

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,  
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՄՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

## **Պետրոսյան Արթուր Արայիկի**

**ՌԱԴԻՍԻՆՈՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՆԿԱՏՄԱՄԲ ԿԱՅՈՒՆ ԹՎԱՅԻՆ  
ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԻԵՄԱՆԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե.27.01 «Էլեկտրոնիկա, միկրո և նանոէլեկտրոնիկա» մասնագիտությամբ  
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի  
հայցման ատենախոսության

**ՍԵՂՄԱԳԻՐ**

Երևան 2020

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА  
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**Петросян Артур Араикович**

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННО  
СТОЙКИХ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.27.01-  
“Электроника, микро- и наноэлектроника”

Ереван 2020

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ):

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Վ.Շ. Մելիքյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Օ.Հ. Պետրոսյան  
տ.գ.թ. Խ.Գ. Շարոյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ «Երևանի կապի միջոցների  
գիտահետազոտական ինստիտուտ» ՓԲԸ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2020թ. հուլիսի 7-ին, ժամը 14:00-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2020թ. մայիսի 26-ին:

046 Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Վ.Յ. Այվազյան

---

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА)

Научный руководитель: д.т.н. В.Ш. Меликян

Официальные оппоненты: д.т.н. О.А. Петросян  
к.т.н. Х.Г. Шароян

Ведущая организация: ЗАО "Ереванский научно-исследовательский институт средств связи"

Защита диссертации состоится 7-го июля 2020г. в 14:00 на заседании Специализированного совета 046 — "Радиотехники и электроники", действующего при НПУА, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА. Автореферат разослан 26-го мая 2020 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета 046,  
к.т.н.



Մ.Շ. Այվազյան

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы параллельно с широким развитием микроэлектронной промышленности проектируются сложные и многофункциональные цифровые интегральные схемы (ИС). Такие новейшие ИС могут использоваться в космосе, на атомных станциях, в автомобильной промышленности и т.д. Для удовлетворения требований большой плотности элементов и быстродействия уменьшаются геометрические размеры транзисторов. Вследствие этого цифровые ИС становятся более уязвимыми по отношению к явлениям радиационного излучения (РИ). В радиационных средах бесперебойная работа ИС является одной из важнейших проблем проектировщиков. Это обусловлено тем, что в ИС после воздействия РИ возникают временные нарушения в комбинационных и последовательностных элементах, а также потери данных в узлах памяти. Чтобы избежать таких проблем, используются радиационно стойкие ИС. Однако они имеют относительно более высокую стоимость на рынке. Для производства радиационно стойких цифровых ИС необходимо смоделировать соответствующие сбои на этапе проектирования, чтобы выяснить поведение ИС в условиях наличия радиации. По этой причине разработка современных средств проектирования и моделирования для повышения устойчивости к радиации в производстве цифровых ИС имеет насущное и важное значение.

В настоящее время лидирующие организации и научные группы ведут большую работу по моделированию возникаемых в результате РИ нарушений, а также по повышению устойчивости к последним. Несмотря на это, существующие сегодня методы моделирования и проектирования цифровых ИС, устойчивых к РИ, не могут полностью удовлетворить современным требованиям и неэффективны с точки зрения быстродействия. Для решения вышеизложенных проблем разработка новых методов имеет важное и актуальное значение, при этом учитывается тот факт, что цифровые ИС используют в таких средах, где неполадки из-за РИ недопустимы.

Диссертация посвящена разработке средств проектирования устойчивых к РИ цифровых ИС.

**Объект исследования.** Методы моделирования воздействия РИ в комбинационных и последовательностных элементах и средства сокращения времени проектирования.

**Цель работы.** Разработка методов проектирования и моделирования для повышения устойчивости к эффектам РИ цифровых ИС.

**Методы исследования.** Теория влияния РИ в цифровых ИС, исследование влияния РИ на компонентном, схмотехническом и логическом уровнях моделирования, методы аппроксимации, реализация программного инструмента при помощи методов графического интерфейса пользователя и с использованием объектно-ориентированных программных языков.

### **Научная новизна:**

- Разработаны принципы повышения стойкости цифровых ИС к радиационному облучению, позволяющие значительно снизить длительность процесса проектирования радиационно стойких схем.

- Предложен метод расчета задержек комбинационных цифровых элементов, учитывающих воздействие радиационного облучения, который благодаря аналитическим моделям задержки распространения сигнала обеспечивает почти 6-кратное сокращение продолжительности моделирования излучения в процессе проектирования ИС за счет максимальной потери точности моделирования, не превышающей 9%.
- Разработан метод расчета нарушений времени предустановки, удержания и установки в последовательностных цифровых элементах, который благодаря использованию аналитических моделей сокращает время моделирования сбоев в процессе проектировании ИС почти в 5...6 раз за счет потерь точности, не превышающих 7%, 5,6% и 3% соответственно.
- Предложен метод моделирования потери данных из-за РИ в последовательностных цифровых элементах, который благодаря моделям временных нарушений и переключению состояний последовательностных элементов обеспечивает сокращение времени, затрачиваемого на моделирование облучения в процессе проектирования ИС, в 2...3 раза за счет потери точности примерно на 3...4%.

**Практическая ценность работы.** Предложенные в диссертации принципы и методы были реализованы в программном обеспечении (ПО) Radiation Effects Simulator (RES), разработанном для проектирования повышения стойкости цифровых ИС к радиационному облучению. ПО внедрено в ЗАО "Синопсис Армения" и используется в процессе проектирования цифровых ИС, стойких к РИ. Тестирование показало, что время, затрачиваемое на моделирование излучения в процессе проектирования ИС, сократилось, как минимум, в 6 раз в комбинационных элементах, в 5 раз - в последовательностных цифровых элементах, в 5...6 раз - в цепях хранения данных при средней потере точности моделирования около 9,25%.

**Достоверность научных положений** Научные результаты подтверждены экспериментальными результатами проверки методов и способов моделирования РИ, представленными в диссертации, а также математическими обоснованиями.

**Внедрение.** Программное обеспечение Radiation Effects Simulator (RES) встроено в ЗАО "Синопсис Армения" и используется при проектировании радиационно стойких цифровых ИС.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- метод расчета задержек комбинационных цифровых элементов с учетом влияния радиационного излучения;
- метод моделирования временных нарушений в цифровых элементах с обратной связью с учетом радиационного облучения;
- метод моделирования потери данных из-за радиационного облучения в последовательностных цифровых элементах.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на:

- 38-ом Международном симпозиуме "ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY" (Киев, Украина, 2018 г.);

- 8-ом Международном симпозиуме "Small Systems Simulation" (Ниш, Сербия, 2020 г.);
- научных семинарах кафедры "Микроэлектронные схемы и системы" НПУА (Ереван, Армения, 2017-2020 гг.);
- научных семинарах ЗАО "Синописис Армения" (Ереван, Армения, 2017 - 2020 гг.).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в семи научных трудах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 93 наименования, а также 4-х приложений. Первое приложение включает в себя акт внедрения диссертации, во втором приложении представлены некоторые части кода C++ программного обеспечения Radiation Effects Simulator (RES), в третьем - содержание одной из смоделированных цифровых схем, а в четвертом - список использованных рисунков, таблиц и аббревиатур. Основной текст диссертации составляет 101 страницу, а вместе с приложениями - 152 страницы. Диссертация написана на армянском языке.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследования, представлены научная новизна, практическая значимость и основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** осуществлен обзор литературы, рассмотрены виды радиационного воздействия в цифровых ИС, проведен анализ воздействия радиационных эффектов на временные и функциональные параметры комбинационных и последовательностных цифровых схем. Изучены существующие методы и проблемы моделирования радиационного воздействия в комбинационных и последовательностных цифровых схемах, сформулированы требования к методам проектирования радиационно стойких цифровых ИС.

Цифровые ИС, основанные на технологиях металл-оксид-полупроводник, широко используются в различных средах и системах, где они подвергаются воздействию радиации, что может привести к потерям данных или другим недопустимым ошибкам. Анализ воздействия радиационных эффектов показал, что в последние годы с развитием технологий ИС возросла уязвимость элементов к одиночным радиационным эффектам. Такие эффекты возникают при взаимодействии заряженных частиц (нейтроны, тяжелые ионы, протоны или альфа-частицы) с элементами ИС. В зависимости от степени линейной передачи энергии (ЛПЭ), после РИ возникают различные временные и функциональные нарушения в комбинационных и последовательностных цифровых схемах. Результаты анализа в комбинационных цифровых схемах показали, что возникает рост задержки распространения сигналов (рис. 1), который может привести к ухудшению быстродействия цифровых ИС. С другой стороны, анализ радиационных эффектов в последовательностных схемах показал, что и в этом случае происходит деградация временных параметров. По мере роста ЛПЭ после радиационного воздействия растёт и время предустановки, удержания и установки данных (рис. 2).

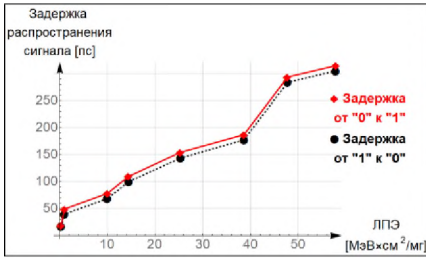


Рис. 1. Зависимость задержки распространения сигнала элемента "И-НЕ" от разных значений ЛПЭ

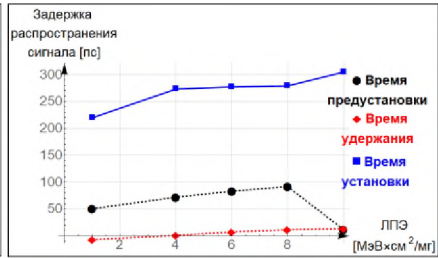


Рис. 2. Зависимость временных параметров D-триггера от разных значений ЛПЭ

Помимо вышеперечисленных проблем, важно отметить также потерю данных в последовательных цифровых элементах, которая возникает во время эффектов радиационно-индуцированных сбоях (РИС). Экспериментальные результаты показали, что потеря данных происходит, когда заряженные частицы попадают в триггер, где ток от 20 до 90 мА, вызванный этой частицей, приводит к переключению сохраненного состояния от "0" до "1" (рис. 3).

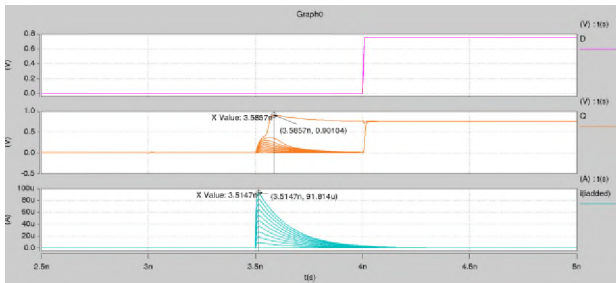


Рис. 3. Переключения состояния D-триггера от "0" до "1"

Из приведенных примеров и аргументов становится ясно, что воздействие радиации может привести к выходу из строя современных цифровых ИС. В последние годы для повышения устойчивости к нарушениям в цифровых ИС вследствие воздействия радиации были разработаны различные подходы и методы, основанные на схемотехнических решениях. Тем не менее, повышение стабильности цифровых схем также зависит от оценки РИ с помощью быстрых и точных методов моделирования радиационных эффектов. Существующие методы моделирования и оценки воздействия радиации на временные параметры основаны на сложных аналитических моделях, которые не обеспечивают необходимую эффективность. Кроме того, существующие модели, используемые для моделирования временных деградаций, типичных для последовательных цифровых схем, приводят к большим потерям точности моделирования. Что касается моделирования потерь данных из-за РИС радиационных эффектов, то применяемый метод также не обеспечивает необходимого быстродействия и

эффективности. Результаты исследования моделирования потерь данных (рис. 4) показали, что время моделирования удваивается с увеличением числа моделируемых нарушений, вызванных воздействием радиационных эффектов, поскольку этот метод основан на добавлении новых элементов во все ячейки цифровых библиотек, и не учитываются потери данных из-за временных нарушений.

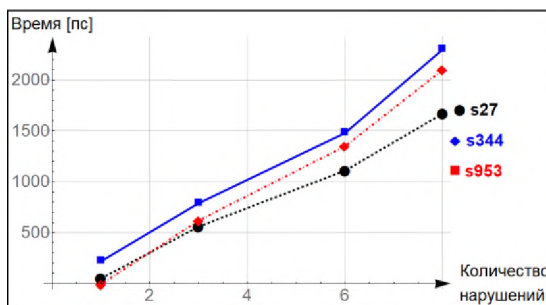


Рис. 4. Зависимость длительности моделирования от количества нарушений, вызванных РИ

Анализ методов проектирования радиационно стойких цифровых ИС показал, что моделирование радиационных эффектов на логическом уровне является наиболее эффективным способом, чем моделирование на компонентном или схемотехническом уровне. Следовательно, необходимо разработать более быстрые и точные методы оценки и моделирования воздействия радиационного излучения в комбинационных и последовательностных цифровых схемах.

В главе также сформулированы требования к разработке средств проектирования радиационно стойких цифровых ИС. Показано, что моделирование эффектов облучения играет важную роль в процессе проектирования радиационно стойких ИС.

**Во второй главе** предложены принципы разработки радиационно стойких цифровых ИС, дается описание разработанных методов моделирования радиационных эффектов в комбинационных и последовательностных цифровых схемах.

Принципы разработки радиационно стойких цифровых ИС включают: доступность моделей различных радиационных эффектов, методы моделирования радиационных воздействий, программные инструментальные средства моделирования радиационных явлений в цифровых ИС, в частности, обеспечение методов моделирования облучения, которые могут быть реализованы в программных инструментах. Предлагаются методы моделирования временных нарушений в комбинационных и последовательностных ИС.

1. Метод расчета задержек комбинационных цифровых элементов с учетом влияния РИ. Это первый из разработанных методов моделирования временных нарушений. Суть предлагаемого способа заключается в создании аналитических моделей задержки распространения сигнала путем аппроксимации результатов моделирования радиационных воздействий схемотехнического уровня при

различных ЛПЭ. Реализация этой идеи состоит из следующих этапов (рис. 5). Прежде всего, необходимо провести схемотехническое описание комбинационного цифрового элемента для разных технологических процессов, затем с помощью программы схемотехнического моделирования выполнить моделирование задержки распространения сигнала выбранного элемента при переходе выходного сигнала от "1" к "0" и от "0" к "1". Целью моделирования является получение зависимости влияния РИ и задержки распространения сигнала цифрового элемента от значений различных ЛПЭ.

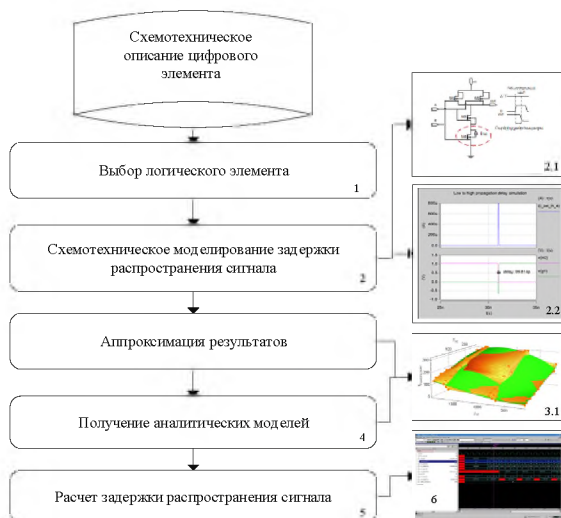


Рис. 5. Последовательность шагов для метода расчета задержек распространения сигнала в комбинации цифровых элементов

Для того чтобы получить эту зависимость, необходимо смоделировать изменение выходного тока транзисторов с учетом влияния РИ. Изменение выходного тока транзисторов в зависимости от РИ моделируется генератором тока:

$$I_{PI}(t, Q_{заряд}) = \frac{Q}{\tau_{спад} - \tau_{рост}} \left( \frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau_{рост}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{спад}}\right)}{\cos(\theta)} \right) \quad (1)$$

где  $Q_{заряд}$  – заряд, индуцированный одиночной частицей;  $\tau_{спад}$  – время спада тока;  $\tau_{рост}$  – время нарастания тока;  $t$  – момент удара заряженной частицы по поверхности транзистора;  $\theta$  – угол удара заряженной частицы.

Например, для моделирования задержки комбинационной цифровой схемы "И-НЕ" при переходе выходного сигнала от "0" к "1" генератор тока соединяется с транзистором М2 (рис. 6а), а для моделирования задержки распространения сигнала при переходе выходного сигнала от "1" к "0" - с М4 (рис. 6б).



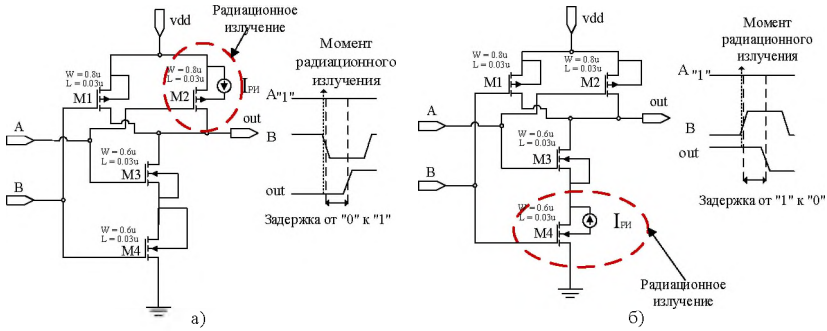


Рис. 6. Влияние радиационного облучения в элементе "И-НЕ" на: а- транзистор M2, б- транзистор M4

После получения зависимости влияния РИ и задержки распространения сигнала цифрового элемента от значений различных ЛПЭ путем аппроксимации результатов схемотехнического моделирования создаются аналитические модели задержки распространения сигнала при переходе выходного сигнала от "1" к "0" (2) и от "0" к "1" (3):

$$T_{\text{всп}}^{01} = -2.76716 * 10^8 I_{\text{РИ}}^3 - 5.18434 * 10^7 T_{\text{РИ}} I_{\text{РИ}}^2 + 0.000116931 I_{\text{РИ}}^2 - 7.62958 * 10^7 T_{\text{РИ}}^2 I_{\text{РИ}} + 0.00128404 T_{\text{РИ}} I_{\text{РИ}} - 0.0784258 I_{\text{РИ}} - 4.77198 * 10^6 T_{\text{РИ}}^3 + 0.00233277 T_{\text{РИ}}^2 + 0.102407 T_{\text{РИ}} + 30.9632 \quad (2)$$

$$T_{\text{всп}}^{10} = 1.15608 * 10^7 I_{\text{РИ}}^3 - 6.81333 * 10^6 T_{\text{РИ}} I_{\text{РИ}}^2 - 0.000277379 I_{\text{РИ}}^2 - 2.26109 * 10^6 T_{\text{РИ}}^2 I_{\text{РИ}} + 0.000658129 T_{\text{РИ}} I_{\text{РИ}} + 0.205052 I_{\text{РИ}} + 0.0000113264 T_{\text{РИ}}^3 - 0.0045319 T_{\text{РИ}}^2 + 0.938275 T_{\text{РИ}} + 16.5627 \quad (3)$$

где  $T_{\text{РИ}}^{0,1}$  – задержка распространения сигнала при переходе выходного сигнала от "0" к "1";  $T_{\text{РИ}}^{1,0}$  – задержка распространения сигнала при переходе выходного сигнала от "1" к "0";  $T_{\text{РИ}}$  – длительность радиационного излучения;  $I_{\text{РИ}}$  – ток, индуцированный одиночной частицей.

С целью оценки эффективности предложенного метода спроектирована цепочка логических элементов с напряжением питания 1,05 В, которая содержит 10 пифровых элементов "И-НЕ" (рис. 7).

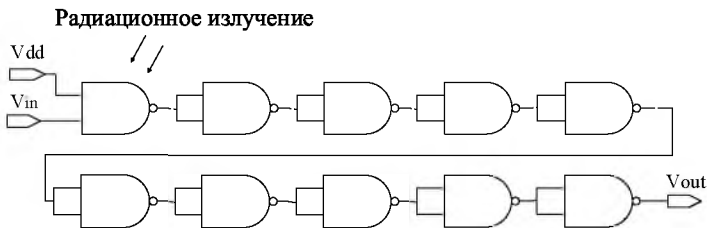


Рис. 7. Моделирование задержки распространения сигнала, вызванной РИ в цепи, состоящей из 10 элементов "И-НЕ"

Результаты использования аналитических моделей показывают, что предлагаемый метод, по сравнению со схемотехническим методом, обеспечивает почти 6-кратное сокращение времени моделирования (рис. 8) за счет максимальной потери точности моделирования, не превышающей 9% (рис. 9).

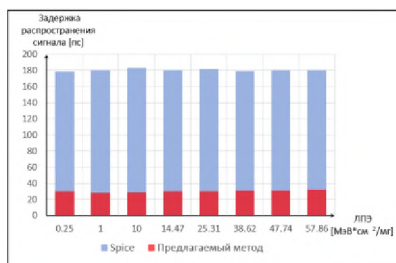


Рис. 8. Результаты оценки быстродействия метода расчета задержек распространения сигнала комбинационных цифровых элементов

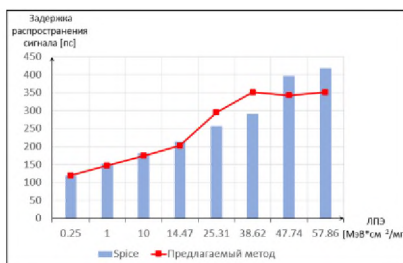


Рис. 9. Результаты оценки точности метода расчета задержек распространения сигнала комбинационных цифровых элементов

2. Метод моделирования временных нарушений в последовательностных цифровых схемах. Данный метод осуществляет моделирование временных нарушений в последовательностных цифровых схемах, поскольку в существующих методах временные деградации, характерные для таких цифровых узлов, не учитываются. Суть предлагаемого метода заключается в создании аналитических моделей времени предустановки, удержания и установки в последовательностных цифровых элементах путем аппроксимации результатов моделирования радиационных эффектов схемотехнического уровня при различных ЛПЭ (рис. 5). Для моделирования нарушений времени предустановки, удержания и установки используются генератор тока на схемотехническом уровне моделирования и уравнение изменения выходного тока транзисторов (1) в зависимости от РИ. Поскольку время предустановки D-триггера (рис. 10) зависит от "INV1", время удержания сигнала от "INV0" и время установки от "TG3", то воздействие радиации на эти компоненты приводит к нарушениям вышеприведенных временных параметров.

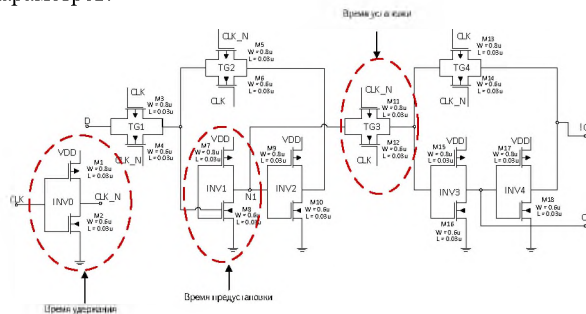


Рис. 10. Схема D-триггера

После соответствующего моделирования временных параметров результаты аппроксимируются для всех случаев ЛПЭ, чтобы вывести аналитические модели временных параметров предустановки (4), удержания (5) и установки (6) D-триггера:

$$T_{пред.} = 0,00147103I_i^2 - 0,000161075\tau_i^2 - 0,214416I_i\tau_i + 0,000547898I_i + 0,0566388\tau_i + 58,8732, \quad (4)$$

$$T_{удер.} = -1,68111I_i^3 - 0,00217031\tau_i^2 - 7,18160I_i^2\tau_i + 0,000408834\tau_i^3 + 0,26448I_i^2 + 4,15321I_i\tau_i - 0,00109745\tau_i^2 + 0,13157I_i - 19,0414\tau_i, \quad (5)$$

$$T_{усл.} = 0,000566985I_i^2 - 0,00118727\tau_i^2 + 0,180444I_i\tau_i - 0,000326101I_i + 0,426327\tau_i + 204,189, \quad (6)$$

где  $T_{пред.}$ ,  $T_{удер.}$ ,  $T_{усл.}$  – временные параметры D-триггера;  $\tau_i$  – длительность радиационного излучения,  $I_i$  – ток, индуцированный одиночной частицей.

Для оценки эффективности предложенного метода и аналитических моделей временных параметров спроектирована комбинационная схема "s27" из серии ISCAS89 (рис. 11).

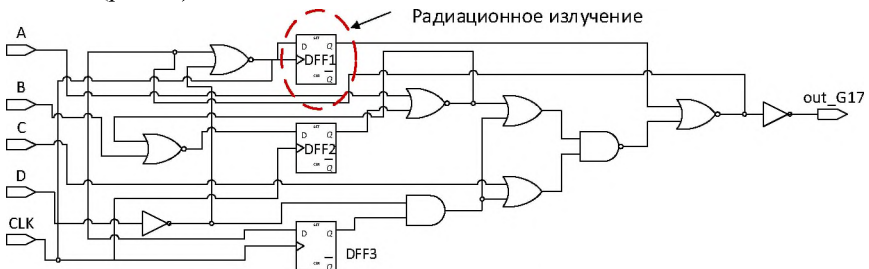


Рис. 11. Моделирование ПИ в схеме S27

Результаты показали, что использование аналитических моделей сокращает время моделирования временных сбоев в процессе проектирования ИС почти в 5...6 раз (рис. 12) за счет потерь точности, не превышающих 7%, 5,6% и 3% соответственно (рис. 13).

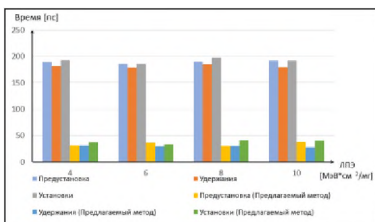


Рис. 12. Результаты оценки быстродействия метода расчета временных параметров в последовательных цифровых элементах

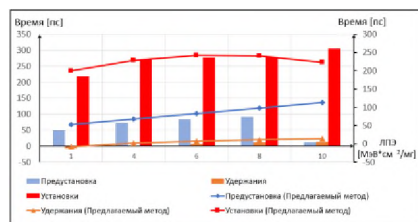


Рис. 13. Результаты оценки точности метода расчета временных параметров в последовательных цифровых элементах

3. Метод моделирования потери данных вследствие радиационного облучения в последовательных цифровых элементах. Предложены Verilog модели для моделирования радиационных нарушений на логическом уровне. Эти модели позволяют моделировать потери данных, вызванные как переключением состояний в последовательных элементах, так и временными нарушениями в комбинационных узлах. Основываясь на том факте, что РИ является случайным явлением, можно моделировать изменения токов в элементах (рис. 14) путем случайной генерации импульсов. Генератор случайных импульсов используется для создания некоторого количества импульсов в течение случайного периода. Другой генератор случайных чисел используется, чтобы имитировать длительность импульсов радиационных воздействий. Для применения сгенерированного импульса выбирается некоторый логический узел из списка логических вентилей.

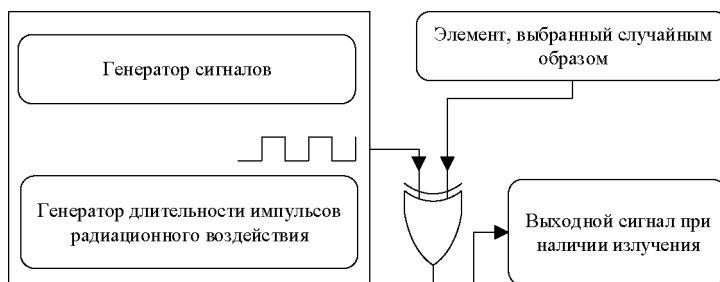


Рис. 14. Модель изменения тока комбинационных элементов после радиационного воздействия

Что касается моделирования потери данных после радиационных эффектов РИС, то в этом случае предлагается модель (рис. 15) для тестирования только последовательных узлов. Из синтезированной схемы выбираются только последовательные узлы, и к выходному сигналу "Q" подсоединяется инвертор, с помощью которого моделируется потеря данных.

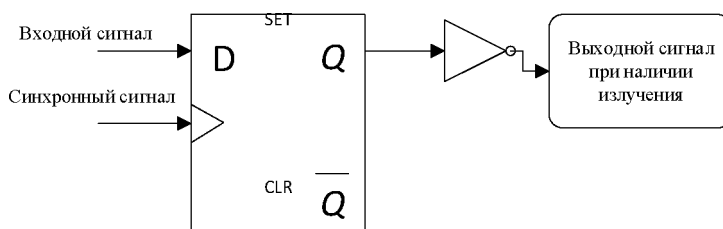


Рис. 15. Модель переключения состояния в последовательных цифровых элементах

Первым шагом метода является логический синтез цифровых ИС, после которого генерируется список соединений логических вентилей (рис. 16).

Сгенерированный список затем моделируется на логическом уровне, и результаты (диаграммы) сохраняются, чтобы в дальнейшем сравнить их с результатами моделирования с учетом радиационных воздействий.

Следующим шагом является поиск модулей и ячеек путем прохождения через список соединений логических вентилей. Такая информация, как экземпляры модуля и узлы, сохраняется в векторах. Результатом поиска является создание векторов по двум типам, содержащих все узлы (7) и цифровые элементы (8):

$$M = (m_1, m_2, \dots, m_i), \quad (7)$$

$$C = (c_1, c_2, \dots, c_i). \quad (8)$$

Здесь  $i$  – число узлов ИС;  $m_1, m_2, m_3$  – векторы всех модулей в списке соединений логических вентилей:

$$m_1 = C_1(c_1, c_2, \dots, c_i) \quad (9)$$

$$m_2 = C_2(c_1, c_2, \dots, c_i) \quad (10)$$

$$m_n = C_n(c_1, c_2, \dots, c_i) \quad (11)$$

где  $n$  – количество элементов в модулях.

Затем в ИС рассчитывается вероятность случайного характера излучения так, чтобы были смоделированы не все элементы, а только те, для которых вероятность воздействия РИ самая высокая.

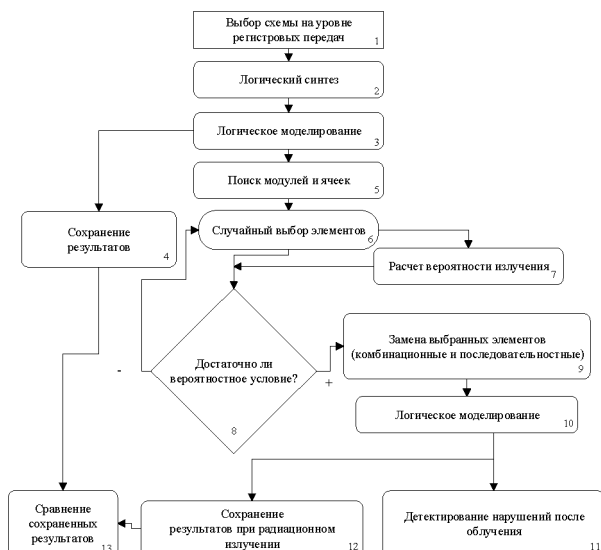


Рис. 16. Последовательность предлагаемых этапов подхода для моделирования потери данных из-за излучения в последовательных цифровых элементах

После выполнения расчета вероятности ячейки с наибольшей вероятностью облучения выбираются из векторов элементов (7) и модулей (8). Выбранные элементы (комбинационные и последовательностные) затем заменяются предлагаемыми моделями РИ (рис. 14, 15). Следующим шагом является повторное моделирование логического уровня, и результаты (диаграммы) сохраняются для сравнения с предыдущими сохраненными результатами. После чего с использованием программного обеспечения "Synopsys Verdi" сравниваются сохраненные результаты (диаграммы), показывающие, в какой момент времени, на каком элементе происходило радиационное излучение, и в каком последовательностном элементе происходила потеря данных (рис. 17).

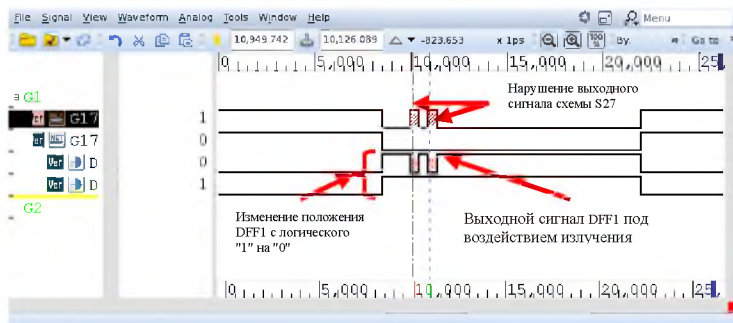


Рис. 17. Сравнение результатов моделирования схемы "S27"

Результаты моделирования системы показывают, что данный метод обеспечивает сокращение в 2...3 раза времени, затрачиваемого на моделирование облучения в процессе проектирования ИС (рис. 18), за счет потерь точности моделирования примерно на 3...4% (рис. 19).

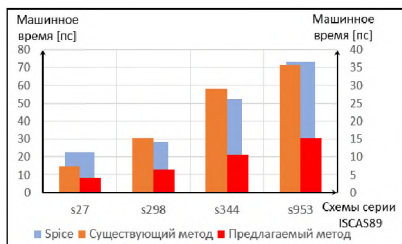


Рис. 18. Результаты оценки быстродействия моделирования потери данных в последовательностных цифровых элементах

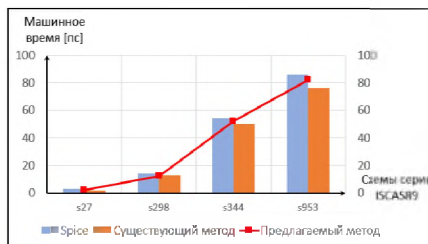


Рис. 19. Результаты оценки точности метода моделирования потери данных в последовательностных цифровых элементах

**В третьей главе** описана структура реализации программного средства разработки радиационно стойких ИС, дана оценка эффективности работы созданной системы.

На основе описанных во второй главе методов, предлагаемых для разработки цифровых ИС, стойких к РИ, было создано ПО "Radiation Effects Simulator (RES)" для автоматизированного проектирования. Благодаря ПО можно моделировать воздействие РИ в цифровой ИС и проектировать стойкие схемы, используя разработанные методы. Учет воздействия РИ и проектирование цифровых схем, стойких к нему, представляют собой сложный и трудоемкий процесс в современных системах моделирования, который обычно выполняется посредством последовательной работы различных программных инструментов. Все это приводит к увеличению времени на проектирование цифровых ИС, стойких к РИ. Реализация предложенных методов с использованием разработанного ПО "RES" осуществляется в рамках одной программы, исключая вышеперечисленные недостатки. ПО "RES" было создано с использованием языков программирования C++, Python и библиотек графического интерфейса QT и предназначено для операционной системы Linux. Для удобства проектировщика в ПО предусмотрен графический интерфейс (рис. 20), который создает возможность управления всеми существующими системами и подсистемами. Он позволяет осуществлять удобный ввод входных данных для цифровых стандартных библиотек и технологических процессов, а также обеспечивает доступ к анализу выходных данных и их выводу. Кроме того, для обеспечения совместимости с другими системами моделирования в процессе проектирования предоставляется интерфейс командной строки, который дает возможность проектировщику "вызывать" все функциональные действия, существующие в графическом интерфейсе, по мере необходимости.

Основное окно разработанного ПО (рис. 20) состоит из функциональной и информационной областей, где в соответствующем разделе отражается вся информация о результатах и ошибках в процессе симуляции. После завершения моделирования вся информация сохраняется для дальнейшего анализа, а результаты отображаются в графическом окне симуляционных результатов (рис. 21), где можно выбрать нарушения, которые произошли в результате РИ в соответствии с моментом воздействия.

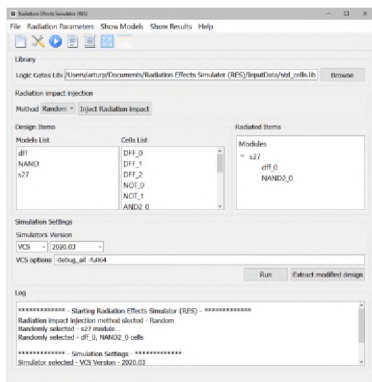


Рис. 20. Основное окно ПО "RES"

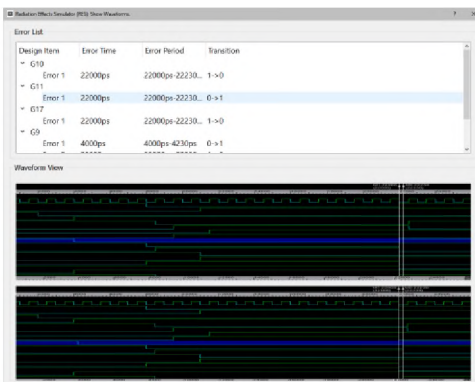


Рис. 21. Окно результатов логического моделирования

Для оценки эффективности разработанного ПО "RES" было осуществлено моделирование различных цифровых схем серии ISCAS89. Результаты моделирования предложенного ПО "RES" были сопоставлены с результатами моделирования РИ посредством последовательной работы различных программных инструментов (см. табл.). Как видно из таблицы, при использовании ПО "RES" время, затрачиваемое на моделирование РИ в процессе проектирования ИС, сократилось, как минимум, в 6 раз в комбинационных элементах, в 5 раз - в последовательных цифровых элементах, а также в 5...6 раз – в узлах хранения данных при средней потере точности моделирования 9,25%.

Таблица

*Сравнение быстродействия моделирования РИ с использованием предложенного ПО "RES" и посредством последовательной работы различных программных инструментов*

Метод проектирования Параметры	Моделирование РИ через последовательную работу различных программных инструментов (с)				Моделирование с использованием ПО "RES" (с)			
	s27	s298	s510	s38584	s27	s298	s510	s38584
Цифровые схемы серии ISCAS89								
Количество элементов	8	75	179	11448	8	75	179	11448
Задержка распространения сигнала при переходе выходного сигнала от "1" к "0"	58,7	131,3	271,4	426,4	9,8	22,3	45,2	71,1
Задержка распространения сигнала при переходе выходного напряжения от "0" к "1"	61,8	128,4	293,94	422,4	10,3	21,4	49,32	70,4
Время предустановки	11,9	69	167,15	343,3	2,5	13,8	33,23	68,8
Время удержания	6,9	76,1	163,6	317,7	1,4	15,2	32,6	63,8
Время установки	6,5	62,5	158	328,7	1,3	12,5	31,6	65,8
Потери данных	10,5	21,65	60,96	112	2,1	4,33	10,16	22,4



## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Разработаны принципы повышения стойкости цифровых ИС к радиационному облучению, позволяющие значительно снизить длительность процесса проектирования радиационно стойких схем [1–7].
2. Предложен метод расчета задержек комбинационных цифровых элементов, учитывающих воздействие радиационного облучения, который благодаря аналитическим моделям задержки распространения сигнала обеспечивает почти 6-кратное сокращение продолжительности моделирования излучения в процессе проектирования ИС за счет максимальной потери точности моделирования, не превышающей 9% [2].
3. Разработан метод расчета нарушений времени предустановки, удержания и установки в последовательностных цифровых элементах, который благодаря использованию аналитических моделей сокращает время моделирования сбоя в процессе проектирования ИС почти в 5...6 раз за счет потерь точности, не превышающих 7%, 5,6% и 3% соответственно [3].
4. Предложен метод моделирования потери данных из-за радиационного излучения в последовательностных цифровых элементах, который благодаря моделям временных нарушений и переключению состояний последовательностных элементов обеспечивает сокращение времени, затрачиваемого на моделирование облучения в процессе проектирования ИС, в 2...3 раза за счет потери точности примерно на 3...4% [4].
5. Предложенные в диссертации принципы и методы были реализованы в программном обеспечении Radiation Effects Simulator (RES), разработанном для проектирования повышения стойкости цифровых ИС к радиационному облучению. ПО внедрено в ЗАО "Синопсис Армения" и используется в процессе проектирования цифровых ИС, стойких к радиационному излучению. Тестирование показало, что время, затрачиваемое на моделирование излучения в процессе проектирования ИС, сократилось, как минимум, в 6 раз в комбинационных элементах, в 5 раз - в последовательностных цифровых элементах, в 5...6 раз - в цепях хранения данных при средней потере точности моделирования около 9,25% [2–4,7].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Melikyan V., Petrosyan A., Mkhitarian A., Hayrapetyan A.K., Avetisyan Z., Mkrtchyan A.E. The Single Event Upset Forecasting in Digital and Analog Integrated Circuits in SAED 14nm FinFet Technology // Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development. – Moscow, Russia, 2018. – P. 76–81.
2. Petrosyan A.A., Petrosyan G.A. A model for calculating the propagation delay of digital elements considering the radiation impact // Proc. of the RA NAS and NPUA. Ser. of Tech. Sc. – Yerevan, 2019. – Vol. 72, No. 2. – P. 253–263.
3. Petrosyan A. Timing evaluation model for D flip-flops considering radiation effect // Proc. of the RA NAS and NPUA. Ser. of Tech. Sc. – Yerevan, 2020. – Vol. 73, No. 1. – P. 62-72.
4. Petrosyan A. Radiation impact modelling method for gate level design verification // Proceedings of the 8th Small Systems Simulation Symposium. – Niš, Serbia, 2020. – P. 27–30.
5. Melikyan V.S., Mkhitarian A.K., Hayrapetyan A.K., Avetisyan Z.M., Petrosyan A.A., Melikyan S.V. High Overshoot Correction Method in Voltage Regulators // IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kiev, Ukraine, 2018. – P. 130–133.
6. Melikyan V.S., Mkhitarian A.K., Gegham P., Lilit G., Petrosyan A.A., Musayelyan R.H., Aghababyan V.A. The Overshoot Reducing Method In Voltage Regulators In SAED 14nm FinFet Technology // IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv, Ukraine, 2019. – P. 106–109.
7. Janpoladov V.A., Petrosyan A.A., Abazyan S.S., Margaryan H.V. Random faults injection and simulation in auto-correction circuits // Proc. of the RA NAS and NPUA. Ser. of Tech. Sc. – Yerevan, 2020. – Vol. 73, No. 2. – P. 170-179.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից թվային ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) արտադրման տեխնոլոգիաների շարունակական զարգացումը հնարավոր է դարձրել ապահովել դրանց կազմում ընդգրկված տրանզիստորների երկրաչափական չափերի անընդհատ փոքրացումը: Սակայն ներկայումս թվային ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում անհրաժեշտ է հաշվի առնել նաև ռադիացիոն ճառագայթման (ՌՃ) ազդեցությունների հետևանքները: Պատճառն այն է, որ բարձր ինտեգրման աստիճան ունեցող ԻՍ-երի կիրառությունը տարբեր միջավայրերում դարձել է առավել ռիսկային, քանի որ տարրերի խտության աճին զուգընթաց՝ աճում են նաև ճառագայթման ազդեցությունների հետևանքով սխեմաների ժամանակային և ֆունկցիոնալ խախտումները: Այսպիսի ռիսկային խնդիրներից խուսափելու նպատակով անհրաժեշտ է կիրառել ՌՃ նկատմամբ կայունության բարձրացման եղանակներ:

Ճառագայթման ազդեցությունների հետևանքով թվային ԻՍ-ում առաջացած խախտումների նկատմամբ կայունության բարձրացման նպատակով վերջին տարիներին մշակվել են տարբեր մոտեցումներ և մեթոդներ՝ հիմնված սխեմատեխնիկական լուծումների վրա: Սակայն թվային սխեմաների կայունության բարձրացումը էապես կախված է նաև ճառագայթման պատճառով ի հայտ եկած խախտումների գնահատումից և դրանց մոդելավորման արագագործ ու ճշգրիտ մեթոդներից: Ժամանակային խախտումների մոդելավորման և դրանց ազդեցությունների գնահատման առկա մեթոդները, հիմնված լինելով բարդ անալիտիկ մոդելների վրա, չեն ապահովում պահանջվող արագագործությունը: Բացի դրանից, այդ մոդելների օգտագործմամբ հետադարձ կապով թվային տարրերին բնորոշ ժամանակային խախտումների մոդելավորումը կատարվում է ի հաշիվ ճշտության մեծ կորուստների: Ինչ վերաբերում է վիճակների փոխանջատման հետևանքով առաջացած տվյալների կորստի մոդելավորմանը, ապա դրանց ուղղված առկա մեթոդների կիրառումը նույնպես չի ապահովում պահանջվող արագագործությունը և արդյունավետությունը, քանի որ մի կողմից՝ դրանք հիմնված են թվային գրադարանների բոլոր բջիջներում նոր տարրերի ավելացման վրա, իսկ մյուս կողմից՝ հաշվի չեն առնում ժամանակային խախտումներով պայմանավորված տվյալների կորուստները:

Հայտնի է, որ թվային ԻՍ-երի տրամաբանական մոդելավորման մակարդակում ճառագայթման նկատմամբ կայուն թվային ԻՍ-երի նախագծման և մոդելավորման մեթոդների մշակումը առավել արդյունավետ է: Պատճառն այն է, որ այդ մակարդակում նախագծման գործընթացի վրա ծախսված ժամանակը ավելի փոքր է՝ համեմատած այլ մակարդակներում մոդելավորման միջոցների կիրառման հետ: Այդ հիմնավորմամբ՝ ատենախոսությունը նվիրված է թվային ԻՍ-երի տրամաբանական

նմանակման մակարդակում ՌՃ ազդեցությունների հետևանքների գնահատման, դրանց մոդելավորման մեթոդների ու ծրագրային միջոցի մշակմանը: Այդպիսի մեթոդների և ծրագրային միջոցի մշակումը հնարավորություն կընձեռի՝ իրականացնելու ՌՃ նկատմամբ կայուն թվային ԻՍ-երի նախագծումը՝ ապահովելով նշված գործընթացի արդյունավետությունը:

Մշակվել են ՌՃ նկատմամբ թվային ԻՍ-երի կայունության բարձրացմանն ուղղված սկզբունքներ: Այդ սկզբունքները թույլ կտան էապես նվազեցնել ռադիացիոն կայուն սխեմաների նախագծման գործընթացի տևողությունը [1-7]:

Առաջարկվել է ՌՃ ազդեցությունը հաշվի առնող համակցական թվային տարրերի հապաղումների հաշվարկման միջոց, որը տարածման հապաղման անալիտիկ մոդելների շնորհիվ՝ ապահովում է ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում ճառագայթման մոդելավորման տևողության մոտ 6 անգամ կրճատում՝ 9%-ը չգերազանցող նմանակման ճշտության կորստի հաշվին [2]:

Մշակվել է հետադարձ կապով թվային տարրերում տեղակայման, պահպանման և հապաղման ժամանակների խախտումների հաշվարկման մեթոդ, որը անալիտիկ մոդելների կիրառման շնորհիվ՝ մոտ 5-6 անգամ կրճատում է ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում նշված խախտումների մոդելավորման տևողությունը՝ ի հաշիվ ճշտության համապատասխանաբար 7%-ը, 5,6%-ը և 3%-ը չգերազանցող կորստի [3]:

Առաջարկվել է հետադարձ կապով թվային տարրերում ՌՃ հետևանքով տվյալների կորստի մոդելավորման մեթոդ: Այդ մեթոդը փականային մակարդակի նկարագրությունում, ժամանակային խախտումների և վիճակների փոխանջատման մոդելների կիրառման շնորհիվ, ապահովում է ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում ճառագայթման մոդելավորման վրա ծախսվող ժամանակի կրճատում 2-3 անգամ՝ ի հաշիվ մոտ 3-4% ճշտության կորստի [4]:

Ատենախոսությունում առաջարկվող սկզբունքները և մեթոդներն իրականացվել են թվային ԻՍ-երի՝ ՌՃ նկատմամբ կայունության բարձրացման նախագծման համար մշակված Radiation Effects Simulator (RES) ծրագրային միջոցում: Այն ներդրված է «Սինոփիս Արմենիա» ՓԲԸ-ում և օգտագործվում է ՌՃ նկատմամբ կայուն թվային ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում: Ծրագրային միջոցի փորձարկումները ցույց են տվել, որ ԻՍ-երի նախագծման գործընթացում ճառագայթման մոդելավորման վրա ծախսվող ժամանակը կրճատվել է, համակցական տարրերում առնվազն՝ 6 անգամ, հետադարձ կապով թվային շղթաներում՝ 5 անգամ, իսկ տվյալների պահպանման շղթաներում՝ 5-6 անգամ, միջինում ունենալով նմանակման մոտ 9,25% ճշտության կորուստ [2-4,7]:

**DEVELOPMENT OF DESIGN METHODES FOR RAD-HARD DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS**

**SUMMARY**

The continuous development of fabrication technologies of modern digital integrated circuits (IC) has led to a remarkable improvement of ICs in terms of performance and functionality. As a result of the mentioned development, currently, it is necessary to take into account the effects of radiation exposure in the design process of digital IC because with the increase of the density of elements ICs become more sensitive to radiation impact in various environments. The radiation impact results in issues such as timing violations and functional errors of digital elements. In order to avoid such issues, it is necessary to use methods to increase the resilience of ICs to radiation exposure.

In recent years, based on schematic solutions, various methods to increase digital ICs resistance to radiation exposure have been developed. However, the increase in the stability of digital circuits also depends on radiation-induced errors evaluation, as well as rapid and accurate modeling methods of radiation effects. Based on complex analytical models, the existing methods for timing violation modeling and radiation impact evaluation do not provide the required performance in terms of speed. In addition, the modeling of timing violations, typical to sequential digital elements with the usage of these models, is done with large accuracy loss. As for data-loss modeling, the usage of existing methods does not provide the required speed and efficiency, as on one hand, they are based on adding new elements to all cells in digital libraries, and on the other hand, they do not take into account data loss as a result of timing violations. It is well known that the development of methods for designing and modeling stable digital radiation-resistant ICs is more effective at the logic level. The reason is that the time spent on the design process at this level is shorter than in case of other modeling levels. For this reason, the dissertation is devoted to the analysis of the effects of radiation at the logic level modeling of digital ICs and the development of radiation modeling and simulation methods. The development of such methods and technics will ensure the design and manufacturing of radiation-resistant digital ICs and provide high efficiency of the mentioned process.

The principles for the development of radiation-resistant digital ICs have been proposed. These principles will allow to significantly increase the performance of the design and development of the radiation-resistant IC in terms of modeling speed and accuracy [1–7].

A method for calculating the propagation delay of combinational elements considering the radiation impact has been developed, which, thanks to usage of the analytical models, provides about 6 times reduction in radiation modeling duration, at the expense of simulation accuracy loss, which does not exceed 9% [2].

A method has been developed for calculating setup, hold, clock to output pin timing violations of sequential elements, which reduces time spent on the modeling of the timing issues in the design process of ICs by 5-6 times due to the use of analytical models, at the expense of accuracy loss not exceeding 7%, 5.6% and 3% respectively [3].

A method is proposed for modeling data loss due to radiation impact in sequential elements. Thanks to the timing violation and upset models, this method, provides from 2 to 3 times reduction in the time spent on radiation modeling in the process of designing ICs at the expense of accuracy by about 3–4% [4].

Based on the principles and methods developed in the dissertation, Radiation Effects Simulator (RES) software tool was designed to increase the performance of analysis and modeling of radiation impact on digital circuits. The developed software is applied at Synopsys Armenia CJSC in the process of designing radiation-resistant ICs. Testing shows that with use of developed software tool, the time spent on radiation modeling has been reduced at least 6 times in combinational elements, 5 times in sequential circuits, and from 5 to 6 times in storage cells, with approximately 9,25% average simulation accuracy loss [2–4,7].

