



Средства разработки систем-на-кристалле для космических применений

Денис Адамов (Москва)

Разработка и проектирование бортового оборудования космических комплексов и систем требует создания специализированной элементной базы в части СБИС, систем-на-кристалле и видеосистем на кристалле, стойких к дестабилизирующим факторам космического пространства, в первую очередь, ионизирующего излучения. Для расчёта радиационной стойкости электронных компонентов и определения технически обоснованных норм испытаний требуются специальные средства САПР. Такие средства входят в отечественную САПР СИМИКА, описанию которой посвящена данная статья.

ВВЕДЕНИЕ

Современная экономическая и политическая ситуация требует от отечественных разработчиков аппаратуры использовать в разработках преимущественно отечественную элементную базу. Однако её выбор для применения в бортовой аппаратуре космических комплексов и систем ограничен. Это связано как с общим уровнем развития российской электронной промышленности, так и со сложностями в реализации государственной программы импортозамещения.

Одним из основных факторов расширения производства и использования современной радиоэлектронной аппаратуры является динамичный научно-технический и производственный процесс развития радиоэлектронных технологий и организация выпуска необходимых электронных и радиоэлектронных компонентов. Создание специализированной электронной компонентной базы (ЭКБ) для работы в космическом пространстве подразумевает выполнение специфических требований. Разработка оборудования для оптико-электронных комплексов и систем требует создания развитой элементной базы в виде СБИС, систем-на-кристалле и видеосистем на кристалле, действующих в жёстких условиях космического пространства. Требования к радиационной стойкости отражено в Федеральной целевой программе «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники».

Решение этой задачи возможно через развитие всей инфраструктуры разработки современной ЭКБ:

- предоставление отечественным дизайн-центрам возможностей изготовления опытных образцов;

- доступность отечественных полнофункциональных средств САПР;
- создание единой базы для разработчиков по отечественным квалифицированным микросхемам.

Выбор САПР для разработки интегральных схем

САПР является ключевым элементом при проектировании интегральных схем (ИС). Это высокоинтеллектуальный «станок», который должен обеспечить полный процесс разработки, начиная от замысла и заканчивая выводом топологии ИС для передачи на фабрику изготовителя кристаллов. Большинство пользователей слабо представляют внутреннее устройство САПР, но они чётко знают, что хотят от неё получить. Современные методы и способы автоматизированного проектирования настолько сложны, что профессиональное освоение возможностей системы может занимать от двух до пяти лет. Зачастую даже профессиональные пользователи с многолетним стажем не знают до конца всех возможностей САПР, с которой они работают. Быть интуитивно понятной и обеспечивать быстрое и без «лишних» вопросов создание законченных устройств с предельными характеристиками – это одна из основных задач современных САПР ИС.

САПР должна учитывать все аспекты создания изделия: физику функционирования, математические методы моделирования, различные методики проектирования, графические интерфейсы и т.д. Создание отечественной САПР, как и любого штучного высокотехнологичного станка, является основой технологической безопасности стра-

ны и демонстрирует высокий уровень российских инженеров.

Российская микро- и наноэлектроника не играет существенной роли на мировом рынке электронных компонентов, да и рынок средств проектирования крайне незначителен. Рынок услуг по проектированию ИС является высоко рискованным, а также требует значительных капиталовложений. В силу своей специфики, на этом рынке в России практически отсутствуют малые и средние дизайн-центры, а те центры, которые были организованы в рамках различных федеральных целевых программ, комплектовались САПР централизованно. При таком подходе учесть требования каждого конкретного создаваемого дизайн-центра невозможно. Соответственно, для таких дизайн-центров была выбрана одна из крупных зарубежных САПР, являющаяся «индустриальным стандартом», которая включает в себя все необходимые инструменты. Понятно, что такой подход к приобретению САПР далёк от рыночных отношений, поскольку применительно к каждой конкретной задаче разработчик сам должен выбирать наиболее производительный, удовлетворяющий заданным требованиям и доступный по бюджету инструмент.

На зарубежном рынке основными потребителями крупных САПР являются большие корпорации, которые обеспечивают до 80% продаж. Малый и средний бизнес обычно вынужден приобретать минимальный пакет САПР от крупного поставщика, что обусловлено необходимостью использовать PDK (Process Design Kit – комплект разработчика) от фабрики-производителя кристалла. Все оставшиеся рабочие места небольших дизайн-центров, как правило, оборудуются более дешёвыми или даже бесплатными инструментами, поставляемыми по лицензиям типа GPL (General Public License).

Выбор фабрикой в качестве основного САПР для разработки PDK какого-либо крупного зарубежного производителя автоматически заставляет всех клиентов этой фабрики использовать данную САПР. Стоимость одного рабочего места разработчика в этом



ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ



Единый Центр Закупки и Сертификации АО «ЭХО» осуществляет снабжение предприятий ракетно-космической промышленности надежными электрорадиоизделиями иностранного и отечественного производства, сырьем, материалами, оборудованием и другими материальными ценностями. Главная задача АО «ЭХО» – полное и своевременное обеспечение потребностей заказчиков качественной продукцией в рамках законодательства Российской Федерации. Компания открыта к сотрудничеству со всеми заинтересованными сторонами.



случае начинается от нескольких сотен тысяч долларов и может превышать один миллион долларов. Приобрести такие лицензии в российских условиях могут только крупные компании, которые практически все работают на государственный заказ. Мелкие и средние компании будут вынуждены пользоваться серыми лицензиями на ПО.

Значительную долю прибыли компаний, поставляющих САПР, составляют дополнительные услуги по обслуживанию и настройке программного обеспечения, выпуск на заказ инструментов, учитывающих специфические требования заказчика, разработка IP-блоков и др. Фактически данный сервис является не дополнительным, а необходимым для любого поставщика САПР.

При развитии отечественной САПР ИС необходимо учитывать её инфраструктурный характер. САПР ИС – это дорогостоящий инструмент, который используют не конечные потребители, а разработчики ИС. Для того чтобы в России возник рынок САПР ИС, сначала должен возникнуть рынок услуг по разработке ИС. Начинать развивать отечественную САПР ИС тогда, когда САПР уже будет востребован, будет явно поздно, поскольку создание конкурентного продукта потребует до 10 лет даже при наличии высококвалифицированных разработчиков с опытом. К сожалению, ни один из известных нам способов государственной поддержки инновационных проектов в России не годится для инфраструктурных проектов.

В силу специфичности рынка, практически все крупные и средние компании-разработчики САПР ИС находятся в США. Возможно, это связано с законопослушностью разработчиков, трудящихся в этой стране, поскольку они всё время должны выбирать лучший продукт по соотношению цена-качество. Или же это связано с тем, что уже на начальном этапе формирования рынка в США компаниям-разработчикам САПР ИС обеспечивалась серьёзная поддержка в виде государственного заказа. В настоящее время самые передовые разработки в этой области попали под экспортные ограничения. Также ограничен доступ российских разработчиков и к передовым микроэлектронным технологиям.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

При уменьшении топологических размеров элементов ИС (менее 100 нм)

микроэлектроника постепенно переходит в наноэлектронику. Одной из принципиальных особенностей наноэлектроники является учёт квантовых эффектов, которые могут иметь паразитное влияние на работу активного прибора, или даже работа самого прибора может строиться на основе квантовых эффектов.

Возможность применения SPICE-моделирования (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) для разработки наносхем подтверждается успешной разработкой моделей перспективных полупроводниковых нанозаполнителей. В основе таких моделей лежат алгоритмы решения систем нелинейных дифференциальных уравнений. Так, например, уже существуют SPICE-модели для одноэлектронных транзисторов и нанотранзисторов на углеродных нанотрубках. С другой стороны, при изготовлении полупроводниковых наносхем возникает необходимость учёта большого количества специфичных для каждого производства технологических особенностей, не обязательно квантовых. Ведущие мировые компании-производители ИС, такие как TSMC (Тайвань), предоставляют специальный программный комплект, позволяющий учитывать технологические особенности в моделях нанозаполнителей для программ SPICE-моделирования – iSDK (interoperable SPICE Design Kit). Этот программный комплект позволяет учесть особенности изготовления 65 и 40 нм ИС.

С другой стороны, с увеличением степени интеграции создаваемых СБИС, с объединением на кристалле различных функциональных блоков, зачастую выполненных по различным технологическим процессам, от разработчика требуется предварительное моделирование всей системы на транзисторном уровне. Огромный объём вычислений не позволяет «в лоб» провести моделирование переходных процессов в таких системах-на-кристалле и требует использования специальных методов эффективного распараллеливания вычислений для использования возможностей многопроцессорной архитектуры суперкомпьютеров.

Наиболее показательными с этой точки зрения являются видеосистемы на кристалле, которые объединяют фотоприёмный массив пикселей, выполненный по технологии 180–90 нм, и контроллеры с напряжениями питания 1,8–1,3 В. Эти параметры

являются критическими для обеспечения приемлемого качества видеoinформации, в особенности реализации аналого-цифрового преобразования с достаточным динамическим диапазоном. В то же время расположенные рядом схемы обработки изображения, сжатия видеопотока и формирования выходных сигналов могут быть изготовлены в рамках процессов с более низкими проектными нормами и напряжениями питания. При этом необходимо учитывать взаимное влияние таких подсистем как на тепловом уровне, так и на электромагнитном – по цепям земли и питания, а также через подложку кристалла.

Данный пример ещё раз показывает, что развитие передовых методов изготовления и проектирования электронных схем идёт одновременно с совершенствованием средств автоматизированного проектирования. И одно без другого невозможно. В условиях отсутствия доступа к исходным программным кодам и квалифицированной поддержке разработчиков САПР ИС Россия обречена бесконечно долго повторять зарубежные разработки с отставанием на десятилетия.

Ещё одним немаловажным аргументом за необходимость развивать и использовать отечественную САПР ИС является обеспечение технологической безопасности. В рамках стратегии закупки зарубежных средств проектирования нельзя гарантировать отсутствие утечки проектной информации. Известны случаи, когда средства проектирования скрытно собирали такую информацию в процессе работы в целях отладки и совершенствования САПР самими разработчиками. Также, в этом случае, не может идти речь и о безопасном хранении кодов моделей элементов специального назначения, например, с учётом ионизирующего воздействия, поскольку все такие коды пишутся на открытых высокоуровневых языках описания поведения модели.

САПР ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СИМИКА

История разработки отечественной САПР для создания современных СБИС отмечена интересными вехами на протяжении последних 35 лет. Одним из первых интересных решений был комплект программного обеспечения КИПАРИС, созданный на кафедре проектирования и конструирования

ния интегральных схем Московского института электронной техники в конце 1970-х гг. В начале 2000-х гг. в российском дизайн-центре ООО «Юник Ай Сиз» была создана САПР АВОКАД, которая предложила набор инструментов, обеспечивающий замкнутый цикл для разработки аналого-цифровых ИС, в том числе с распараллеливанием вычислений на платформе суперкомпьютеров. ООО «Интегральные решения» в 2011 г. показало вариант дальнейшего развития этого направления САПР, способного интегрировать в своей структуре необходимые элементы, ставшие индустриальным стандартом при разработке современных СБИС и систем-на-кристалле [1].

В настоящее время система СИМИКА обеспечивает весь процесс проектирования аналоговых схем с возможностью проектирования смешанных аналого-цифровых схем (см. рис. 1).

Проект в СИМИКА создаётся в подсистеме SIMCapture и имеет знакомую для разработчика ИС архитектуру: библиотека-ячейка-вид. Такая структура позволяет организовать смешанный проект прозрачным образом, когда разработчик в любой момент может заменить одно представление элемента на другое. SIMCapture является полнофункциональным редактором электронных схем с полным набором инструментов для построения сложных проектов (см. рис. 2).

Одним из основных достоинств системы СИМИКА является подсистема схмотехнического моделирования SIMSpice, которая предназначена для быстрого и точного аналогового (SPICE) моделирования и разработана специально для использования в процессе проектирования сверхбольших интегральных схем. SIMSpice относится к классу программ Fast-SPICE (быстрый и точный симулятор). Благодаря применению оригинальных математических методов SIMSpice обеспечивает более высокую скорость моделирования при сохранении заданной точности.

Отличие существующих программ быстрого и неточного моделирования смешанных схем, построенных на событийных алгоритмах, от программ класса Fast-SPICE можно продемонстрировать на примере результатов моделирования схемы 10-битного аналого-цифрового преобразователя АЦП-10 (см. рис. 3).

Видно, что результаты моделирования существенно различаются для

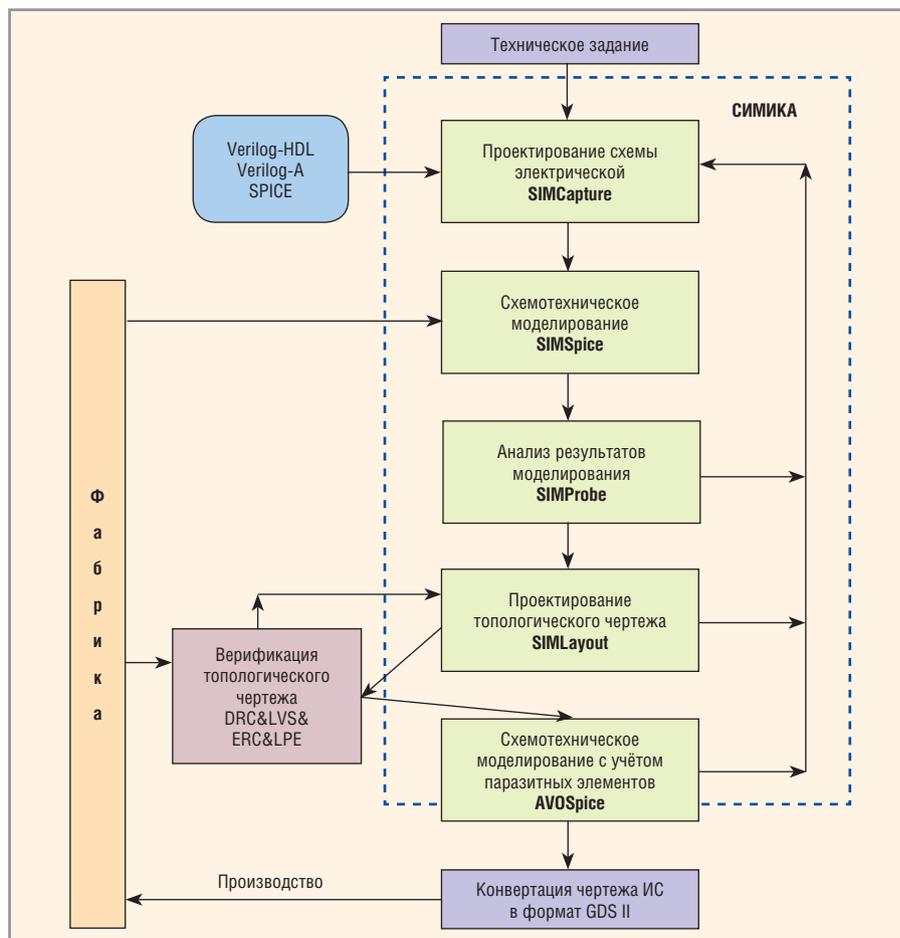


Рис. 1. Процесс проектирования аналоговых и цифроаналоговых ИС в САПР СИМИКА

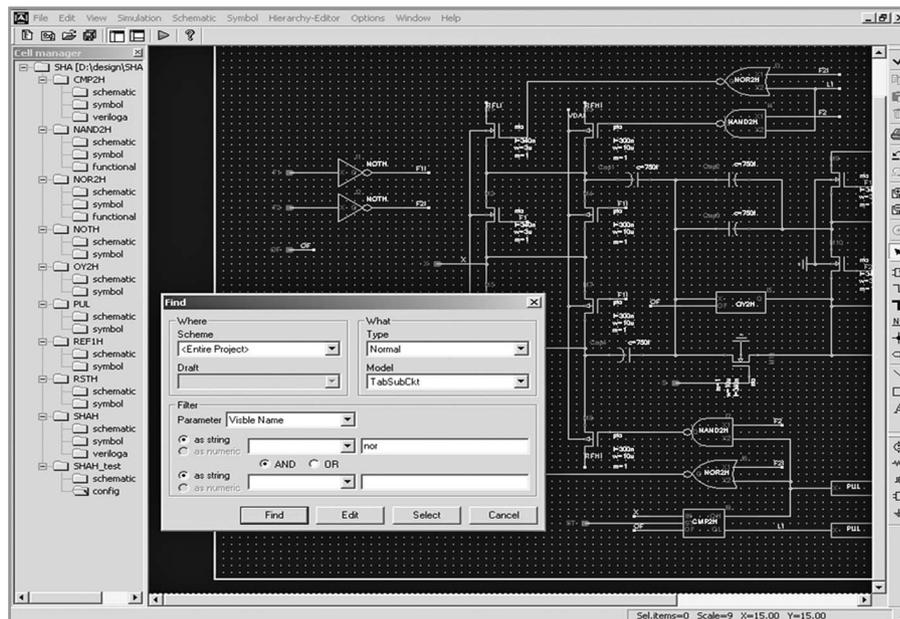


Рис. 2. Схмотехнический редактор SIMCapture

режима по умолчанию (нелинейная цифровая модель), аналогового режима (аналоговая модель с постоянными конденсаторами) и режима без ускорения (точная SPICE-модель). Причём правильный результат достигается именно при моделировании в режиме без ускорения, когда скорость моделирования соответствует классическим SPICE-

программам. В отличие от быстрых и неточных программ, программы класса Fast-SPICE гарантируют правильный результат при моделировании аналоговых схем. Скорость моделирования в программах Fast-SPICE зависит от особенности строения электронной схемы и, как правило, в разы выше, чем в классических SPICE-симуляторах.

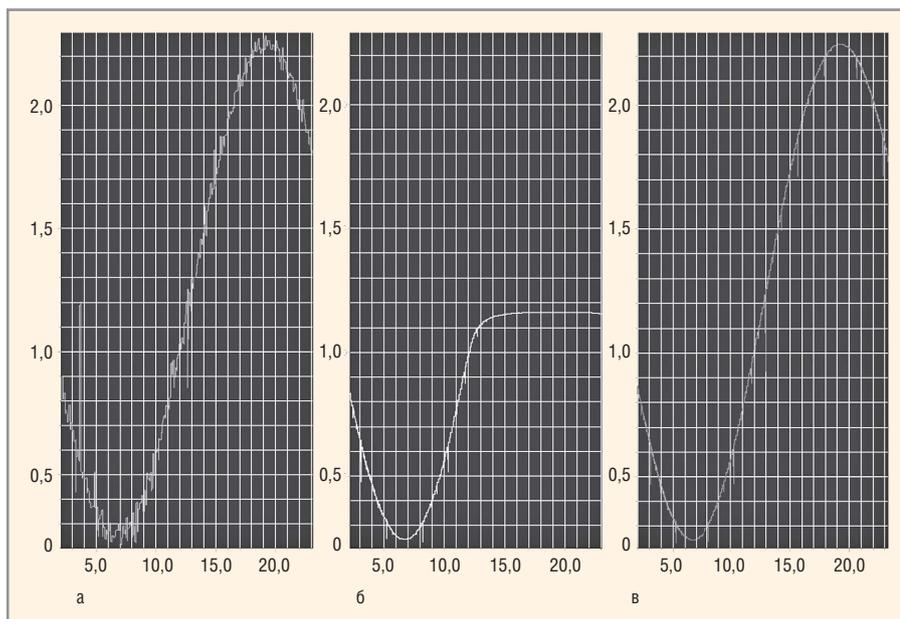


Рис. 3. Результаты моделирования схемы АЦП 10 для различных моделей точности:
 а – нелинейная цифровая модель; б – аналоговая модель с постоянными конденсаторами;
 в – точная SPICE-модель

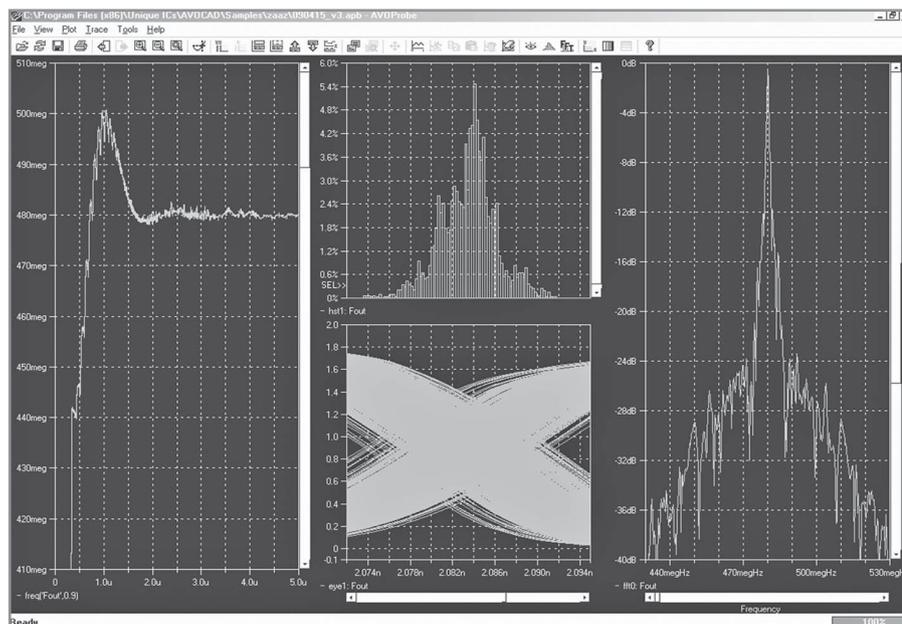


Рис. 4. Обработка результатов моделирования в программе SIMProbe

Для визуализации и анализа полученных результатов моделирования в рамках системы СИМИКА была разработана программа SIMProbe.

Поскольку при моделировании электронных схем сверхбольшой степени интеграции результаты могут занимать десятки гигабайт, при разработке SIMProbe много внимания было уделено скорости работы с данными и их последующей обработке. Также в SIMProbe предусмотрено более 50 различных функций обработки аналогового сигнала, включая быстрое преобразование Фурье, индикаторные (EYE) диаграммы, гистограммы и другие виды анализа (см. рис. 4).

Для обеспечения моделирования смешанных аналого-цифровых систем на кристалле большой размерности за приемлемое для разработчиков время СИМИКА предоставляет возможность так называемого смешанного моделирования, когда, например, цифровые подсистемы могут быть описаны на языке логического моделирования Verilog, а аналоговые подсистемы представлены на транзисторном уровне или описаны на языке Verilog-A. Также в СИМИКА встроена поддержка разных вариантов представления подсхем и СФ-блоков, автоматическое формирование интерфейса между цифровой и аналоговой частями схемы и под-

держка совместной работы цифрового и аналогового симуляторов.

В комплексе это обеспечивает существенное сокращение времени моделирования и позволяет проводить верификацию проектов большого объёма, моделирование которых на транзисторном уровне практически невозможно. Так, например, замена аналоговых функциональных блоков кристалла фотоприёмника со схемой обработки моделями на языке Verilog-A и описание цифровой части на языке Verilog позволило сократить время моделирования почти на два порядка. Это, в свою очередь, позволило проводить верификацию всего кристалла на всех этапах его оптимизации и доводки.

Такой подход позволяет реализовать методологию проектирования «сверху вниз», когда сначала отдельные блоки системы описываются на языке высокого уровня, отлаживается работа системы с нужными характеристиками в целом, а затем проводится реализация отдельных блоков на транзисторном уровне, что сокращает сроки и повышает надёжность проектирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИС ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящее время технические требования, предъявляемые к аппаратуре систем управления и контроля различного назначения (ракетно-космической и военной техники, связи и энергетики, а также научной аппаратуре), определяют возможность их эксплуатации в условиях воздействия ионизирующих излучений. Выделяют два типа ионизирующих излучений: стационарные и импульсные. Среди радиационных факторов естественного и искусственного происхождения наибольшим поражающим действием по отношению к микроэлектронной элементной базе аппаратуры (по энергетическому критерию) обладает импульсное ионизирующее излучение. В ряде случаев достаточно учитывать воздействие постоянного ионизирующего излучения.

Задача проектирования радиационно-стойких схем требует использования специализированных методов и программ моделирования, учитывающих поведение схем при воздействии ионизирующего излучения. Доступные импортные САПР позволяют оценить

влияние стационарного ионизирующего излучения только косвенным образом, через процедуру подгонки параметров транзисторов под экспериментальные данные. Однако, как отмечают сами разработчики, этого часто бывает недостаточно, поскольку, получив отрицательный результат, разработчик не находит ответа на вопрос «Как модифицировать схему, чтобы соответствовать требованиям?». В результате процесс проектирования, по существу, является методом проб и ошибок, который тянется годами. Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время в России не применяются полноценные современные средства моделирования поведения ИС с учётом ионизирующих излучений. Доступные в России зарубежные САПР ИС общего назначения не обладают инструментами для схемотехнического моделирования радиационных эффектов. Такие средства разрабатываются специализированными фирмами и не предназначены для продажи или попадают под санкции.

Для полноценного развёртывания работ по созданию системы схемотехнического моделирования нано- и микросхем с учётом действия дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФКП), в том числе и ионизирующих излучений, необходим доступ к исходным кодам программы моделирования. САПР СИМИКА может служить основой для развёртывания таких работ.

Проведённые в инициативном порядке эксперименты по встраиванию в модель МОП-транзистора все-

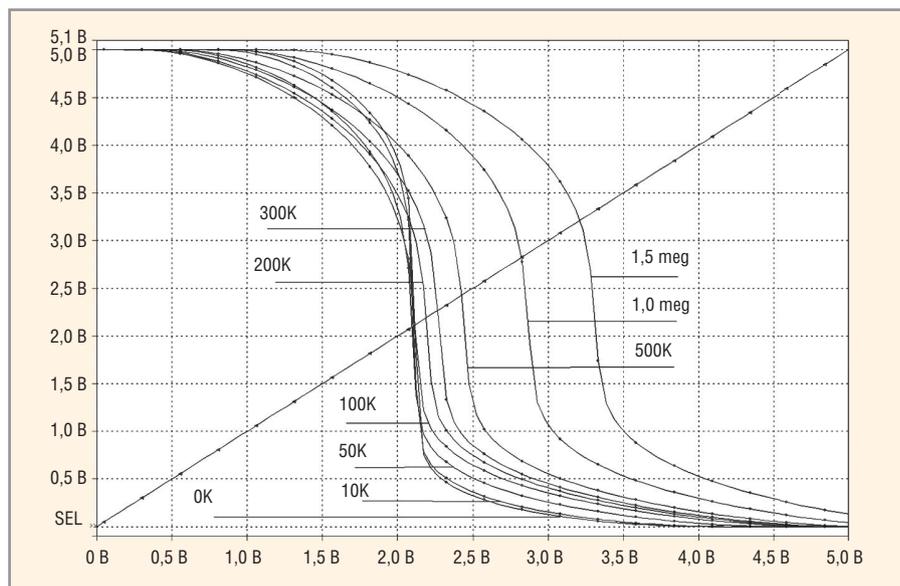


Рис. 4. Обработка результатов моделирования в программе SIMProbe

го двух эффектов деградации показали существенное отличие поведения схемы типа инвертор при различных дозах радиации (см. рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доступный для российских разработчиков полнофункциональный САПР СИМИКА, разработанный российским дизайн-центром ООО «Интегральные решения», является набором инструментов, обеспечивающим полный цикл разработки аналого-цифровых интегральных схем, в том числе фотоприёмных КМОП-матриц и видеосистем на кристалле.

По ряду показателей разработанное программное обеспечение превосходит САПР СБИС мировых лидеров. Реализованная в САПР полнофунк-

циональная программа моделирования, учитывающая эффекты деградации элементов ИС при воздействии ДФКП, позволит разработчикам ИС рассчитать работоспособность интегральной схемы до этапа изготовления опытного образца и проведения испытаний, что существенным образом сэкономит время и ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. САПР интегральных схем СИМИКА. www.symica.ru.
2. Бумагин А., Гулин Ю., Заводсков С., Кривякин В., Руткевич А., Стешенко В., Сухоруков А., Шишкин О. Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства. ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. 2010. №1.

