УДК 621.382

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛЕЙ АНАЛОГОВОЙ И СВЧ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В САПР

Е.М. Савченко^{1,2}, П.В. Таран¹, А.В. Телец¹, С.А. Фурсов², А.Н. Щепанов³

1 – АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27;

2 – ФГБОУ ВО РТУ МИРЭА, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78;

3 – ФГУП «МНИИРИП», 141002, Московская область, Мытищи, улица Колпакова, д. 2А

Рассмотрены основные подходы к разработке моделей твердотельной электронной компонентной базы (ЭКБ) для использования в системах автоматизированного проектирования (САПР) как один из элементов автоматизации системы менеджмента качества, функционирующей на предприятиях радиоэлектронной промышленности. Приведён краткий обзор отечественных и зарубежных САПР, показаны основные сферы их применения. Обоснована необходимость разработки моделей для ЭКБ отечественного производства с целью ускорения темпов проведения импортозамещения в радиоэлектронной промышленности. Представлена классификация моделей ЭКБ, используемых на основных этапах жизненного цикла изделий. Показаны результаты анализа использования различных типов моделей ЭКБ зарубежными производителями при производстве дискретных полупроводниковых приборов, изделий СВЧ, аналоговой и силовой электроники. Рассмотрены вопросы, связанные с учётом влияния внешних воздействующих факторов в моделях ЭКБ, а также её конструктивного исполнения. Затронуты вопросы, связанные с верификацией моделей ЭКБ и обеспечением качества изделий в процессе их разработки и производства.

Ключевые слова: ЭКБ, РЭА, модель, ИЭТ, импортозамещение, СМК, САПР, моделирование, уровень абстракции, управление сложностью, эквивалентная схема, тепловые расчёты, ВВФ, полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы, ИМС, СВЧ ИМС, модули, submodule, силовая электроника, радиоэлектронная промышленность, ЭКБ ИП, ЭКБ ОП

Сведения об авторах: Савченко Евгений Матвеевич, к.т.н., savchenko@pulsarnpp.ru, Таран Павел Валерьевич, Телец Андрей Витальевич, Фурсов Сергей Андреевич, Щепанов Андрей Николаевич

THE MAIN APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF ANALOG AND MICROWAVE ELECTRONIC COMPONENTS MODELS FOR USE IN CAD

E.M. Savchenko^{1,2}, P.V. Taran¹, A.V. Telets¹, S.A. Fursov², A.N. Shchepanov³

1 – JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27;

2 – MIREA - Russian Technological University, 119454, Moscow, Vernadskogo avenue, 78;

3 – FSUE «MNIIRIP» - 141002, Moscow region, Mytishchi, Kolpakova street 2A

The article considers the main approaches to the development of solid-state electronic component base (ECB) models for use in computer-aided design (CAD) systems as one of the elements of automation of the quality management system using at the enterprises of the radio electronic industry. The brief review of domestic and foreign CAD is given, the main spheres of their application are shown. The necessity of developing models for the domestic production ECB with the aim of accelerating the pace of import substitution in the radio electronic industry is substantiated. The classification of ECB models in relation to the main stages of the products life cycle is presented. The results of the analysis of the use of different types of ECB models by foreign manufacturers in the manufacture of discrete semiconductor devices, microwave products, analog and power electronics are shown. The issues related to taking into account the influence of external factors in the ECB models, as well as its design, are considered. The issues related to the verification of ECB models and ensuring the quality of products in the process of their development and production are touched upon.

Keywords: ECB, radio electronic equipment, model, electronic products, import substitution, QMS, CAD, modeling, abstraction level, complexity management, equivalent circuit, thermal calculations, external factors, semiconductor devices, integrated circuits, IC, MMIC, modules, submodules, power electronics, electronic industry, domestic ECB, foreign ECB

Authors: Savchenko Evgeny Matveevich, Ph.D., savchenko@pulsarnpp.ru, Taran Pavel Valerievich, Telets Andrey Vitalievich, Fursov Sergey Andreevich, Shchepanov Andrey Nikolaevich

Введение

Мероприятия по техническому перевооружению и технологическому развитию радиоэлектронной отрасли, направленные на повышение качества и технического уровня выпускаемой продукции, неоднократно отражены в документах Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России. В связи с этим актуальность использования САПР в цикле разработки современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) не вызывает сомнений: разработка изделий с использованием САПР приводит к значительному снижению материальных и временных затрат.

Рассматриваемые в настоящей статье вопросы тесно связаны с выполнением требований к развитию и совершенствованию на предприятиях-производителях изделий электронной техники (ИЭТ) системы менеджмента качества (СМК), установленных в ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Требования стандарта, устанавливающие удовлетворённость потребителей одной из основных метрик, определяющих качество выпускаемой продукции, выводят процедуры, связанные с построением моделей ЭКБ, в разряд приоритетных направлений технологического развития [1]. Совершенствуя СМК, организации работают над повышением конкурентоспособности выпускаемой продукции, что также повышает актуальность рассматриваемых вопросов и является одним из элементов автоматизации СМК предприятий радиоэлектронной промышленности.

Кроме того, необходимость и актуальность разработки моделей ЭКБ стала отражаться и в технических требованиях на новые опытно-конструкторские работы, проводимые в рамках программы импортозамещения, в соответствии с которыми в процессе выполнения ОКР также должна быть создана модель изделия и описана логика его функционирования для возможности использования в САПР.

В последние десятилетия отечественные и зарубежные САПР для разработки ЭКБ и РЭА интенсивно развиваются. В полной мере это относится к системам проектирования аналоговых и СВЧ ИЭТ, среди которых можно выделить следующие:

- Sentaurus TCAD, Silvaco TCAD для проведения приборно-технологического моделирования;

- Keysight IC-CAP для экстракции параметров моделей полупроводниковых приборов и элементов интегральных микросхем (ИМС);

- Sonnet Professional, Keysight EMPro для проведения электромагнитного анализа;

- Cadence Virtuoso, Keysight ADS, NI AWR Microwave Office, Symica для проектирования интегральных микросхем, блоков и модулей РЭА;

- Altium Designer, Cadence Allegro, Cadence Orcad, Delta Design для проектирования печатных плат.

Не менее интенсивное развитие происходит и в сегменте САПР общего назначения, которые также используются при разработке ЭКБ и РЭА:

- Mathworks Matlab и Simulink для проведения математического моделирования и моделирования на системном уровне;

- SolidWorks, T-Flex CAD, Компас-3D, AutoCAD, ANSYS, АСОНИКА для создания документации, чертежей, механических и тепловых моделей устройств, анализа показателей качества и надёжности, формирования управляющих кодов станков с ЧПУ, проведения тепловых расчётов и др.

Автоматизированная разработка РЭА требует использования математических моделей ЭКБ, входящей в её состав. Стоит отметить, что ЭКБ иностранного производства (ИП) снабжается такими моделями. Кроме того, подробные технические спецификации ЭКБ ИП, руководства по эксплуатации и методики применения размещаются в свободном доступе, что закрепляет её конкурентные преимущества по отношению к ЭКБ отечественного производства (ОП).

Разработчики РЭА, использующие ЭКБ ИП, снабжены полной информацией, необходимой для её применения в составе проектируемых устройств и, в частности, для интеграции моделей в САПР. Зачастую модели ЭКБ ИП входят в комплект поставки зарубежных САПР по умолчанию в отличие от ЭКБ ОП, как правило, не имеющей моделей. Техническая информация, содержащаяся в технических условиях (ТУ), несопоставима по полноте с информацией, сопровождающей ЭКБ ИП, что является большой проблемой для разработчиков РЭА, использующих ЭКБ ОП. И хотя ряд ЭКБ ОП снабжён отладочными платами, допол-

нительной к ТУ технической информацией и рекламными материалами, этого недостаточно. Важно отметить, что имеющийся опыт в области разработки СВЧ и аналоговой ЭКБ ОП не уступает зарубежному [2], а разработка моделей для ЭКБ ОП способна ускорить её внедрение в отечественную РЭА нового поколения, тем самым форсируя процесс импортозамещения, в котором остро нуждается радиоэлектронная промышленность.

Классификация моделей ЭКБ

Существуют различные варианты классификации моделей, в том числе применительно к моделям ЭКБ. Рассмотрим основные этапы жизненного цикла ИЭТ, на которых создаются и используются модели, начиная от технологии создания полупроводниковых приборов до этапа создания модулей и блоков РЭА.

С целью управления сложностью при разработке РЭА и систем на её основе вводится так называемый уровень абстракции, к которому можно отнести ту или иную модель в зависимости от её использования в САПР различного назначения. Существующие модели можно отнести к одному из четырёх уровней абстракции.

I-й уровень – модели операций технологического процесса изготовления ЭКБ. Учитывают физические свойства отдельных областей

полупроводниковых приборов (ППП), особенности конструкции, описывают детали технологического процесса на физическом уровне и отражают влияние технологического процесса на электрические параметры ППП, а также зависимости электрических параметров от разброса технологических [3, 4, 5]. Модели этого уровня абстракции используются в САПР приборно-технологического моделирования.

В частности, электрофизические модели не просто учитывают внутреннюю структуру изделий, а в процессе своей работы осуществляют имитацию электрофизических процессов, происходящих в приборе, и на основе этого производится вычисление их основных параметров [6, 7]. Пример расчётов распределения примесей в транзисторной структуре представлен на рис. 1а, а зависимость статического коэффициента передачи по току биполярного транзистора от параметров технологического процесса представлена на рис. 1б. К этому типу моделей относится, например, дрейфово-диффузионная модель, использующая уравнения, описывающие статическое и динамическое поведение носителей в полупроводнике под влиянием внешних полей. Моделирование полупроводниковых приборов с использованием подобных моделей требует значительных вычислительных ресурсов [8].

Рис. 1

Примеры электрофизических моделей: распределение примесей в транзисторной структуре (а), зависимость статического коэффициента передачи по току биполярного транзистора от параметров технологического процесса (б)

II-й уровень – модели элементного базиса. Описывают такие базовые элементы конструктивно-технологического базиса, как диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы в виде уравнений эквивалентных схем, отражающих их основные электрические параметры с учётом паразитных элементов и зависимостей параметров от внешних

воздействующих факторов (ВВФ). Модели данного уровня, как правило, строятся на основе эквивалентных схем и необходимы для осуществления анализа электрических схем в составе сложных устройств. Для построения таких моделей требуется решение двух основных задач: выбор структуры эквивалентной схемы и экстракция параметров

её элементов на основе строго определённой методологии. Исходными данными для построения моделей могут служить как результаты расчётов, полученные на уровне электрофизического моделирования, так и результаты измерений. Экстракция параметров моделей может осуществляться по-разному, например, с использованием

САПР IC-CAP. Такой вид моделей широко используют контрактные производители ИМС (так называемые “foundry”), предоставляющие возможность разработки ИМС по типовым технологическим процессам [9], а также производители дискретных ППП. Пример модели биполярного транзистора представлен на рис. 2.

Рис. 2

Модель биполярного транзистора в виде эквивалентной схемы

Модели, созданные на этом уровне, требуют существенно меньше вычислительных ресурсов, нежели модели, используемые на уровне приборно-технологического моделирования. Однако при переходе на следующий уровень абстракции использование моделей ЭКБ даже средней степени интеграции, например, операционных усилителей с токовой обратной связью [10, 11], содержащих модели отдельных элементов в виде эквивалентных схем, может приводить к экспоненциальному росту необходимых вычислительных ресурсов и отсутствию сходимости алгоритмов, использующих численные методы для решения задач.

III-й уровень – модели сложно-функциональных устройств. Описывают связь входных и выходных параметров радиоэлектронного устройства с использованием математических преобразований, полученных на основе экспериментальных данных, либо с использованием моделей предыдущих уровней абстракции. К данному уровню можно отнести табличные модели, например, в виде S -

и X- параметров для сверхвысокочастотных устройств.

Табличные модели не отражают внутреннюю структуру изделия, представляя его в виде «чёрного ящика», и описывают его лишь с помощью матрицы параметров изделия, например, на различных частотах (рис. 3) в заданном рабочем режиме. Следствием этого являются достаточно узкие границы применимости таких моделей, что важно учитывать при их использовании. Такие модели являются простой формой так называемой поведенческой модели, используемой при моделировании, например, устройств СВЧ (S-параметры в режиме малого сигнала, матрица шумовых параметров). СВЧ устройства, работающие в нелинейном режиме (в первую очередь мощные СВЧ транзисторы), могут снабжаться существенно более сложными табличными моделями, представленными X- параметрами, включающими дополнительные данные, например, такие как уровень интермодуляционных искажений и коэффициент передачи по мощности в режиме большого сигнала [12].

Рис. 3

Пример табличной модели устройства в виде «чёрного ящика»

IV-й уровень – системные модели РЭА. Идеализированные модели, учитывающие лишь главные свойства узлов, позволяющие проектировать РЭА на структурном или функциональном уровнях. Применяются на этапе создания сложных систем, содержащих, как правило, более нескольких десятков узлов для оценки и оптимизации характеристик устройства в целом. К данному уровню можно отнести полино-

миальные модели, которые основаны на использовании языков описания аппаратуры и ИМС, например, языков Verilog-AMS и VHDL-AMS. В таких моделях аппроксимируют нелинейные зависимости параметров с помощью математических функций, например, полиномов различных степеней. Пример полиномиальной функции и её описание на одном из языков представлен на рис. 4.

Рис. 4

Пример полиномиальной функции и её описание

Сложность разрабатываемых систем часто приводит к необходимости их разбиения на отдельные подсистемы, например, подсистемы электропитания, управления, приёма и обработки информации. Такой подход позволяет более детально провести анализ каждой подсистемы и остановиться не только на установлении базовых параметров компонентов системы, но и на более тонких параметрах, какими, например, являются

параметры динамической точности обработки сигнала [13], необходимые для подсистем обработки информации в аналого-цифровой аппаратуре.

Анализ применения моделей ЭКБ зарубежными производителями

Результаты анализа применения моделей различных типов для ЭКБ ведущими зарубежными компаниями представлены в табл. 1.

Таблица 1

Типы моделей ЭКБ, предоставляемые зарубежными производителями

Производитель \ Тип изделия	Analog Devices (США)	Texas Instruments (США)	Cree (Wolfspeed) (США)	Mini-Circuits (США)
СВЧ МИС и submodule	ТМ / МЭС	ТМ	ТМ / МЭС	ТМ
Аналоговая (в т.ч. силовая) ЭКБ	ТМ / МЭС / ПМ	ТМ / МЭС	–	–
Дискретные ППП	–	МЭС	ТМ / МЭС	–

Примечание: ТМ – табличная модель; МЭС – модель в виде эквивалентной схемы; ПМ – полиномиальная модель

Из таблицы видно, что для изделий СВЧ необходимым минимумом является наличие табличных моделей, например, S-параметров, описывающих их в режиме

малого сигнала, которые наилучшим образом подходят для линейных пассивных СВЧ устройств [14, 15] и имеют существенные ограничения для устройств, работаю-

щих в нелинейных режимах [16]. Для части устройств, выпускаемых, например, компанией Cree, разработаны модели в виде нелинейных эквивалентных схем. Это относится прежде всего к таким устройствам, как мощные СВЧ транзисторы, где для их настройки в диапазоне частот и мощностей необходимо построение цепей согласования с учётом нелинейной работы транзистора и обеспечения оптимального импеданса нагрузки в нелинейном режиме [12]. Модели на основе эквивалентных схем распространены в аналоговой и силовой электронике, самые распространённые из них – SPICE-модели, которые в большей степени применимы для таких изделий, как операционные усилители, компараторы, стабилизаторы напряжения, DC DC конверторы, детекторы и пр. Компания Analog Devices для части своих аналого-цифровых схем (АЦП/ЦАП) также использует полиномиальные модели. Для дискретных ППП наиболее часто используются модели в виде эквивалентных схем.

Учёт влияния корпуса в моделях ЭКБ

Одним из важных преимуществ ЭКБ ИП является многономенклатурность конструк-

тивного исполнения изделий. Для одного и того же изделия, как правило, существует несколько конструктивных исполнений, например, в виде кристалла в металлокерамическом или полимерном корпусе, а также в виде субмодуля с элементами обвязки. В последнее время развитию этого направления для ЭКБ ОП уделяется пристальное внимание, что также требует внимания к разработке моделей. Соответствующие модели ЭКБ, основанные на одном и том же кристалле, должны учитывать влияние корпуса. Создание таких моделей возможно двумя основными способами. Первый – по результатам измерения ЭКБ в соответствующих корпусах и в бескорпусном исполнении, второй – создание моделей корпусов ЭКБ и их стыковка с моделями бескорпусной ЭКБ.

Кроме моделей электрических параметров ЭКБ, также важным аспектом является создание 3D-моделей ЭКБ для осуществления пространственного планирования узлов и блоков РЭА, а также библиотек посадочных мест ЭКБ для проектирования печатных плат. На рис. 5 показаны 3D-модель транзистора в корпусе и его модель в виде эквивалентной схемы с учётом паразитных параметров.

Рис. 5

3D-модель транзистора в корпусе и его модель в виде эквивалентной схемы

Учёт внешних воздействующих факторов в моделях ЭКБ

Поскольку СВЧ и аналоговая ЭКБ находят широкое применение в составе РЭА авиационной и ракетно-космической техники, крайне важным является учёт влияния внешних воздействующих факторов (ВВФ) на её параметры. РЭА космических аппара-

тов, например, подвержена интенсивному воздействию ионизирующего и теплового излучения, способного существенно уменьшить срок её активного существования в процессе эксплуатации на борту [17].

В табл. 2 отмечены возможности различных типов моделей ЭКБ с точки зрения учёта влияния внешних воздействующих факторов.

Таблица 2

Возможности различных типов моделей ЭКБ по учёту влияния ВВФ

Тип модели \ ВВФ	Ионизирующее излучение	Тепловое излучение
Табличная	- / +	- / +
Электрофизическая	+	+
Эквивалентная схема	+	+
Полиномиальная	+	+

Из табл. 2 видно, что для учёта ионизирующего и теплового излучений подходят практически все типы моделей. Табличная модель в явном виде не позволяет проводить учёт воздействия внешних факторов, но это становится возможным с использованием набора табличных моделей для различных уровней ВВФ.

На рис. 6 приведён пример реализации учёта воздействия ионизирующего излучения в модели биполярного транзистора в виде эквивалентной схемы, где величина тока эквивалентного источника (I_{cor}) определяется с учётом дозового воздействия на полупроводниковый прибор [18]. Базовая модель транзистора обведена штрих-пунктирной линией.

Рис. 6

Пример учёта ионизирующего излучения в модифицированной модели Гуммеля-Пуна

Значение тока I_{cor} определяется в соответствии с выражением

$$I_{cor} = k_{\beta} \cdot \Phi_n \cdot I_C,$$

где I_C – ток коллектора, Φ_n – интегральный поток нейтронов, k_{β} – коэффициент радиационного изменения времени жизни.

Данная модель позволяет учесть влияние воздействия дозы ионизирующего излучения на электрические характеристики транзистора.

В общем случае учёт тепловых воздействий на ЭКБ описывается с помощью теплового сопротивления (R_T) и тепловой ёмкости

(C_T), при этом осуществляются схемотехническое моделирование, оценка теплового режима и проверка на соответствие его допустимости. В ряде случаев приходится дополнять этот подход и проводить электро-тепловое моделирование, т.е. схемотехническое моделирование с учётом саморазогрева ЭКБ и соответствующих изменений электрических параметров в его процессе.

Температурный режим особенно важен для электронных устройств, применяемых в ракетно-космической технике, так как в условиях вакуума отвод тепла затруднён, а обслуживание аппаратуры в большинстве случаев невозможно, что ужесточает требования к ЭКБ, используемой в РЭА такого назначения. Для современных космических аппаратов предъявляются требования по обеспечению срока их активного существования до 15 лет. При этом для применяемой ЭКБ необходимо иметь гамма-процентную наработку до отказа 150 - 200 тысяч часов при вероятности 95-97,5 %. Следствием этого является необходимость тщательного выбора тепловых режимов ЭКБ уже на этапе проектирования РЭА.

На рис. 7 приведён пример построения тепловой модели для СВЧ МИС усилителя средней мощности [19]. На рис. 8 показана экспериментальная зависимость разогрева корпуса и кристалла при различной скважности радиоимпульсов. На рис. 9, с учётом экспериментально полученных данных, показано изменение СВЧ параметров усилителя средней мощности в зависимости от температуры его кристалла. Фактически эти результаты отражают различные режимы работы усилителя (в непрерывном и импульсном режимах). Можно отметить, что при моделировании с применением вышеописанного подхода полученные результаты достаточно хорошо совпадают с экспериментальными [20, 21].

Рис. 7

Тепловая модель усилителя мощности в корпусе на теплоотводе

Рис. 8

Результаты измерения температуры корпуса и кристалла при различной скважности ($t_{\text{н}} = 100$ мкс)

Для моделирования механических воздействий на конструкцию корпуса электронного устройства применяются инструменты, входящие в состав таких САПР, как T-Flex CAD, AutoCAD, SolidWorks и др. Однако в ряде случаев применение таких мощных программных решений избыточно и доста-

Рис. 9

Результаты моделирования выходной мощности усилителя мощности с учётом температуры кристалла

точно использования вычислений с помощью электронных таблиц. На рис. 10 приведён пример расчёта минимальной резонансной частоты f_0 элементов конструкции корпуса ИМС и проволок внутренних межсоединений с использованием основных соотношений теории сопротивления материалов.

Для стержня				Для пластины			
$f_0 = A \cdot (d/l^2)$				$f_0 = A \cdot (h/l^2)$			
f_0 - резонансная частота							
A - постоянный множитель, зависящий от вида механической модели и материала конструктивного элемента, м/с							
d - диаметр стержня, м							
h - толщина пластины, м							
l - длина стержня (пластины), м							
Проволока диаметром 27 мкм				1 мм	Крышка корпуса 5140.8-АНЗ		
f_0	A	d	l	f_0	A	h	l
112320,00	Гц	4160	2,70E-05	27343,75	Гц	4375	1,00E-04
112,32	кГц		1,00E-03	27,34	кГц		4,00E-03
Проволока диаметром 27 мкм				1,5 мм	Основание корпуса 5140.8-АНЗ		
f_0	A	d	l	f_0	A	h	l
49920,00	Гц	4160	2,70E-05	280000,00	Гц	4375	1,60E-03
49,92	кГц		1,50E-03	280,00	кГц		5,00E-03

Рис. 10

Пример расчёта минимальной резонансной частоты f_0 элементов конструкции корпуса ИМС

Моделирование механических воздействий необходимо как на этапе проектирования конструкции ЭКБ для обеспечения соответствия требованиям ТЗ, так и на этапе применения ЭКБ в РЭА. В последнем случае допустимы, а в ряде случаев необходимы упрощения, связанные с выделением доминирующих факторов чувствительности к механическим воздействиям.

Верификация моделей на основе статистических данных

Одной из важнейших задач, связанных с разработкой моделей ЭКБ, является их верификация, в частности, учёт статистических разбросов параметров при производстве. По зарубежному опыту можно отметить, что контрактные производители заказных полупроводниковых пластин со структурами для проверки соответствия своих моделей используют статистические данные, набранные на сотнях пластин, изготовленных по заданному технологическому процессу. Зарубежные производители, выпускающие широкую номенклатуру универсальной ЭКБ, регулярно осуществляют сбор статистической информации по

результатам измерения, что оценивается сотнями тысяч регулярно поставляемых изделий. Вышеперечисленная информация является источником для принятия решений о корректировке моделей ЭКБ в случае необходимости.

На рис. 11 в качестве примера представлены результаты измерения коэффициента передачи СВЧ МИС полосового фильтра, в частности, на рис. 11а представлена зависимость коэффициента передачи СВЧ фильтра от частоты для выборки изделий, при этом зелёным цветом показана характеристика, заложенная в параметры модели. На рисунке 11б представлено статистическое распределение коэффициента передачи СВЧ МИС фильтра на заданной частоте. Из сопоставления можно сделать вывод, что модель достаточно корректно отражает поведение СВЧ фильтра лишь в медианном значении распределения. Отклонение от медианного значения, вызванное статистическими разбросами, приводит к значительному снижению точности модели, при этом возникающая погрешность может в несколько раз превышать значение отклонения от медианного значения.

Рис. 11

Статистический разброс параметров СВЧ МИС управляемого фильтра: зависимость коэффициента передачи от частоты (а), статистическое распределение коэффициента передачи на заданной частоте (б)

Требования, предъявляемые отечественной нормативной базой к статистической верификации моделей ЭКБ, в настоящее время отсутствуют. Например, в процессе разработки ИМС изготавливается всего двести-триста штук изделий из нескольких партий, что не позволяет в полной мере учесть статистический разброс параметров, свя-

занный с процессом производства. В связи с этим в дальнейшем необходимо накапливать и обрабатывать статистические данные в процессе последующего производства изделий. Однако это в значительной степени затруднено спецификой производства ЭКБ на отечественных предприятиях, связанной с отсутствием массовых объёмов выпуска

и неритмичностью производственного процесса, особенно в первые несколько лет после освоения производства. В целом можно отметить, что накопление и обработка статистических данных, включая сведения о надёжности и качестве производимой ЭКБ, является одной из приоритетных задач СМК предприятий радиоэлектронной промышленности [22].

Таким образом, процесс построения достоверных моделей ЭКБ отличается большой сложностью, зачастую носит итерационный характер, требует учёта многих одновременно воздействующих факторов, а также значительных временных и материальных затрат.

Заключение

Одним из важнейших направлений по комплексному улучшению качества и повышению конкурентоспособности ЭКБ ОП для предприятий радиоэлектронной промышленности является решение вопросов, связанных с автоматизацией СМК, в том числе с созданием и применением моделей, накоплением и обработкой статистических данных для их уточнения.

Несмотря на то, что ЭКБ ОП является чрезвычайно востребованной в условиях исполнения программы импортозамещения, в настоящее время лишь незначительная её часть снабжена моделями для САПР. Развитие отечественных САПР будет способствовать широкому внедрению моделей ЭКБ ОП за счёт их интеграции в библиотеки моделей, поставляемые в комплекте, однако потребует организации целенаправленного взаимодействия с отечественными разработчиками и производителями САПР.

Отечественными предприятиями и испытательными центрами создан значительный задел по учёту влияния ВВФ на параметры ЭКБ, что позволяет создавать модели, учитывающие эти эффекты. Это особенно важно для аппаратуры, работающей в жёстких условиях эксплуатации.

По результатам анализа зарубежного опыта использования моделей ЭКБ определён минимальный набор для рассматриваемого класса изделий. При этом стоит отметить, что создание библиотек и моделей для корпусов ЭКБ является самостоятельной и важной задачей.

Литература

1. Фурсов С.А. Основные направления автоматизации СМК предприятий-производителей изделий электронной техники // В сборнике: Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА / Материалы XV научно-технической конференции. – 2017. – С. 249-252.
2. Будяков А.С., Прокопенко Н.Н., Савченко Е.М., Крутчинский С.Г., Старченко Е.И. Опыт разработки и моделирования аналоговых микросхем с предельными параметрами на базе российских биполярных технологий // Всероссийская научно-техническая конференция Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем (МЭС). Сборник трудов. – 2006. – № 1. – С. 206-211.
3. Дроздов Д.Г., Савченко Е.М. Особенности использования самосовмещения в комплементарной биполярной технологии // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – № 2(227). – С. 53-58.
4. Дроздов Д.Г., Савченко Е.М., Сиомко В.О. Особенности расчёта приборов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN в САПР приборно-технологического моделирования // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2012. – № 1. – С. 213-216.
5. Дроздов Д.Г., Савченко Е.М. Проектирование технологических процессов изготовления кремний-германиевых гетеробиполярных транзисторов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2014. – № 2. – С. 141-144.
6. Дроздов Д.Г., Савченко Е.М., Зубков А.М. Результаты приборно-технологического моделирования комплементарной биполярной технологии с граничной частотой 10 ГГц и более // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2010. – № 1. – С. 66-69.
7. Дроздов Д.Г., Савченко Е.М., Мишаков Д.С. Разработка конструкции и технологии изготовления интегральных кремниевых диодов Шоттки для СВЧ // В сборнике: Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА / Материалы VIII научно-технической конференции молодых специалистов. – 2009. – С. 20-21.
8. Виноградов Р.Н., Дроздов Д.Г., Корнеев С.В., Савченко Е.М. Выбор оптимального маршрута моделирования диффузионных процессов с использованием САПР TCAD // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 1 (222). – С. 65-72.
9. Савченко Е.М. Особенности, результаты и перспективы разработки ИМС при взаимодействии с зарубежными foundry-фабриками //

- В сборнике: Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА / Материалы научно-технической конференции. – 2008. – С. 17-19.
10. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Prokopenko N.N. Generalized current feedback operational amplifier. В сборнике: 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications, ECCSC '08 sponsors: Romanian Ministry of Education. Bucharest, 2008. С. 142-145.
 11. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Савченко Е.М., Корнеев С.В. Предельные динамические параметры операционных усилителей с обратной связью по напряжению и усилителей с "токовой обратной связью" в линейном и нелинейном режимах // Всероссийская научно-техническая конференция Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем (МЭС). Сборник трудов. – 2006. – № 1. – С. 229-234.
 12. Бачурин В.В., Будяков А.С., Бычков С.С., Першин А.Д., Романовский С.М., Савченко Е.М. Создание нелинейной модели мощного СВЧ LDMOS транзистора // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2011. – Т. 11. – № 1. – С. 157-160.
 13. Савченко Е.М. Методы обеспечения высокой динамической точности обработки сигнала в операционных усилителях с токовой обратной связью // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2 (223). – С. 83-92.
 14. Мельничук С.А., Будяков А.С., Савченко Е.М. Обзор СВЧ симметрирующих устройств на основе технологии LTCC // В сборнике: Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА / Материалы VIII научно-технической конференции молодых специалистов. – 2009. – С. 60-62.
 15. Савченко Е.М., Гладких М.В., Пронин А.А., Першин А.Д., Шишкунова Е.В. Пассивные СВЧ аттенюаторы фиксированного номинала на основе нитрида алюминия // В сборнике: Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2012. – 2012. – С. 103-106.
 16. Будяков А.С., Вагин А.В., Васильев А.Г., Мельничук С.А., Савченко Е.М. Кремниевые СВЧ смесители на основе диодов Шоттки в монолитном и гибридном исполнении // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – № 2 (225). – С. 28-33.
 17. Фурсов С.А., Киров А.В., Телец А.В. Обеспечение надёжности радиоэлектронной аппаратуры на стадии производства и эксплуатации // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – № 5 (239). – С. 60-64.
 18. Виноградов Р.Н., Вологдин Э.Н., Дюканов П.А., Корнеев С.В., Савченко Е.М., Смирнов Д.С. Исследование деградации параметров интегральных микросхем операционных усилителей при воздействии ионизирующего излучения космического пространства // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 2 (229). – С. 28-33.
 19. Савченко Е.М., Першин А.Д., Будяков А.С., Пронин А.А. СВЧ МИС усилителя мощности с диапазоном рабочих частот 2,6-3,4 ГГц и выходной мощностью до 5 Вт // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 26-29.
 20. Будяков А.С., Савченко Е.М. Анализ основных направлений построения интегральных СВЧ усилителей мощности L- и S-диапазонов частот с выходной мощностью до 2,5 Вт на основе кремниевых транзисторов // В сборнике: Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА / Материалы научно-технической конференции. – 2008. – С. 103-105.
 21. Савченко Е.М., Першин А.Д., Будяков А.С. Результаты разработки СВЧ МИС усилителя мощности S-диапазона частот с выходной мощностью до 5 Вт // В сборнике: Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА / Материалы XII Научно-технической конференции. – 2013. – С. 82-85.
 22. Гришаков М.Н., Синкевич В.Ф., Таран П.В. Отбраковочные испытания твердотельных СВЧ модулей // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2. – С. 78-82.

References

1. Fursov S.A. Main direction of QMS automation of electronic device manufacturers. In the collection: Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of XV scientific and technical conference. 2017. pp.249-252.
2. Budyakov A.S., Prokopenko N.N., Savchenko E.M., Krutchinsky S.G., Starchenko E.I., Desing and modeling of analog circuits with limit parameters, based on Russian bipolar technologies. All-Russian science and technical conference "Issues of advanced microelectronic circuits development". Collection. 2006. No.1. pp.206-211.
3. Drozdov D.G., Savchenko E.M. Features of using self-alignment in complementary bipolar technology. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2011. No.2. pp.53-58.
4. Drozdov D.G., Savchenko E.M., Siomko V.O. Features of AlGaIn/GaN device's simulation

- in device-process CAD software. Issues of development of advanced micro- and nanoelectronic systems. 2012. No.1. pp.213-216.
5. Drozdov D.G., Savchenko E.M. Design of technological processes for manufacturing silicon-germanium heterostructure bipolar transistors. Issues of development of advanced micro- and nanoelectronic systems. 2014. No.2. pp.141-144.
 6. Drozdov D.G., Savchenko E.M., Zubkov A.M. Results of device and process simulation of complementary bipolar technology with cut-off frequency 10 GHz and above. Issues of development of advanced micro- and nanoelectronic systems. 2010. No.1. pp.66-69.
 7. Drozdov D.G., Savchenko E.M., Mishakov D.S. Development of structure and manufacturing technology of microwave integrated silicon Schottky diodes. In the collection: Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of VIII scientific and technical conference for young specialists. 2009. pp.20-21.
 8. Vinogradov R.N., Drozdov D.G., Korneev S.V., Savchenko E.M. Choosing the optimal simulation method for diffusion processes using TCAD software. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2009. No.1. pp.65-72.
 9. Savchenko E.M. Features, results and perspectives of IC development in cooperation with foreign foundries. In the collection: Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of science and technical conference. 2008. pp.17-19.
 10. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Prokopenko N.N. Generalized current feedback operational amplifier. In the collection: 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications, ECCSC '08 sponsors: Romanian Ministry of Education. Bucharest, 2008. pp. 142-145.
 11. Prokopenko N.N., Budyakov A.S., Savchenko E.M., Korneev S.V. Dynamic capacity of operational amplifiers with voltage and current feedback in linear and nonlinear modes. All-Russian scientific and technical conference "Issues of development of advanced microelectronic systems. Collection. 2006. No.1. pp.229-234.
 12. Bachurin V.V., Budyakov A.S., Bychkov S.S., Pershin A.D., Romanovskiy S.M., Savchenko E.M. Making the nonlinear model of microwave power LDMOS transistor. Fundamental issues of radio-electronic engineering. 2011. T.11. No.1. pp.157-160.
 13. Savchenko E.M. Methods for ensuring high dynamic accuracy of signal processing in operational amplifiers with current feedback. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2009. No.2. pp.83-92.
 14. Melnichuk S.A., Budyakov A.S., Savchenko E.M. Overview of microwave balancing devices based on LTCC technology. In the collection: Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of VIII scientific and technical conference for young specialists. 2009. pp.60-62.
 15. Savchenko E.M., Gladkikh M.V., Pronin A.A., Pershin A.D., Shishkunova E.V. Passive microwave fixed AIN attenuators. In the collection: Fundamental issues of radio-electronic engineering. INTERMATIC-2012 Proceedings of International scientific and technical conference. 2012. pp.103-106.
 16. Budyakov A.S., Vagin A.V., Vasilyev A.G., Melnichuk S.A., Savchenko E.M., Silicon microwave mixers based on Schottky diodes in monolithic and hybrid variants. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2010. No.2. pp.28-33.
 17. Fursov S.A., Kirov A.V., Telets A.V. Ensuring the reliability of electronic equipment at the stages of production and operation. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2015. No.5(239). pp.60-64.
 18. Vinogradov R.N., Vologdin E.N., Dyukanov P.A., Korneev S.V., Savchenko E.M., Smirnov D.S. Investigation of the operational amplifier's integrated circuits parameters degradation under the space ionizing radiation. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2012. No.2(229). pp.28-33.
 19. Savchenko E.M., Pershin A.D., Budyakov A.S., Pronin A.A. Power amplifier MMIC with operating frequency 2,6-3,4 GHz and output power up to 5 W. Fundamental issues of radio-electronic engineering. 2014. T.14. No.4. pp.26-29.
 20. Budyakov A.S., Savchenko E.M. Analysis of the main design approaches in the creation of silicon transistor-based L- and S-band integrated microwave power amplifiers with output power up to 2,5 W. In the collection: Complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of scientific and technical conference. 2008. pp.103-105.
 21. Savchenko E.M., Pershin A.D., Budyakov A.S. Results of the design of S-band power amplifier MMIC with output power up to 5 W. In the collection: Complex functional blocks of radio-electronic equipment. Proceedings of XII scientific and technical conference. 2013. pp.82-85.
 22. Grishakov M.N., Sinkevich V.F., Taran P.V. Screening tests for solid-state microwave modules. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2009. No.2. pp.78-82.