

# РОЛЬ И МЕСТО ИМИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ АППАРАТУРЫ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ К ДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

*А. В. Анисимов, В. Ф. Герасимов, В. В. Гонтарь, В. А. Телец*

ФГУ «12 ЦНИИИ МО РФ», г. Сергиев Посад, Московская обл.

ФГУ «22 ЦНИИИ МО РФ», г. Мытищи, Московская обл.

*Проанализированы возможности существующих технологий радиационных испытаний изделий электронной техники с использованием моделирующих установок и имитаторов. Определены основные направления использования имитационных испытаний при разработке аппаратуры с повышенной радиационной стойкостью. Рассмотрены основные преимущества и недостатки таких испытаний и перспективы их развития.*

На совещании Межведомственной координационной комиссии по работам в области неядерных вооружений, проводимым предприятиями ядерного оружейного комплекса, было отмечено, что в ближайшие годы Россия может оказаться в опасной технологической зависимости от иностранных производителей электронной компонентной базы (ЭКБ) при создании стратегических систем вооружений и конкурентно способных образцов оперативно-тактического оружия. Для предотвращения этой тенденции необходимо форсировать работы по созданию современной отечественной ЭКБ и, прежде всего, функционально-сложных изделий микроэлектроники таких как: большие и сверхбольшие интегральные схемы (БИС и СБИС), сложнофункциональные блоки (СФ-блоки) и «системы на кристалле», особенно в радиационностойком исполнении. Оценка соответствия характеристик таких изделий предъявляемым требованиям стойкости является сложной технической задачей и требует совершенствования сложившейся методологии ее решения.

Согласно действующим нормативным документам [1] испытания ЭКБ на радиационную стойкость преимущественным образом должны проводиться на моделирующих установках (МУ), поскольку считается, что в этом случае наиболее полно воспроизводятся реальные условия воздействия (здесь и далее под МУ будем понимать мощные импульсные установки тормозного рентгеновского излучения, ускорители протонов и электронов, ядерные реакторы и изотопные источники гамма-излучения). Однако обеспечить с помощью МУ требуемые информативность и достоверность испытаний функционально-сложных изделий микроэлектроники достаточно трудно, а во многих случаях и невозможно, по ряду причин.

Прежде всего, это связано с необходимостью использования длинных (от 7 до 20 м) кабельных линий связи и высокими уровнями сопутствующих электромагнитных помех на МУ. В результате резко ограничиваются возможности обеспечения требуемых (наиболее критичных) режимов работы испытываемых изделий в рабочих объемах установок (функциональных, электрических и температурных) и регистрации их реакции на воздействие радиационных факторов. Это, в свою очередь, приводит к снижению информативности и достоверности результатов оценок, так как выбор режимов работы изделий и параметров-критериев стойкости осуществляют не по принципу критичности, как это предусмотрено [1], а исходя из технической возможности, определяемой кабельными линиями. В результате, во многих случаях, испытания функционально-сложных изделий на МУ проводят в статических режимах, а показатели стойкости определяют по таким параметрам как ток потребления и уровни выходных сигналов.

Во-вторых, для МУ характерна сравнительно высокая стоимость испытаний (десятки тысяч рублей за один пуск) и низкая производительность (для существующих импульсных установок тормозного рентгеновского излучения - единицы импульсов в день, а для ядерных реакторов - один импульс в день). Это обстоятельство существенно снижает возможности их использования для предварительных испытаний по установлению критичных рабочих, температурных режимов и параметров-критериев испытываемых изделий и затрудняет получение статистически значимых результатов, что влияет на достоверность получаемых оценок. Следует также отметить, что по опыту специалистов ФГУП «НИИП» потребное количество пусков на предварительные испытания сложнофункциональных ИС составляет сотни импульсов.

В-третьих, существующие импульсные установки тормозного рентгеновского излучения такие как ЛИУ-30 и УИН-10, позволяющие проводить в полном объеме испытания изделий на воздействие факторов 7.И со значениями характеристик 7.И13-7.И15 до 2х2Р [2], не обеспечивают проведение испытаний по длительности импульса для длиннопериодной компоненты факторов 7.И с характеристиками 7.И6, 7.И10, 7.И11.

В-четвертых, организационные сложности проведения испытаний на МУ (предварительные заявки, координационный план испытаний на год и др.) и удаленность экспериментально-испытательных баз от предприятий разработчиков и изготовителей ЭКБ практически не позволяют использовать МУ для оперативных оценок стойкости изделий на этапах разработки, производства и поставки.

Наряду с испытаниями на моделирующих установках в последние годы ЭНПО «СПЭЛС» при участии ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России» и «12 ЦНИИ Минобороны России» отработана и внедрена в практику новая технология испытаний ИС и полупроводниковых приборов (ПП) на радиационную стойкость с использованием имитирующих установок (ИУ) или, как их еще называют, - имитаторов. В качестве таких установок используют импульсные лазеры, источники на основе рентгеновских трубок, изотопные источники ядерных частиц, а также генераторы одиночных импульсов напряжения. Имитаторы моделируют, как правило, один из доминирующих механизмов воздействия на изделие факторов 7.И, 7.С и 7.К (структурные повреждения, поверхностную, объемную или локальную ионизацию и т. п.) и вызываемые ими первичные и вторичные радиационные эффекты (ионизационные токи, сбой, тиристорный эффект, пережоги металлизации и внутренних межсоединений, вторичный тепловой пробой, необратимые изменения параметров и др.).

Особенности применения имитационных испытаний для оценки соответствия изделий требованиям стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений регламентируются [1], а методы и общие методики проведения имитационных испытаний изделий электронной техники и методы оценки их стойкости по результатам этих испытаний определены в ряде руководящих документов [3-8] и отраслевом стандарте [9].

Имитационные испытания позволяют исключить основные недостатки, характерные для испытаний на МУ, о которых говорилось выше. В частности, при работе имитаторов отсутствуют электромагнитные помехи, а длины кабельных линий, соединяющих устройства задания электрических и функциональных режимов и регистраторов с испытываемым изделием не превышают 1,5 м, что позволяет проводить испытания сложнофункциональных ИС в динамических режимах (в реальном масштабе времени) с использованием автоматизированных средств на основе ПЭВМ. При этом созданные лазерные имитаторы позволяют испытывать изделия, выполненные по биполярной, объемной КМОП и КМОП КНС технологиям, обладают высокой стабильностью характеристик излучений и обеспечивают максимальные уровни воздействий, эквивалентные действию факторов 7.И со значениями характеристики 7.Иб порядка  $5 \times 10^6 \text{ Ус}$  ( $\sim 0,8 \times 3\text{Р}$ ), с длительностями импульсов от единиц нс до 20-30 мкс (соответствует требованиям [2]). С их помощью можно воспроизводить многократные воздействия и воздействия со сложной амплитудно-временной формой. Производительность (частота пусков) имитаторов, которая ограничивается временем контроля параметров изделия после воздействия и временем изменения режима работы изделия и параметров излучения лазера, составляет не более единиц минут. Экспериментально подтверждена возможность применения лазерных имитаторов для изделий с перекрытием кристалла металлизацией до 90 %, а также для изделий с многослойной (до 3-х слоев) металлизацией, что во многом обеспечивает испытания современной функционально-сложной ЭКБ. Имитаторы оборудованы средствами, обеспечивающими проведение испытаний при различных температурах.

Отмеченные выше преимущества позволяют использовать имитационные испытания для определения информативных критериальных параметров и критериев радиационной стойкости изделий электронной техники, наиболее критичных в части стойкости функциональных, электрических и температурных режимов работы изделий, устанавливать количественные значения показателей стойкости, обеспечить статистическую значимость результатов испытаний.

Малые габариты и энергопотребление, высокая надежность, радиационная безопасность и удобство обслуживания позволяют использовать имитаторы, как в лабораторных условиях, так и на производстве при относительно низкой стоимости проведения испытаний.

Адекватность имитационных испытаний реальным радиационным воздействиям достигается путем проведения калибровочных испытаний испытываемых изделий на МУ, что обеспечивает достоверность оценок соответствия стойкости изделий заданным требованиям. Следует заметить, что объем испытаний на моделирующих установках при этом минимален.

Основным недостатком, присущим лазерным и рентгеновским имитаторам, является необходимость удаления перед началом испытаний крышек корпусов изделий, если они изготовлены из «не прозрачных» для имитационных воздействий материалов. Кроме того, при лазерных имитационных испытаниях не воспроизводится ионизация диэлектрических структур изделий электронной техники и эффекты дозового усиления. При этом практика проведения имитационных испытаний ПП и ИС, выполненных на основе кремния, не выявила случаев влияния вскрытия корпуса изделия на показатели его радиационной стойкости, а также существенного влияния дозовых эффектов в диэлектрических структурах на обратимые

ионизационные эффекты, обусловленные объемной ионизацией полупроводников. В то же время испытания изделий, для которых эффект усиления дозы является существенным, должны проводиться на лазерных имитаторах с учетом соответствующих положений [1].

Предельные эквивалентные уровни воздействий лазерных имитаторов составляют порядка  $5 \times 6 \text{ Ус}$  и ограничиваются эффектами термической эрозии поверхности кристалла и металлизации. Существующие лазерные имитаторы не позволяют пока испытывать изделия электронной техники, выполненные на основе широкозонных полупроводниковых материалов.

За рубежом также используют подобные имитаторы, в частности, для отработки и испытаний изделий электронной техники на стойкость к действию ионизирующих излучений космического пространства [10]. Информация об использовании аналогичных установок для испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию других радиационных факторов в открытой печати отсутствует.

В настоящее время по заказу Минобороны России проводятся исследования возможности использования для задач, решаемых лазерными имитаторами, высокопроизводительных малогабаритных импульсных ускорителей тормозного рентгеновского излучения типа АРСА и других. В ходе этих исследований становится понятным, что эти установки не обеспечивают испытаний изделий в полном объеме предъявляемых [2] требований, поскольку имеют существенные ограничения по уровням воздействий (не более  $2 \text{ Ус}$ ) и длительности импульса. Кроме того, относительно мягкий энергетический спектр излучений этих МУ вызывает трудности, обусловленные необходимостью учета эффекта усиления дозы, проявляющегося в чувствительных областях изделий.

Таким образом, можно заключить, что на сегодняшний момент единственным методом, позволяющим получать достоверные оценки показателей радиационной стойкости функционально-сложных изделий микроэлектроники, является совместное использование имитационных испытаний и испытаний на МУ.

Проведенный анализ позволяет также сформулировать следующие рекомендации по использованию имитационных методов испытаний в целях создания аппаратуры и комплектующей ее ЭКБ с повышенной радиационной стойкостью.

1. Внедрение системы имитационных испытаний на предприятиях разработчиках и изготовителях изделий электронной техники для экспериментальной отработки и контроля радиационной стойкости изделий на этапах разработки, в процессе производства и поставки.

2. Внедрение имитационных испытаний для целей сертификации изделий электронной техники иностранного производства, разрешенных для применения в аппаратуре образцов ВВТ.

3. Сделать обязательными имитационные испытания вновь разрабатываемых изделий электронной техники, прежде всего функционально-сложных, предназначенных для применения в аппаратуре образцов ВВТ с повышенными требованиями радиационной стойкости.

4. Использовать имитационные испытания на аппаратуростроительных предприятиях при комплектовании аппаратуры важнейших образцов ВВТ.

Опыт проведения имитационных испытаний показал, что их методическое и техническое обеспечение требует наличия специально подготовленных высококвалифицированных кадров. Поэтому целесообразно наладить координационную работу по методическому и научно-техническому сопровождению проведения имитационных испытаний с целью максимально эффективного использования их возможностей. Это можно организовать в форме кратковременных курсов обучения персонала или проведения выездных школ-семинаров по данной проблематике.

Очевидно, что в связи с ускоренным развитием электронной техники, необходимостью разработки и создания отечественных изделий электронной техники с повышенной радиационной стойкостью, требуется дальнейшее развитие и совершенствование системы имитационных испытаний. Такое развитие должно осуществляться преимущественно путем разработки новых технических средств и методов имитационных испытаний, расширяющих номенклатуру классов, групп и подгрупп испытываемых изделий, в том числе изделий твердотельной СВЧ-электроники, изделий, изготовленных на основе применения нестандартных материалов (арсенида галлия, карбида кремния, силицида германия, ультратонкого кремния и т. п.), а также изделий микросистемной техники и наноэлектроники. Представляется также очень важным создание изотопного источника альфа-излучения, обладающего большим ресурсом, для имитационных испытаний изделий на стойкость по необратимым изменениям параметров, вызываемым структурными дефектами.

## Список литературы

1. ГОСТ РВ 20.57.415-98.
2. ГОСТ РВ 20.39.414.2-98.
3. РД В 319.03.22-97.
4. РД В 22.34.127-89
5. РД В 319.03.52-2004.
6. РД В 319.03.24-97.
7. РД В 319.03.58-2006.
8. РД В 319.03.30-98.
9. ОСТ 11.073.013-03. Часть 10.
10. MIL-STD-883E, 1997.