

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТРОНОВ В РАДИАЦИОННО-СТОЙКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

В. А. Левцова, В. В. Кошкин, А. В. Овсов, М. К. Смирнов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Развитие атомной промышленности и все большее распространение различных техногенных источников ионизирующих излучений (ИИ) требует особого внимания к проблемам влияния ИИ на компоненты и узлы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Одной из основных задач, возникающих при конструировании РЭА, является необходимость прогнозировать уровень радиационной стойкости (РС) на ранних этапах разработки для обеспечения ее надежного функционирования в сложных условиях. Зачастую можно получить только некоторую граничную оценку, которая, как правило, не является полностью достоверной. Для достоверного прогнозирования уровня РС РЭА обычно требуется проведение дополнительных исследований влияния ИИ на параметры и характеристики содержащихся в ней схемотехнических узлов и ЭРИ.

Доклад посвящен исследованию влияния ИИ на различные типы оптронов и использованию их в радиационно-стойкой РЭА. Актуальность данной работы обусловлена тем, что современные оптроны широко используются в РЭА особого назначения и являются сложными устройствами, которые изготавливаются по гибридным технологиям. Они содержат различного рода полупроводниковые материалы, диэлектрические материалы, а из металлов выполняются корпусные конструкции и контакты. Поэтому реакция оптронов на воздействие ИИ носит более сложный характер, чем реакция отдельных, содержащихся в них материалов и конструктивных элементов.

Решению этих вопросов были посвящены исследования электронных узлов, содержащих оптроны, на стойкость к воздействию гамма-нейтронного излучения. Поскольку основным назначением оптронов является передача сигнала между гальванически развязанными узлами РЭА, в качестве основного объекта исследований были выбраны импульсные источники вторичного электропитания (ИВЭП), в типовых схемах которых оптроны используются в цепях обратной связи. Структурная схема такого ИВЭП приведена на рис. 1.

Рассмотрим основные физические эффекты, возникающие при взаимодействии ионизирующего излучения с веществом, которые требуется учитывать в процессе разработки радиационно-стойкой РЭА. К ним относятся смещение атомов из узлов кристаллической решетки (дефекты смещения) и генерация электронно-дырочных пар (ионизация). В общем случае частицы, проходя через вещество, отдают свою

энергию на ионизацию и на смещение атомов. Если частица передала веществу довольно значительную энергию, то возможно образование целой области разупорядочения, или кластера дефектов. Этот процесс наиболее вероятен при воздействии тяжелых частиц (протонов, нейтронов) с достаточно высокой энергией (согласно стандарту, например, количество дефектов, возникающих от частиц с энергией менее 100 кэВ, считается незначительным). В процессе накопления подобных дефектов сначала происходит деградация параметров и характеристик как отдельных ЭРИ, так и РЭА в целом. Потом возникают катастрофические отказы отдельных, наиболее чувствительных ЭРИ. На этих этапах еще возможно общее сохранение работоспособности РЭА, если вышеперечисленные моменты были учтены при ее конструировании, что будет рассмотрено ниже. Дальнейшее облучение приводит к лавинному нарастанию количества отказов ЭРИ, полной потери функционирования РЭА, а, начиная с некоторых уровней, и к разрушению конструкционных материалов.

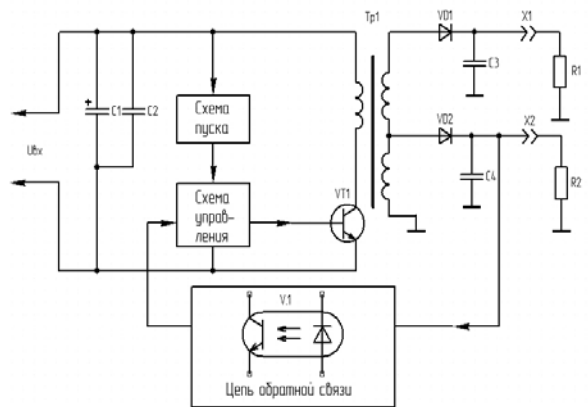


Рис. 1. Структурная схема ИВЭП

При взаимодействии легких частиц (электронов и квантов электромагнитного излучения) с веществом обычно происходит процесс ионизации. Особенность данного процесса заключается в том, что в полупроводниках, например, ионизация возможна уже при энергиях порядка 0,1 эВ, что соответствует ближнему ИК-диапазону, который используется в оптронах для передачи сигналов. А основное отличие высокоэнергетических частиц заключается в их повышенной проникающей способности.

Процесс ионизации приводит к накоплению объемного заряда, что, при незначительных уровнях облученности, может вызвать временную потерю работоспособности (ВПр) включенной РЭА. При этом через некоторое время после воздействия работоспособность РЭА восстанавливается. Необходимо учитывать, что ВПр РЭА, как правило, существенно превышает ВПр отдельных ЭРИ.

При значительных уровнях облученности деградация параметров и характеристик, приводящая к катастрофическим отказам, объясняется в основном нарушением изолирующих свойств материалов. В частности, одной из основных причин чувствительности МДП-структур к воздействию гамма-излучения является пробой подзатворного диэлектрика избыточным зарядом, накопленным в смежных областях.

Испытания ИВЭП на стойкость к воздействию гамма-нейтронного излучения проводились на моделирующей установке (МУ) при двух различных уровнях. Первый уровень воздействия соответствовал $1,3 \cdot 10^5$ по характеристике $7.I_1$ и 10^5 по характеристике $7.I_7$, а второй - $2 \cdot 10^5$ по характеристике $7.I_1$ и $2,5 \cdot 10^5$ по характеристике $7.I_7$. Графики выходных напряжений ИВЭП для соответствующих уровней воздействия приведены на рисунках 2-5. Проведем анализ полученных результатов.

После однократного воздействия на модуль очень короткого (порядка единиц мс) гамма-нейтронного импульса с первым уровнем воздействия, формируемого на МУ (рис. 2, 3), работоспособность ИВЭП сохраняется. Однако, в зависимости от типа примененного оптрона в цепи обратной связи ИВЭП, вид диаграммы выходного напряжения несколько отличается.

На рис. 2 приведена диаграмма выходного напряжения ИВЭП с оптроном 249КП8У.

На ней можно выделить три характерных участка. На первом участке наблюдается потеря работоспособности ИВЭП. На втором участке схема начинает восстанавливаться. Происходит запуск импульсного генератора, однако выходное напряжение возрастает до уровня, превышающего номинальное значение. Это связано с тем, что ВПр оптрона, находящегося в цепи следящей обратной связи, выше, чем ВПр микросхемы импульсного генератора. На третьем участке происходит восстановление работоспособности оптрона, цепь обратной связи замыкается, выходное напряжение восстанавливается до номинального значения.

Следует отметить, что если величина выходного напряжения превышает номинальное значение более чем на 10 %, то появляется риск выхода из строя микросхем в подключенных устройствах.

Аналогичная диаграмма для ИВЭП с оптроном 249КП1 приведена на рис. 3. Ее характерным отличием является отсутствие «броска» выходного напряжения, что говорит о существенно меньшем ВПр для данного оптрона.

Следует обратить внимание на то, что оптрон 249КП8У хоть и имеет более высокий уровень стойкости по характеристикам $7.I_1$, $7.I_6$, $7.I_7$, но уровень бессбойной работы (УБР) у него в два раза меньше, чем у 249КП1. Таким образом, если требуется обеспечить именно стойкость (а не прочность) РЭА, то применение оптрона 249КП8У может не дать ожидаемого результата. Как правило, обеспечить УБР и ВПр РЭА лучше, чем у используемых в ней ЭРИ возможно только в случае применения специальных мер защиты, а непосредственно корпуса ЭРИ такую защиту не обеспечивают.

Отказ ИВЭП наблюдается после второго уровня воздействия. Характер отказов для ИВЭП с оптронами 249КП8У и 249КП1 приведен на рис. 4 и рис. 5, соответственно.

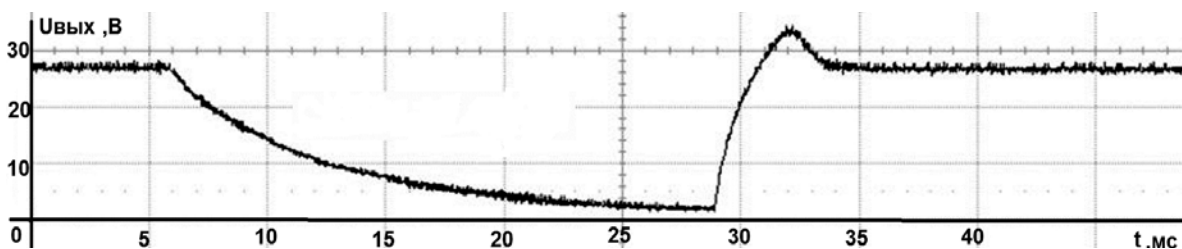


Рис. 2. Диаграмма выходного напряжения ИВЭП с оптроном 249КП8У

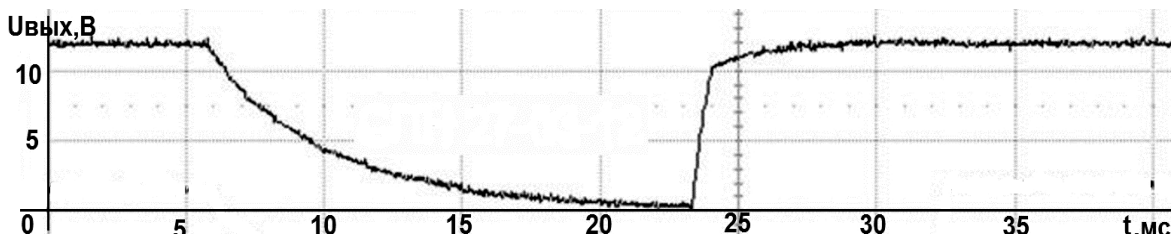


Рис. 3. Диаграмма выходного напряжения ИВЭП с оптроном 249КП1

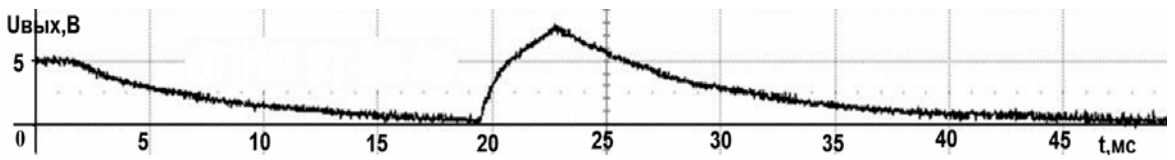


Рис. 4. Диаграмма отказа ИВЭП с оптроном 249КП8У

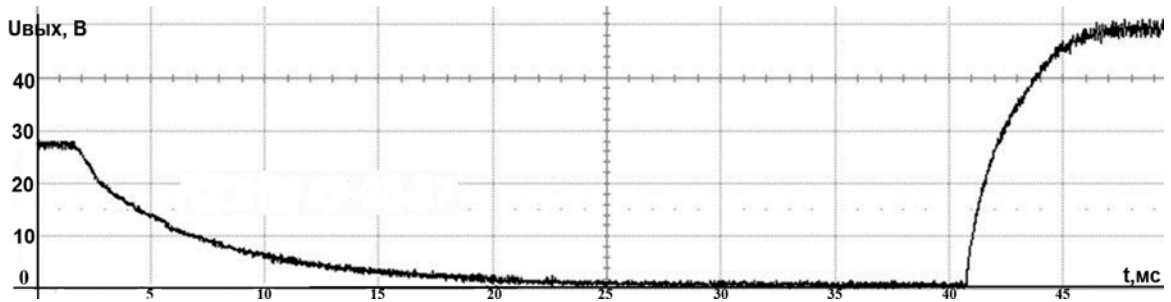


Рис. 5. Диаграмма отказа ИВЭП с оптроном 249КП1

Отказ, представленный на рис. 5, когда выходное напряжение возрастает до уровня, существенно превышающего номинальный, говорит о том, что произошел разрыв в цепи обратной связи ИВЭП. Основной причиной такого отказа является выход из строя оптрона.

Разберем подробнее отдельные рекомендации, на которые следовало бы обратить внимание при разработке радиационно-стойких узлов РЭА, содержащих оптроны:

- выбор ЭРИ по стойкости к воздействию ионизирующего излучения;
- использование ЭРИ в облегченных электрических режимах;
- введение в схему дополнительных защитных компонентов.

Рассмотрим подробнее предложенные рекомендации. По вопросу выбора ЭРИ, прежде всего, необходимо отметить, что согласно рекомендациям стандарта, допускается не проводить радиационные испытания, если уровень стойкости используемых ЭРИ более чем на порядок превышает требования по РС к соответствующему прибору. Особенно необходимость применения ЭРИ, обладающих значительными запасами РС, относится к радиационно-чувствительным узлам и к РЭА, которая должна функционировать во время воздействия ионизирующего излучения. Если во время воздействия излучения РЭА находится в обесточенном состоянии, то вполне достаточно, чтобы уровень стойкости ЭРИ соответствовал требованиям по РС прибора. Подробнее оценка соответствия выбранной номенклатуры ЭРИ требованиям РС РЭА приведена в руководстве.

Вторая рекомендация говорит о том, что при использовании ЭРИ в облегченных электрических режимах можно обеспечить некоторое повышение уровня радиационной стойкости, однако, точно установить, на сколько он повысится, можно только после проведения соответствующих испытаний. Это связано с тем, что ЭРИ испытываются на стойкость к воздействию ионизирующего излучения только при

номинальном электрическом режиме, и данная информация приводится в технических условиях (ТУ) на ЭРИ. Связь же между уровнем РС и соответствующими электрическими параметрами ЭРИ, как правило, является существенно нелинейной, что затрудняет определение уровня РС теоретическими методами, путем проведения математических расчетов.

Вообще говоря, приемлемую оценку РС с помощью теоретических методов можно получить только, когда прогнозируемый результат находится внутри исследуемой области, по которой строится соответствующая математическая модель. Если в процессе построения математической модели какие-либо из параметров не были учтены, то они и не могут быть достоверно спрогнозированы с использованием данной модели. В этом случае можно получить только некоторую граничную оценку, которая, как правило, является существенно завышенной. Однако подобный подход в большинстве случаев является приемлемым, поскольку полное исследование влияния на уровень стойкости ЭРИ всех параметров и характеристик значительно увеличивает стоимость радиационных испытаний.

Обычно вопрос о правильности применения ЭРИ в каждой конкретной схеме рассматривается в процессе проведения комплексной оценки эффективности технических решений по обеспечению стойкости РЭА к воздействию ИИ.

Согласно третьей рекомендации в схему необходимо вводить дополнительные защитные компоненты, которые обеспечивают шунтирование основных цепей прохождения сигнала и защищают их от радиационных токов критического уровня, приводящих к катастрофическим отказам различных ЭРИ. Основным требованием к таким защитным компонентам является минимизация их влияния на функционирование схемы в нормальных условиях. В качестве простейших вариантов подобной защиты следует упомянуть использование диода в обратном включении для шунтирования чувствительных входных цепей и токоограничивающего резистора в цепях питания КМОП

микросхем. В цифровых и микропроцессорных схемах к защитным компонентам могут быть так же отнесены устройства перезапуска, которые обеспечивают восстановление нормального функционирования прибора после сбоя в момент воздействия ионизирующего излучения.

Особенно следует отметить важность схемотехнического конструирования РЭА с учетом поведения ЭРИ под воздействием излучения, а также с учетом взаимовлияния ЭРИ друг на друга. Пренебрежение

данной рекомендацией может привести к снижению уровня РС РЭА ниже стойкости отдельных компонентов.

В результате проведенных испытаний были получены данные по поведению электронных узлов с оптронами под действием ионизирующего излучения. Эти данные позволяют более точно оценивать и прогнозировать стойкость электронных схем с использованием оптронов, а также расширить область их применения в радиационно-стойкой аппаратуре.