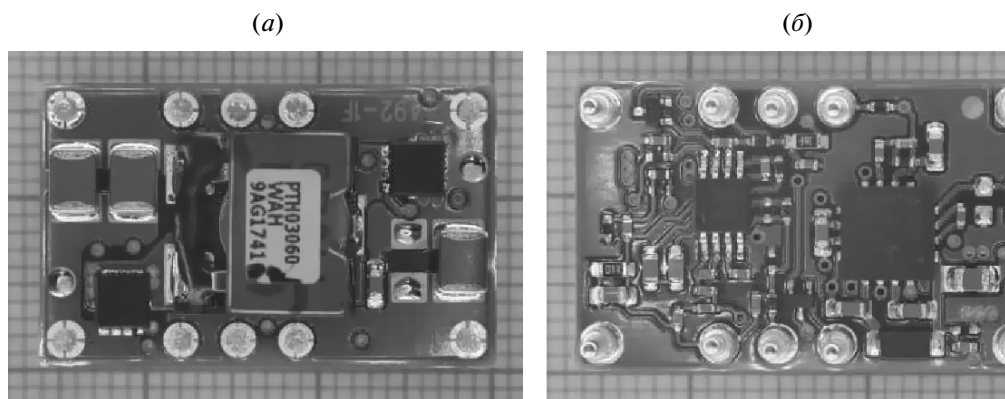


Рис. 6. Фотографии образца PTH03060WAN: (а) – вид корпуса сверху, (б) – вид корпуса снизу.

няя различные технологические приемы (использование нестандартного сверхяркого светодиода, использование комбинации фотодиодов, вместо фототранзисторов и т.д.), удается получить уровень дозовой стойкости до 30 крад [9].

Результаты экспериментальных исследований более двух десятков различных опто-приборов (оптопар, твердотельных реле, фотоприемников) различных изготовителей (Avago Technologies, Agilent Technologies, Fairchild, и пр.) показывают существенный разброс уровней стойкости. Экспериментально подтверждается высокая стойкость некоторых оптронов серии HCPL (Avago Technologies). Вместе с тем, исследования показывают несоответствие фактических уровней стойкости оптопар серии HSSR (Avago Technologies) заявленным в официальной документации уровням [10–13]. Более того, в публикациях показана повышенная чувствительность оптопар к дефектообразующим воздействиям (протонам, нейтронам), что объясняется значимым влиянием дефектности материала на оптико-электронные свойства изделий.

Таким образом, анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о нежелательности использования оптопар в радиационно-стойких импульсных стабилизаторах напряжений. Замещение оптоприборов в составе импульсных стабилизаторов напряжений трансформаторами позволяет существенно повысить уровень стойкости блока обратной связи и импульсных стабилизаторов напряжений в целом.

Широтно-импульсные модуляторы

Микросхемы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) являются основным узлом импульсных стабилизаторов напряжения. Переход от непрерывной работы ключевых элементов к импульсной позволяет резко повысить эффективность преобразования сигнала до 95–97%, увеличивает

долговечность ИСН в целом, позволяет снизить собственный ток потребления. В зависимости от реализации модулятора (соотношения навесных элементов и интегрированных в кристалл) микросхемы широтно-импульсной модуляцией можно разделить на: ШИМ-контроллер (низкая выходная мощность сигнала, требует внешних МОП транзисторов) и драйвер (требует внешнего выходного мощного каскада). Данные по радиационной стойкости ШИМ-контроллеров представлены в литературе весьма ограниченно.

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований радиационного поведения основных представителей ШИМ-устройств позволяет сделать вывод о существенном различии радиационного поведения микросхем, выполненных по биполярной и КМОП-технологий. Для биполярной технологии характерна постепенная деградация основных параметров с выходом за установленные нормы на уровнях дозы порядка 20–40 крад, затем – функциональный отказ при относительно больших уровнях воздействия (больше 200 крад). У КМОП ШИМ-микросхем параметрический отказ и функциональный отказ наступают практически одновременно на уровнях воздействия до 20 крад. Современные ШИМ-микросхемы, выполненные по БиКМОП технологии сочетают в себе недостатки обеих технологий: ранний (менее 15 крад) параметрический и функциональный отказ. Следуя современным тенденциям: прекращению выпуска ШИМ-контроллеров по биполярной технологии и переходу на БиКМОП и КМОП, можно считать ШИМ-блок одним из наиболее чувствительных узлов импульсных стабилизаторов напряжений к дозовым отказам.

3. МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ОДИНОЧНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ

По сравнению с дозовыми эффектами, данные по одиночным локальным эффектам при воздействии отдельных ядерных частиц в импульсных стабилизаторах напряжений представлены в литературе достаточно скупо. Экспериментальные исследования этих эффектов связаны с рядом объективных трудностей: необходимостью декапсуляции микросхем, малой доступностью и высокой стоимостью использования испытательных установок – циклотронов и синхроциклотронов, большими временными затратами. Так же проявляется специфика гибридной технологии импульсных стабилизаторов напряжений импульсных стабилизаторов напряжений: наличие нескольких кристаллов в одном корпусе, две поверхности печатных плат в корпусе импульсных стабилизаторов напряжений, их относительно высокая рассеиваемая мощность (облучение пучком ионов проводится в условиях вакуума – плохой теплоотвод). Использование численного моделирования одиночных ионизационных эффектов помогает решить часть описанных выше задач [2, 14–21].

С целью повышения эффективности эксперимента использовалась модель импульсного стабилизатора напряжений, предложенная в [22]. Проведенное моделирование выделило два основных блока наиболее чувствительных к одиночным ионизационным эффектам: блок ШИМ-контроллера и блок ключевого элемента (МОП-транзистор).

Реакция ШИМ-контроллера на воздействие протонов тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов связана с пропаданием части управляющих импульсов, что приводит к кратковременным скачкам выходного напряжения импульсного стабилизатора напряжений. Другим важным эффектом является возможность возникновения тиристорного эффекта в структуре ШИМ-контроллера. Данный процесс наиболее вероятен в микросхемах, выполненных по КМОП или БиКМОП технологии.

Основной механизм отказа мощного ключевого МОП-транзистора от одиночных ионизационных эффектов связан с необратимым пробоем, что приводит к полному функциональному отказу импульсных стабилизаторов напряжений.

Таким образом, с помощью численного моделирования выделены наиболее чувствительные к одиночным ионизационным эффектам блоки импульсных стабилизаторов напряжений, что позволяет повысить качество эксперимента и сократить время работы на ускорителе ионов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОДИНОЧНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В ИМПУЛЬСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ

В статье [22] описано первое экспериментальное подтверждение модели анализа чувствительности импульсных стабилизаторов напряжений к одиночным ионизационным эффектам. В качестве исследуемого образца использована микросхема ИВЭП27. В ходе эксперимента удалось подтвердить правильность предложенной модели импульсного стабилизатора напряжений.

Описанная модель также использовалась в ходе исследования одиночных ионизационных эффектов в импульсных стабилизаторах напряжений семейства РТН фирмы Texas Instruments. Данные микросборки идеально подходили для метода выборочного тестирования из-за бескорпусного исполнения (рис. 6). Таким образом, была возможность выборочно декапсулировать кристаллы с обеих сторон печатной платы. Идентификация показала, что на верхней поверхности (рис. 6а) расположены кристаллы операционного усилителя и МОП-транзисторов. На тыльной стороне (рис. 6б) – кристаллы ШИМ-контроллера и усилителя ошибки.

Экспериментальные исследования проводились на ускорителе ионов “У-400М” (ОИЯИ, г. Дубна) с использованием специализированного аппаратно-программного комплекса на базе линейки РХИ модульных приборов фирмы National Instruments. Программное обеспечение комплекса написано в среде разработки LabVIEW. Все исследуемые образцы были разделены на две группы: а) облучение со стороны декапсулированных кристаллов ШИМ-контроллера, б) облучение со стороны мощных выходных МОП-транзисторов.

Основным эффектом импульсного стабилизатора напряжений от воздействия тяжелых заряженных частиц на мощный МОП-транзистор является рост тока потребления стабилизатора с накоплением флюенса частиц (рис. 7). Данное поведение импульсного стабилизатора напряжений следует отнести скорее к разряду не одиночных, а дозовых эффектов. Вероятно причиной такого поведения служит накопление положительного заряда в подзатворном окисле МОП-транзистора (эффект описан выше).

При облучении ШИМ-контроллера основными эффектами импульсного стабилизатора напряжений были скачки тока потребления, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения (рис. 8). Кратковременное падение тока потребления являлось самовосстанавливающимся процессом, вероятно связанным с нарушением последовательности управляющих импульсов на выходе ШИМ-контроллера.

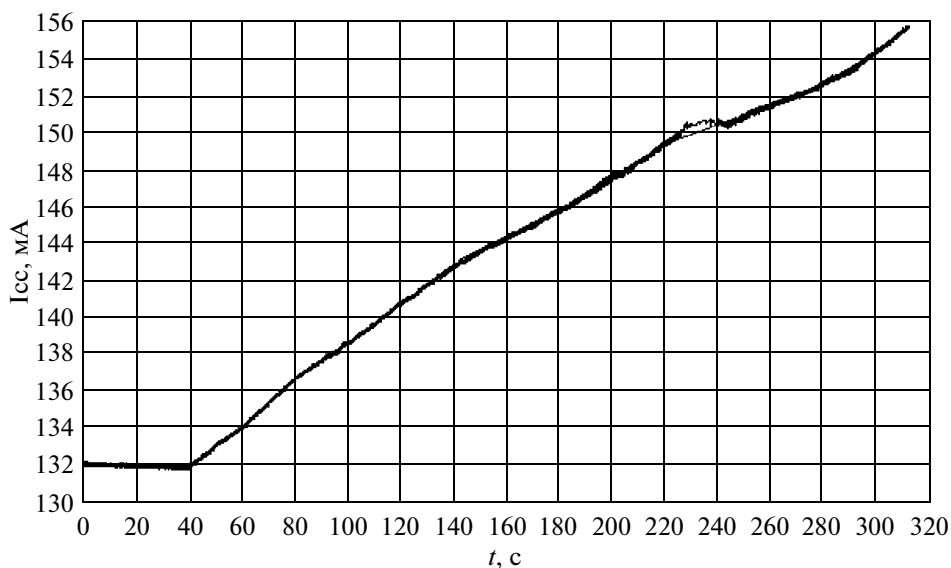


Рис. 7. Зависимости тока потребления модуля РТН03060WАН от времени в процессе облучения ионами ксенона. Облучение со стороны выходных МОП-транзисторов (ноль секунд соответствует началу облучения).

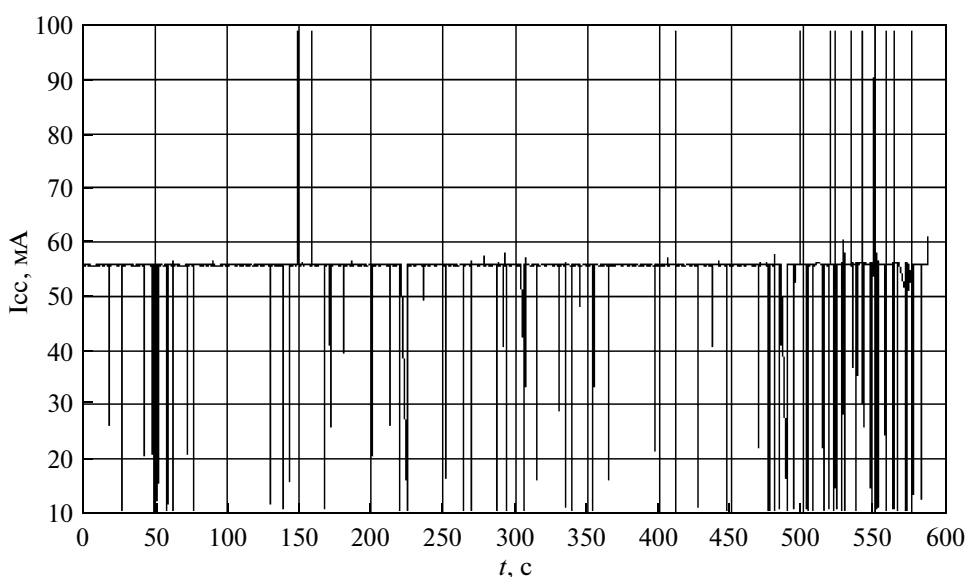


Рис. 8. Зависимости тока потребления модуля РТН03060WАН от времени в процессе облучения ионами ксенона. Облучение со стороны усилителя ошибки и ШИМ-контроллера (ноль секунд соответствует началу облучения).

Таким образом, получено еще одно подтверждение предположения, что ключевые элементы и ШИМ-контроллер являются наиболее чувствительными блоками к одиночным ионизационным эффектам.

5. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

Ключевые элементы современных импульсных стабилизаторов напряжений являются одним

из наиболее чувствительных к действию космической радиации. Дозовые эффекты в данном блоке можно компенсировать использованием p -канальных МОП-транзисторов и применением дополнительного преобразователя уровней управляющего сигнала затвор-исток. Одиночные эффекты проявляются в виде перегорания транзистора, что можно попытаться предотвратить тщательным подбором самого транзистора или применением дублирования.

Усилители ошибки, с учетом особенностей использования в импульсных стабилизаторах на-

пряжений, имеют сравнительно высокие фактические уровни дозовой стойкости. При воздействии тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов усилители ошибки, созданные на основе биполярных микросхем, слабо влияют на характеристики импульсного стабилизатора напряжений. При использовании КМОП-усилителей возможны проявления тиристорных эффектов.

От использования оптоприборов в конструкции импульсного стабилизатора напряжений следует отказаться в пользу трансформаторов. Такой выбор позволит существенно повысить общий уровень стойкости импульсного стабилизатора напряжений.

Блок ШИМ – наиболее чувствителен как к дозовым эффектам, так и к эффектам тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов. Повысить общую радиационную стойкость импульсного стабилизатора напряжений возможно применением ШИМ-контроллеров, выполненных по биполярной технологии.

Применение модели импульсного стабилизатора напряжений для анализа одиночных локальных эффектов позволяет повысить эффективность эксперимента и сократить общее облучение без потери информативности.

Показана возможность компромисса между радиационной стойкостью импульсного стабилизатора напряжений и его эксплуатационными характеристиками. На основе проведенного анализа радиационного поведения каждого блока современного импульсного стабилизатора напряжений, были определены наиболее чувствительные узлы к дозовым эффектам и одиночным эффектам. Результаты исследования выделяют блоки ключевых элементов и ШИМ-контроллера как наиболее уязвимые места современных импульсных стабилизаторов напряжений. Также даны рекомендации по повышению стойкости критичных узлов, а значит и всего импульсного стабилизатора напряжений в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и Связь, 2004. 320 с.
2. Чумаков А.И. Радиационные эффекты в ИС от отдельных ядерных частиц // Модель космоса: Научно-информационное издание: Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007.
3. Согоян А.В., Никифоров А.Ю., Чумаков А.И. и др. Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах. Модель космоса: Научно-информационное издание: Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007.
4. Бойченко Д.В., Братко Д.В., Кессаринский Л.Н. Исследование радиационного поведения стабилизаторов напряжения разного типа // Научная сессия МИФИ-2008. Сб. науч. трудов. Т. 8 М.: МИФИ, 2008. С. 59–60.
5. Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Вавилов В.А. Исследование стойкости импульсных стабилизаторов к действию ионизирующего излучения и тяжелых заряженных частиц // 10-я Российская научно-техническая конференция “Электроника, микро- и нанoeлектроника”. Сб. научн. трудов / Под ред. Стенина В.Я. М.: МИФИ, 2008. С. 187–190.
6. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
7. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994. 164 с.
8. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск: Наука и техника, 1986. 254 с.
9. Using Hermetic Optocouplers in Military and Space Electronics. White Paper / Jamshed N. Khan // www.avagotech.com
10. Proton damage in linear and digital optocouplers / Johnston A.H., Rax B.G. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. V. NS-47. P. 675–681.
11. LaBel K.A., Kniffin S.D., Reed R.A. et al. A compendium of recent optocoupler radiation test data // NSREC, 2000.
12. Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Печенкина Д.В. Исследование радиационного поведения ИС ключей с оптронной развязкой HSSR-711X // Радиационная стойкость. Научно-технический сборник. Вып. 13. М.: МИФИ, 2010. С. 35–36.
13. Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Братко Д.В. Исследование радиационного поведения твердотельных реле // Радиационная стойкость. Научно-технический сборник. Вып. 11. М.: МИФИ, 2008. С. 91–92.
14. Киргизова А.В., Скоробогатов П.К., Никифоров А.Ю. и др. Моделирование ионизационной реакции элементов КМОП КНС микросхем при импульсном ионизирующем воздействии // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 1. С. 28–44.
15. Чумаков А.И. Моделирование одиночных сбоев в элементах БИС // Микроэлектроника. 1988. Т. 18. № 5.
16. Агаханян Т.М., Никифоров А.Ю. Прогнозирование эффектов воздействия импульсного ионизирующего излучения на операционные усилители // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6.
17. Чумаков А.И., Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К. и др. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования эффектов одиночных сбоев в элементах современной микроэлектроники // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 2.
18. Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Pershenkov V.S., Skorobogatov P.K. IC's radiation effects modeling and esti-

- mation // *Microelectronics Reliability*. 2000. V. 40. № 12.
19. *Nikiforov A.Y., Chumakov A.I.* Simulation of space radiation effects in microelectronic parts // *Effects of space weather on technology infrastructure*. Kluwer Academic Publishers Netherlands, 2004.
 20. *Adell P.C., Schrimpf R.D., Choi B.K. et al.* Total-Dose and Single-Event Effects in Switching DC/DC Power Converters // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2002. V. NS-49. № 6. P. 3217–3221.
 21. *Adell P.C., Schrimpf R.D., Holman W.T. et al.* Total-dose and single-event effects in DC-DC converter control circuitry // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2003. V. NS-50. № 6. P. 1867–1872.
 22. *Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Яненко А.В.* Эффекты от одиночных ядерных частиц во вторичных источниках питания // *Спецтехника и связь*. 2011. № 4.
 23. *Poivey C., Buchner S., Howard J., LaBel K.* Testing guidelines for single event transient. Testing of linear devices // *NASA Goddard Space Flight Center*. 2003.
 24. *Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Печенкина Д.В.* Влияние режима работы аналоговых ИС на радиационное поведение // 12-я Российская научно-техническая конференция “Электроника, микро- и нанoeлектроника”. Сб. научн. трудов / Под ред. Стенина В.Я. М.: МИФИ, 2010. С. 251–257.
 25. *Согоян А.В., Никифоров А.Ю., Чумаков А.И.* Подход к прогнозированию радиационной деградации параметров КМОП ИС с учетом сроков и условий эксплуатации // *Микроэлектроника*. 1999. Т. 28. № 4.
 26. *Чумаков А.И., Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К. и др.* Методы прогнозирования эффектов полной дозы в элементах современной микроэлектроники // *Микроэлектроника*. 2003. Т. 32. № 1.
 27. *Никифоров А.Ю., Чумаков А.И., Скоробогатов П.К. и др.* Методы испытаний на стойкость к воздействию радиационных факторов космического пространства и импульсную электрическую прочность // *Модель космоса: Научно-информационное издание*. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007.
 28. *Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Sogoyan A.V.* IC space radiation effects experimental simulation and estimation methods // *Radiation Measurements*. 1999. V. 30.