

Использование имитационных моделей при контроле параметров интегральных микросхем

А.Ю. Дракин, А.Н. Школин, А.А. Пугачев

ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет

Аннотация: Приведены сведения по разработке имитационных (поведенческих) моделей микросхем импульсных преобразователей напряжения для применения в автоматизированном измерительном оборудовании при испытаниях интегральных микросхем. Выполнено моделирование интегральной микросхемы LM2676 с учетом тепловыделения и влияния температуры кристалла на внешние электрические характеристики в составе общей поведенческой модели. Получены результаты и зависимости, совпадающие с экспериментальными данными и со SPICE-моделью на транзисторном уровне, отражающие влияние температуры кристалла на функционирование микросхемы. Показана возможность использования поведенческих моделей в качестве источника нормативно-справочной информации в процессе тестирования электронных компонентов.

Ключевые слова: автоматизированное тестовое оборудование, контроль параметров микросхем, импульсные преобразователи напряжения, поведенческая модель, VHDL-AMS.

Введение

Необходимость применения имитационных моделей электронных компонентов любых технических объектов в последнее время становится все более острой. Это обусловлено тем, что классические подходы использования моделей в САПР сталкиваются с определенными трудностями, среди которых противоречие между предъявляемыми к ним функциональными требованиями и объемом доступных вычислительных ресурсов. Главная проблема состоит в необходимости поиска компромисса между вычислительной сложностью модели и ее адекватностью к реальным физическим процессам. Это ставит разработчика модели перед выбором: либо создавать «полноценную» модель каждого компонента, отражающую все множество физических взаимодействий (электромагнитные, тепловые, механические и т.д.), либо иметь дело с множеством частных моделей, отражающих только один из аспектов их применения в САПР. Например, это могут быть электрические характеристики схем в SPICE-моделях для задач

анализа работы схемы, или электрические характеристики буферных (интерфейсных) частей моделей компонентов в IBIS-моделях [1] для использования в задачах контроля целостности сигналов (Signal Integrity). Такой подход ведет к тому, что для одного электронного компонента в ряде случаев приходится разрабатывать множество частных моделей. Модели являются автономными и в большинстве случаев не могут быть объединены, например, с целью исследования влияния температуры окружающей среды на режимы работы интегральной схемы, что было бы возможным при наличии комплексной модели, одновременно охватывающей несколько физических областей.

Известен подход моделирования на основе совместного использования фундаментальных систем уравнений математической физики, геометрии объекта исследования, методов конечных элементов, реализованный в программных продуктах Comsol Multiphysics, ANSYS и др. [2, 3]. Этот подход позволяет получить весьма адекватные мультифизические модели отдельных компонентов. Проблемой, с одной стороны, являются высокие требования к компетенции разработчика в методах математической физики, что не часто встречается в повседневной инженерной практике, а с другой - вычислительная сложность таких моделей.

В микроэлектронной и других технических отраслях, критически важным является время, затраченное на проектирование. Процессы проектирования, изготовления и испытания становятся все более сложными и дорогостоящими. Для снижения трудовых и временных затрат на разработку используются поведенческие модели интегральных схем (ИС). Такие модели описывают функционал интегральной микросхемы в целом, задают соответствие входных и выходных сигналов системы, имитируя ее работу. Поведенческая модель (ПМ) воспроизводит требуемое поведение исходной анализируемой системы. При этом полагается однозначное

соответствие между поведением исходной физической системы и реализуемой модели [4]. Это означает, что такая модель однозначно предсказывает будущие состояния системы из данных о текущих и прошлых состояниях.

Использование поведенческого подхода в исследовательской работе обусловлено необходимостью получения данных для последующего системного анализа, который позволяет учесть лежащую в основе внешнего поведения физику и получить из нее соответствующие причинно-следственные, математические, логические и иные связи.

Другим направлением применения поведенческого подхода является симуляция систем, состоящих из большого количества элементов, например, сложных электронных, микроэлектронных и электрических схем. Это становится возможным, поскольку затраты вычислительных ресурсов, необходимых для выполнения отдельной поведенческой модели компонента схемы на несколько порядков меньше, чем для аналогичной модели, описанной с помощью дифференциальных уравнений или SPICE-модели.

Настоящая статья посвящена выбору рационального подхода к применению поведенческих моделей в составе тестового оборудования интегральных схем на примере микросхем высокочастотных контроллеров импульсных преобразователей напряжения, а также в задачах контроля теплового сопротивления интегральных микросхем.

Материалы и методология

Поведенческие модели интегральных схем создаются для решения различных задач – функционального анализа предполагаемой архитектуры устройства [5, 6], верификации и отладки разрабатываемого программного обеспечения (драйверов) [6]. Основной задачей, которую необходимо решить, прежде чем приступить к разработке поведенческой модели, является ее детализация. С увеличением детализации растет время на ее

разработку и выполнение. Однако при уменьшении детализации применимость модели в процессе проектирования электронного устройства часто падает – использовать очень простую модель можно только для конкретных локальных задач.

SPICE-модели устройств широко используются для исследования параметров устройства (например, коэффициент передачи по постоянному току (β), напряжение насыщения ($U_{\text{нас}}$) и ток насыщения ($I_{\text{нас}}$) для биполярного транзистора). Модели устройств, реализованные в SPICE, обычно очень сложны. Например, стандартная модель полевого транзистора имеет три уровня детализации. Простейшей является модель Шихмана-Ходжеса, основанная на использовании квадратичных уравнений. Ее целесообразно использовать в тех случаях, когда к точности моделирования не предъявляются высокие требования. Модель второго уровня основана на более точных аналитических выражениях. Модель третьего уровня является полуэмпирической и использует сочетание эмпирических и аналитических выражений. Для определения параметров этих выражений используются результаты измерения характеристик реальных полупроводниковых приборов. Модели второго и третьего уровня учитывают эффекты второго порядка, такие как модуляция длины канала. Модель третьего уровня целесообразно использовать при анализе цепей с мощными МОП-транзисторами вертикальной структуры. Это, в свою очередь, требует значительно большего времени моделирования и памяти компьютера при моделировании сложных схем. Уравнения для устройств обычно внедряются в симулятор и доступны для пользователя. Пример использования такого уравнения – это симуляция работы биполярного транзистора по постоянному току. Это уравнение Эберса-Молла, которое используется в программах-симуляторах SPICE.

Современные интегральные схемы содержат миллионы базовых элементов (транзисторов, логических элементов) и их сложность постоянно возрастает. Это приводит к проблемам вычислительного характера. В качестве решения указанной проблемы в САПР было предложено и внедрено макро моделирование – средство абстрагирования более высокого уровня, которое было реализовано в симуляторах SPICE. Макромодели легко применять при описании простого поведения, учитывающего только основные соотношения в модели [7]. Однако, при излишнем увеличении точности и детализации, когда поведение становится сложным, разработка работоспособной макро модели может стать затруднительной, а иногда и невозможной.

Аналоговое поведенческое моделирование использует язык описания аппаратных средств, посредством которого описывается поведение устройства. Такой вид моделирования позволяет пользователю описывать поведение устройства как функцию физических переменных (напряжение, ток, время моделирования и т.д.). Такие типы моделей как HDL и SPICE иногда смешиваются между собой, потому что уравнения SPICE также являются поведенческими моделями. Однако в SPICE уравнения компонентов непосредственно встроены в симулятор, тогда как поведенческий симулятор будет содержать уравнения для устройств в HDL. При аналоговом поведенческом моделировании возможно не только моделирование поведения электрических параметров устройства, но и моделирование температуры и мощности.

Наиболее известными и популярными общими методами разработки поведенческих моделей сегодня являются следующие: блок-схемы алгоритмов, ЕРС-диаграммы, использование функциональных схем.

Построение блок-схем алгоритмов регламентируется рядом национальных стандартов, например ГОСТ 19.701-90 (ГОСТ 19.701-90 (ИСО

5807-85). Единая система программной документации. Схемы алгоритмов программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения). Способ очень широко известен и является одним из самых распространенных в практике работы над созданием текстов на различных языках программирования, к которым также относятся и языки, используемые для разработки ПМ. Важным преимуществом такого подхода является его наглядность и простота трансляции описания с языка блок-схем в текст программы на языке реализации поведенческой модели (VHDL, Verilog, SystemC и др.)

Событийно управляемая цепь процессов (EPC, event-driven process chain) – это тип диаграмм и описаний, широко используемых для моделирования, анализа и реорганизации бизнес-процессов, также может использоваться для моделирования поведения частей системы, при реализации ее функций и служить полноценной заменой традиционным блок-схемам. «Диаграмма процесса (функции) в нотации EPC представляет собой упорядоченную комбинацию событий и функций. Для каждой функции могут быть определены начальные и конечные события, участники, исполнители, материальные и информационные потоки, сопровождающие её, а также проведена декомпозиция на более низкие уровни» [8].

Процесс моделирования процессов с помощью EPC подчиняется классическим принципам моделирования: декомпозиции и иерархического упорядочивания. Декомпозиция, с отображением на отдельных диаграммах, выполняется для функций, подобно предопределенным процессам на блок-схемах.

Часто встречающейся задачей при моделировании является учет тепловых режимов работы электронных схем, для чего в поведенческих моделях необходимо реализовать учет тепловых характеристик компонентной базы. Основным российским нормативным документом,

определяющим метод контроля теплового сопротивления кристалл-корпус силовых диодов R_{thjc} , является национальный стандарт ГОСТ 19.701-90 (ГОСТ 24461-80. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний). Рекомендуемые этим стандартом способы измерения теплового сопротивления из-за высокой трудоемкости применимы только для одиночных диодов в лабораторных условиях. Для автоматизированного контроля в условиях серийного производства они не используются.

Также следует выделить стандарты [9, 10]. В соответствии с ними при измерении переходного теплового сопротивления возникают трудности в связи с погрешностью квантования аналого-цифрового преобразователя и влиянием переходных тепловых и электрических процессов при переключении полупроводникового прибора из режима разогрева в режим измерения. Для более точной идентификации тепловых параметров по переходной тепловой характеристике (ПТХ) А. Рооре и V. Szekely предложили так называемый аппарат структурных функций [11, 12].

В общем случае для полностью наблюдаемой или математически верно описанной системы возможна реализация ПМ на любом алгоритмическом или объектно-ориентированном языке программирования, что следует из повседневного практического опыта. Поэтому в нашей работе рационально сузить область понятия системы до интегральной микросхемы (ИМС) с учетом практической цели работы – получения компактной поведенческой модели, пригодной для использования в САПР и автоматизированном тестовом оборудовании.

Авторами разработан автоматизированный измерительный комплекс для испытаний микросхем высокочастотных импульсных преобразователей напряжения. В рамках настоящей работы решалась задача испытания микросхем импульсных стабилизаторов напряжения понижающего и повышающего типа с выходным током до 5 А.

Аппаратная часть комплекса реализована с использованием оборудования фирмы National Instruments (контроллер PXIe-8821 на шасси PXIe-1078, модули источников-измерителей PXIe-4139, PXIe-4142, модуль АЦП PXIe-5114, многофункциональный модуль PXIe-6230, модуль дискретных выходов PXIe-2567) и оригинальных тест-адаптеров с контактными устройствами под различные типы корпусов микросхем и блока подключения многозондовой установки для контроля параметров изделий непосредственно на кремниевой пластине [13]. Также в комплексе имеется возможность в нескольких поддиапазонах определять статические и динамические параметры испытываемой ИМС ИПН. Дополнительно реализовано управление внешними устройствами (зондовая установка, сортировщик, климатическая камера).

Поскольку имеется зависимость измеряемых параметров ИМС ИПН от температуры, то испытания микросхем проводят в климатических камерах при широком наборе фиксированных температур окружающей среды. Предлагаемый авторами подход ориентирован на снижение количества нормативно-справочной информации, в которой приводятся диапазоны предельно допустимых значений величин измеряемых параметров, путем замены этих таблиц для каждого возможного набора условий внешней среды и вида испытаний на данные, получаемые в результате расчета на поведенческой модели ИМС ИПН для любых требуемых условий и режимов функционирования микросхемы.

Для программной реализации поведенческой модели был выбран высокоуровневый язык описания аппаратуры VHDL (Very-High-Speed Hardware Description Language), и в частности его «диалект» VHDL-AMS, утвержденный стандартом IEEE 1076.1 [14]. Этот язык разработан специально для поведенческих моделей с сигналами смешанного типа. Это свойство позволяет описать мультидисциплинарные модели. Использование

VHDL-AMS позволяет описать физическую взаимосвязь электрических и тепловых параметров микросхем импульсных преобразователей напряжения [15, 16, 17].

Для минимизации вычислительных затрат при выполнении расчета на ЭВМ, авторами предлагается минимизировать расчетную полную электрическую схему ИМС ИПН путем организации аналоговой части только для электрических интерфейсов выводов микросхемы. Внешнее тепловое воздействие осуществляется посредством дополнительного интерфейса модели, не имеющего физического аналога в виде конкретного вывода микросхемы. При этом подключенная к указанным интерфейсам внутренняя функциональная модель описывается в основном алгоритмически.

Как пример для анализа использовалась микросхема LM2676 фирмы Texas Instruments. Для микросхемы производитель разработал макромоделю на языке SPICE, которая и использовалась для верификации поведенческой модели. Функциональная схема модели приведена на рис. 1.

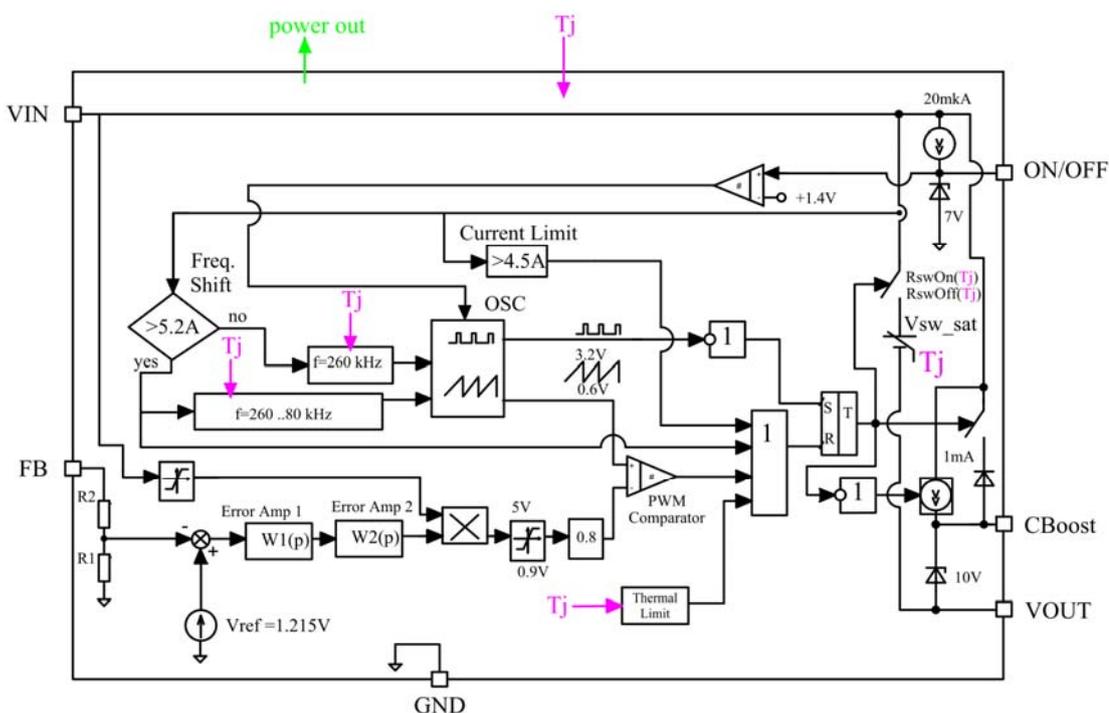


Рис. 1. – Функциональная структура поведенческой модели

Функциональная схема модели содержит следующие блоки:

- коммутирующий выходной ключ на основе идеализированного ключа с зависимыми от температуры параметрами его дифференциального сопротивления и порогового напряжения;
- блок усилителя ошибки, реализованный на базе блоков с передаточной функцией, описанной с помощью преобразования Лапласа;
- блоки перезаряда внешнего конденсатора, подключенного к выводу CBoost и обеспечивающего работу встроенного в микросхему драйвера силового ключа;
- блок функционального генератора (OSC) пилообразного и стробирующего сигнала;
- блоки защиты по току и температуре;
- блоки формирования сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ), в частности ШИМ-компаратор (PWM Comparator), многоходовый логический ИЛИ, модифицированный RS-триггер с приоритетностью сброса.

Каждый блок авторами реализован на языке VHDL-AMS, также, как и функциональная схема, приведенная на рис. 1

Результаты

Для верификации поведенческой модели была использована среда моделирования SystemVision Cloud компании Mentor Graphics. Эта среда доступна в виде публичного интернет-сервиса. Структура модели в ней приведена на рис. 2.

С целью проверки адекватности полученной модели были проведены численные эксперименты [18], путем включения созданной поведенческой модели в схему, представленную на рис. 2 и выполнено сопоставление

полученных результатов моделирования с данными технического описания исследуемой интегральной схемы.

Диаграммы выходного напряжения и тока через дроссель при включении преобразователя приведены на рис. 3. На рис. 4. приведены диаграммы при резком увеличении тока нагрузки от 500 мА до 3000 мА и последующем обратном спаде. Полученные результаты имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными опытной установки и с результатами SPICE-моделей.

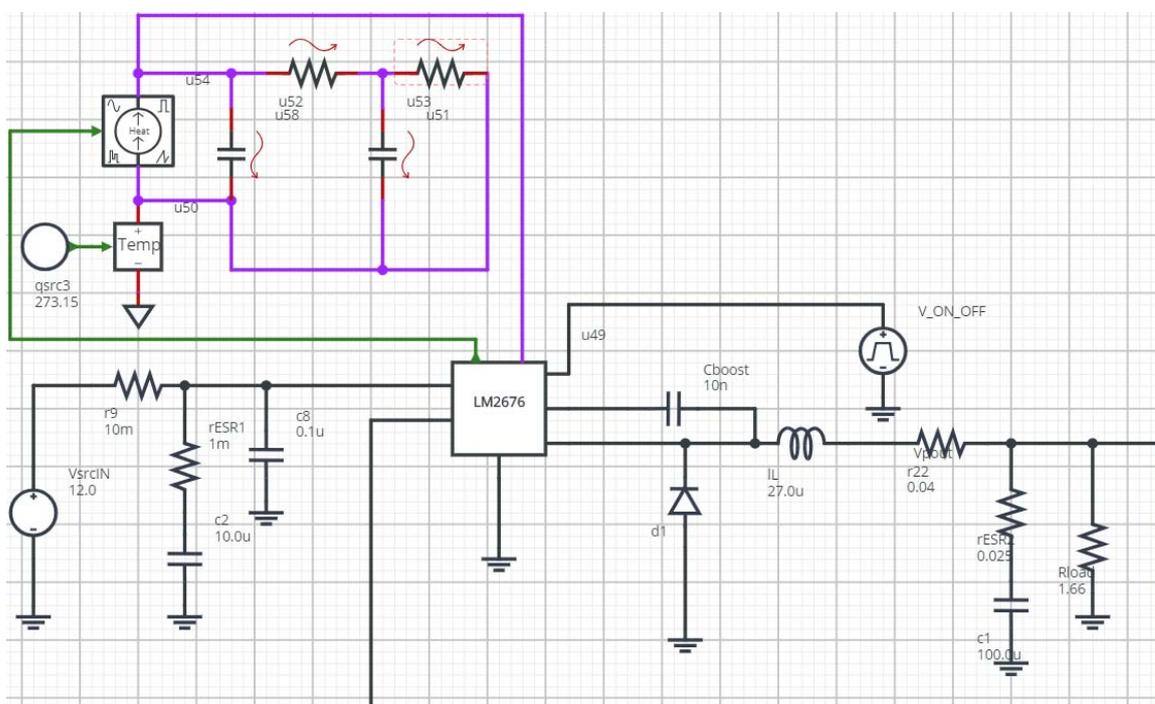


Рис. 2. – Модель ИПН в среде SystemVision

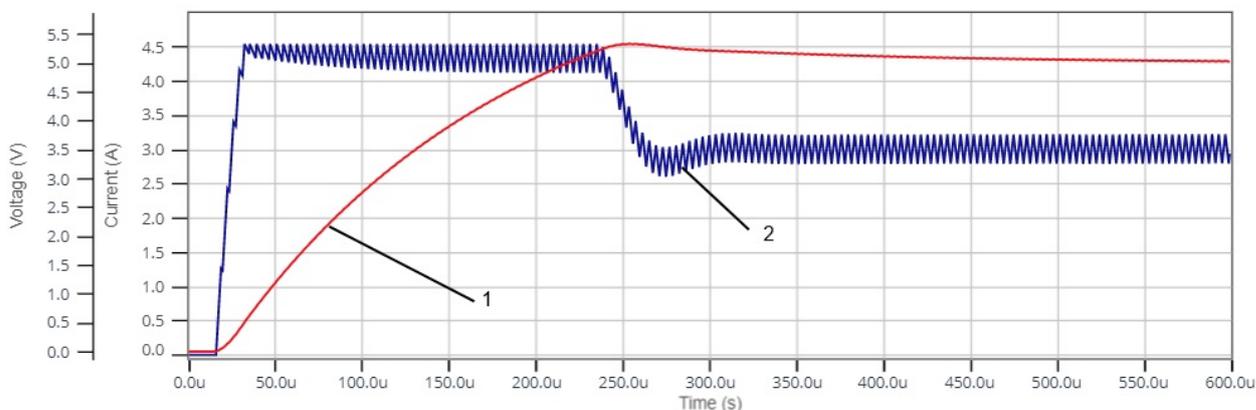


Рис. 3. – Диаграммы при запуске ИМС ИПН (1 – выходное напряжение

на нагрузке, 2 – ток дросселя)

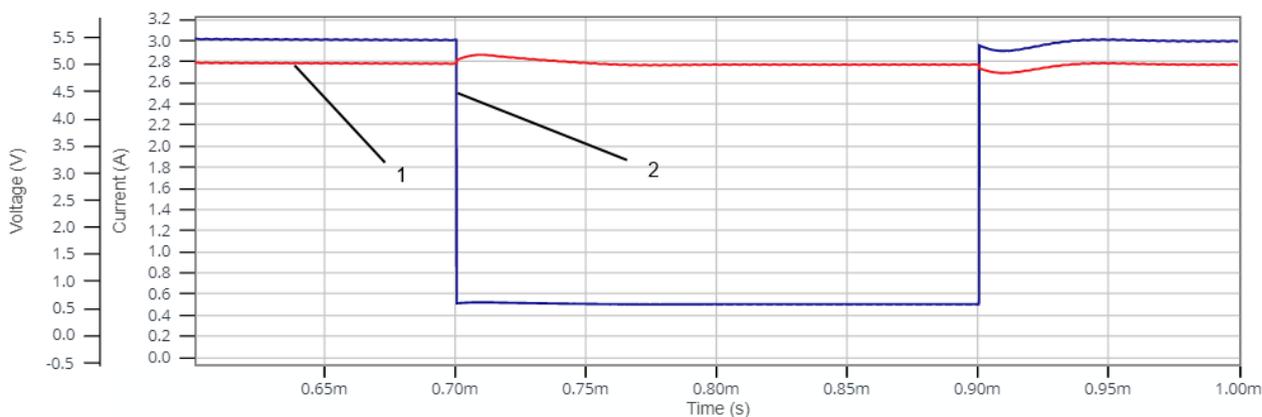


Рис. 4. – Диаграммы при изменении нагрузки (1 – выходное напряжение на нагрузке, 2 – ток нагрузки)

Заключение

Использование поведенческих моделей позволяет получить адекватные результаты моделирования в сравнении со значительно более вычислительно сложными SPICE-моделями на транзисторном уровне, обеспечивая при этом значительный выигрыш в производительности и экономии вычислительных ресурсов.

Применение поведенческих моделей в качестве источника нормативно-справочной информации и замены эталонных образцов ИМС в процессе тестирования электронных компонентов позволяет значительно сократить объем подготовительных работ при организации автоматизированного тестирования изделий микроэлектроники и разработке автоматизированного тестового оборудования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.1729.2017/4.6).

Литература

1. IBIS Open Forum. URL: ibis.org.
 2. Саенко А.В., Малюков С.П., Палий А.В., Бондарчук Д.А., Бесполудин В.В. Исследование распределения температуры в пленке TiO₂ при импульсном лазерном нагреве // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4306.
 3. Синютин С.А., Воронков О.Ю. Метод формирования модели пониженного порядка микроэлектромеханической системы встроенными средствами программного пакета ANSYS // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3902.
 4. Willems J.W., Polderman J.C. Introduction to Mathematical Systems Theory: A Behavioral Approach. New York: Springer, 1998. 424 p.
 5. Шагурин И.В., Канышев В.А. Применение языка SystemC и средств разработки на его основе для проектирования «Систем на кристалле». 2006. № 9 (32). С. 23-32.
 6. Shanthamoorthi Velusamy, Anurag Mehta. Unified Modeling in C++ & SystemC // Design and Reuse Industry. URL: design-reuse.com/articles/7222/unified-modeling-in-c-systemc.html.
 7. Duran P. A. A practical guide to analog behavioral modeling for IC system design. Boston, USA: Kluwer Academic, 1998. 238 p.
 8. Основы проектирования поведенческих моделей - Учебная и научная деятельность Анисимова Владимира Викторовича. URL: sites.google.com/site/anisimovkhv/learning/pris/lecture/tema8/tema8_1.
 9. MIL-STD-883E. Method 1012.1: Thermal Characteristics of Integrated Circuits. 1980. 13 p.
 10. EIA/JEDEC JESD51-1 standard. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device). URL: jedec.org.
-

11. Poppe A. et al. Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies // Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement And Management Symposium. Dallas, USA: IEEE, 2006. pp. 191–198.

12. Poppe A., Székely V. Dynamic temperature measurements: tools providing a look into package and mount structures // Electronics Cooling. 2002. № 8. pp. 10–19.

13. Дракин А.Ю., Школин А.Н. Разработка автоматизированных измерительных комплексов для испытаний микросхем высокочастотных импульсных преобразователей напряжения // Электронные средства и системы управления. Томск, ТУСУР, №1. 2017. С.168-172.

14. IEEE Std 1076.1-1999. IEEE Standard VHDL analog and mixed-signal extensions. USA, 1999. 303p.

15. Ashenden P.J., Peterson G.D., Teegarden D.A. The system designer's guide to VHDL-AMS: analog, mixed-signal, and mixed-technology modeling / P.J. Ashenden, G.D. Peterson, D.A. Teegarden, San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 2002. 800 p.

16. Boulet P. Advances in design and specification languages for SoCs. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2005. 305 p.

17. Pecheux F. Modeling and simulation of multi-discipline systems using bond graphs and VHDL-AMS. New Orleans, Louisiana, 2005. pp. 149-155.

18. Shkolin A.N., Drakin A.Y., Zotin V.F. Development of automated measurement systems for testing integrated circuits of switching converters, MWENT-2018, IEEE, Russia, Moscow, March 14-16, 2018. pp. 1-4.

References

1. IBIS Open Forum. URL: ibis.org.

2. Saenko A.V., Maljukov S.P., Palij A.V., Bondarchuk D.A., Bespoludin V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4306.
3. Sinjutin S.A., Voronkov O. Yu. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3902.
4. Willems J.W., Polderman J.C. Introduction to Mathematical Systems Theory: A Behavioral Approach. New York: Springer, 1998. 424 p.
5. Shagurin I.V., Kanyshev V.A. Primenenie jazyka SystemC i sredstv razrabotki na ego osnove dlja proektirovanija "Sistem na kristalle" [Application of SystemC language and development tools based on it for the design of "Systems on a chip"]. 2006. № 9 (32). pp. 23-32.
6. Shanthamoorthi Velusamy, Anurag Mehta. Unified Modeling in C++ & SystemC. Design and Reuse Industry. URL: design-reuse.com/articles/7222/unified-modeling-in-c-systemc.html.
7. Duran P. A. A practical guide to analog behavioral modeling for IC system design. Boston, USA: Kluwer Academic, 1998. 238p.
8. Osnovy proektirovanija povedencheskih modelej. Uchebnaja i nauchnaja dejatel'nost' Anisimova Vladimira Viktorovicha [Fundamentals of the design of behavioral models - Educational and scientific activities Anisimov Vladimir Viktorovich]. URL: sites.google.com/site/anisimovkhv/learning/pris/lecture/tema8/tema8_1.
9. MIL-STD-883E. Method 1012.1: Thermal Characteristics of Integrated Circuits. 1980. 13 p.
10. EIA/JEDEC JESD51-1 standard. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device). URL: jedec.org.
11. Poppe A. et al. Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies. Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor

Thermal Measurement and Management Symposium. Dallas, USA: IEEE, 2006. pp. 191–198.

12. Poppe A, Székely V. Dynamic temperature measurements: tools providing a look into package and mount structures. *Electronics Cooling*. 2002. № 8. pp. 10-19.

13. Drakin A.Ju., Shkolin A.N. Razrabotka avtomatizirovannyh izmeritel'nyh kompleksov dlja ispytanij mikroshem vysokochastotnyh impul'snyh preobrazovatelej naprjazhenija. *Jelektronnye sredstva i sistemy upravlenija*. [Development of automated measuring systems for testing chips of high-frequency pulse voltage converters. Electronic tools and control systems]. Tomsk, TUSUR, №1. 2017. pp.168-172.

14. IEEE Std 1076.1-1999. IEEE Standard VHDL analog and mixed-signal extensions. USA, 1999. 303p.

15. Ashenden P.J., Peterson G.D., Teegarden D.A. The system designer's guide to VHDL-AMS: analog, mixed-signal, and mixed-technology modeling. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 2002. 800 p.

16. Boulet P. Advances in design and specification languages for SoCs. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2005. 305 p.

17. Pecheux F. Modeling and simulation of multi-discipline systems using bond graphs and VHDL-AMS. New Orleans, Louisiana, 2005. pp. 149-155.

18. Shkolin A.N., Drakin A.Y., Zotin V.F. Development of automated measurement systems for testing integrated circuits of switching converters, MWENT-2018, IEEE, Russia, Moscow, March 14-16, 2018. pp. 1-4.