

СИЛКИН Д. С.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕПОДАВАНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

Аннотация. В статье проведен теоретический анализ программ для схемотехнического моделирования в вузе и применение их на практике. Рассмотрены знания и навыки, необходимые специалисту в области моделирования электронных приборов и схем. Раскрыты особенности преподавания моделирования как прикладной дисциплины в вузе.

Ключевые слова: моделирование, электроника, высшая школа, компетенции, формы обучения.

SILKIN D. S.

TEACHING COMPUTER SIMULATION AT HIGHER SCHOOL

Abstract. The article reviews the software for electronic devices and circuits simulation used at higher schools. In this connection, the study considers the simulation knowledge and skills compulsory for an electronic engineer of the present day. Particularly, the author focuses on the specifics of teaching computer simulation at laboratory classes.

Keywords: computer simulation, electronics, higher school, skills, learning techniques.

Моделирование электронных приборов и схем – относительно молодое направление в электронике, получившее широкое распространение в последние десятилетия в связи с повсеместной компьютеризацией как в научной, так и в производственной сферах. Моделирование позволяет, используя численные приближённые вычисления, анализировать работу электрических схем. Такой подход позволяет инженеру проверить свои разработки и устранить ошибки ещё на стадии разработки прибора, не создавая дорогостоящих макетов. В связи с этим схемотехническое моделирование широко распространено среди разработчиков электронных схем.

В федеральном государственном образовательном стандарте высшего профессионального образования по направлению подготовки 210100 «Электроника и нанoeлектроника» владение программами моделирования электронных приборов и схем прописано среди общекультурных (ОК-10) и профессиональных (ПК-10 и ПК-19) компетенций бакалавра данной специальности [7]. Однако для того, чтобы грамотно смоделировать схему, мало знать лишь функции программы. Необходимо владеть целым рядом дополнительных знаний и навыков.

В первую очередь необходимо учитывать, что помимо общеизвестных уравнений теории цепей, позволяющих рассчитать мгновенные напряжения и токи на пассивных

элементах цепи, при моделировании применяются сложные системы уравнений, позволяющие описать работу активных элементов: диодов и транзисторов, в электрической цепи. Такие системы уравнений называются электрическими моделями активных приборов.

Электрические модели приборов подразделяются на поведенческие и физические. Поведенческие модели содержат системы уравнений, которые позволяют смоделировать работу прибора в схеме без учёта физических эффектов, в нём возникающих. Физические модели имеют в своей основе базовые уравнения физики полупроводниковых приборов, что позволяет им лучше моделировать специфические явления, повышая тем самым точность моделирования.

При моделировании того или иного устройства важно понимать возможности и ограничения используемых моделей. В том случае, если в модель не были заложены эффекты, значительные для данного применения, её использование может не дать достоверных результатов. С другой стороны, чем сложнее модель, тем дольше расчёт и тем больше вероятность появления ошибок во время моделирования. Использование таких моделей может сильно затруднить работу, если нужно, к примеру, провести большое число расчетов для построения каких-либо семейств характеристик или проведения выборки.

Сегодня существует немало программ для схемотехнического моделирования. Между собой они могут различаться как наличием специфических моделей приборов, так и функциональными возможностями, например, возможностью выполнять анализ шумов или устойчивости в схеме. Некоторые программы предоставляют возможность экспорта разработанной схемы в другие приложения для последующей работы, например, разводки на печатной плате. Для наиболее эффективного выполнения поставленной задачи специалист должен знать достоинства различных программ и уметь выбрать наиболее подходящую.

Большой распространённостью сегодня пользуются программы, основанные на симуляторе схем SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). SPICE был разработан в Electronics Research Laboratory в Калифорнийском университете в Беркли Лоуренсом Нагелем и его научным руководителем профессором Дональдом Педерсоном. SPICE1 был в значительной степени основан на более ранней программе CANCER [1], написанной Лоуренсом с другим научным руководителем, профессором Рональдом Рохером. Название программы расшифровывалось как «Computer Analysis of Nonlinear Circuits, Excluding Radiation» (Компьютерный анализ нелинейных схем, исключая радиацию), что было отсылкой к относительной свободе в Университете Беркли в 1960-х годах. В то время большая часть симуляторов электронных схем разрабатывалась по грантам и контрактам министерства обороны США, одним из требований которых была возможность оценки влияния радиации на работу схем. К программам, разработанным на базе SPICE

относятся Micro-Cap Software, NI Multisim Software, Cadence OrCAD Solutions, Altium Designer и др.

Одним из главных достоинств SPICE программ стала функция, позволяющая пользователю создавать собственные поведенческие модели в виде подсхем. Специалист может самостоятельно разработать из доступных моделей электрическую схему, описывающую поведение необходимого ему активного элемента.

Помимо знания моделей приборов и программ-симуляторов специалисту необходимо владеть также численными методами решения уравнений. Одной из главных проблем при моделировании сложных схем становятся ошибки сходимости, которых можно избежать, зная основы математических методов, используемых при расчёте схем в программах-симуляторах. Одним из таких методов является метод касательных, также известный как метод Ньютона-Рафсона.

Это итерационный метод, который требует наличия начального приближения и позволяет за некоторое число итераций добиться хорошей сходимости по вычисляемым напряжениям и токам. Метод Ньютона-Рафсона обладает свойством абсолютной сходимости, однако при этом должны быть выполнены следующие условия [2]:

- 1) Система нелинейных уравнений должна иметь решение;
- 2) Уравнения должны быть непрерывны;
- 3) Уравнения должны быть дифференцируемы;
- 4) Начальное приближение должно быть близко к решению.

Выполнение этих условий, как правило, обеспечивается тем, что:

1) Большинство реально работающих электронных схем описываются системой нелинейных уравнений, имеющих решение.

2) Уравнения, описывающие реальные физические цепи, непрерывны.

3) Условие дифференцируемости на практике выполняется в том случае, если изменение токов и напряжений в схеме происходит с крутизной, не превышающей некоего критического значения. Это означает, что при построении схемы необходимо оценивать скорость изменения токов и напряжений в ней и ограничивать их при необходимости.

Программы-симуляторы предоставляют возможность настраивать процесс расчёта, изменяя ряд опций для достижения большей точности и устойчивости вычислений. В программе OrCAD, одной из наиболее распространённых среди симуляторов, имеются следующие опции [3]:

- 1) RELTOL – относительная погрешность вычисления токов и напряжений;
- 2) VNTOL – абсолютная погрешность вычисления напряжения;
- 3) ABSTOL – абсолютная погрешность вычисления тока;

- 4) CHGTOL – абсолютная погрешность вычисления заряда;
- 5) ITL4 – максимальное количество итераций на одном временном шаге.

Кроме того, настройка может осуществляться изменением величины максимального временного шага $h_{\max}$. Знание этих опций и способность правильно определить их значение для конкретной задачи позволяет добиться точного и устойчивого расчёта, избежать ошибок сходимости.

Особое место среди программ, предназначенных для моделирования электроники, следует выделить для TCAD - Technology Computer Aided Design (приборно-технологическая система автоматизированного проектирования). В TCAD помимо электрических моделей включены также технологические и физико-топологические модели [5].

В технологических моделях в качестве исходных параметров выступают технологические режимы (температура, время диффузии и т.д.). К выходным параметрам относятся электрофизические параметры производимого прибора, такие, как поверхностная концентрация и время жизни носителей заряда.

Физико-топологические модели являются основой для автоматизированного проектирования полупроводниковых приборов. Исходные параметры для них – это геометрические размеры областей и физические характеристики р-п переходов и слоёв (профиль распределения примеси, подвижность носителей заряда и т.д.). Выходными являются электрические и эксплуатационные характеристики, такие как вольт-амперная характеристика, допустимые токи, токи утечки и т.д.

Разработка технологических и физико-топологических моделей приборов требует углублённых познаний в технологии производства и физике полупроводниковых приборов. Специалисту необходимо ясно представлять себе физический смысл каждого задаваемого параметра. Для грамотной работы с такими моделями мало знать математическое описание работы прибора. Здесь необходимы подробные знания о физике, представление о том, что и каким образом происходит в моделируемой структуре.

Таким образом, для успешной работы в области моделирования электроники специалист помимо владения программами-симуляторами должен обладать следующими знаниями и умениями:

- 1) Знанием достоинств и недостатков основных доступных программ-симуляторов, умением выбрать наиболее подходящую программу, исходя из поставленной задачи.
- 2) Знанием применяемых в симуляторах моделей активных приборов, умением оценивать их возможности и погрешности, умением выбирать модель в зависимости от требуемой точности.

- 3) Знанием основ численных итерационных вычислений, умением настраивать параметры моделирования для достижения точности и сходимости при расчёте схемы.

Как правило, основными формами обучения моделированию в высшей школе являются лекционные и лабораторные занятия. Следует отметить, что, несмотря на обилие необходимых для успешной работы теоретических знаний, моделирование в электронике относится скорее к практическим, прикладным дисциплинам. В связи с этим важно, чтобы студент мог в полной мере ощутить, как знания о моделях и численных методах помогают добиваться результатов на практике. Это стоит учитывать при организации лабораторных работ.

Поскольку большинство программ-симуляторов на сегодняшний день не имеют поддержку русского языка, для обучающихся, имеющих сложности с иностранными языками, на первый план при усвоении материала зачастую выходит зрительное восприятие и зрительная память, способность визуально запоминать последовательность действий, приводящую к нужному результату. Поэтому имеет смысл во время лекций, особенно тех, которые касаются непосредственной работы с программами-симуляторами, делать акцент на использовании графического материала, презентаций или обучающих видеороликов. В такой форме бывает очень удобно представлять структуру и возможности компьютерных программ, что открывает широкие возможности в области визуализации учебной информации [6].

Как уже было отмечено, моделирование в электронике является прикладной дисциплиной, поэтому наибольшая роль в её освоении должна отводиться закреплению практических навыков во время лабораторных работ. На лабораторных работах студент должен не только освоить все основные функции изучаемых программ-симуляторов, но и изучить возможные причины ошибок сходимости при моделировании, а также методы борьбы с ними. Также можно часть материала, касающуюся работы с интерфейсом программ-симуляторов, перенести с лекционных занятий на лабораторные при наличии технических возможностей, позволяющих преподавателю продемонстрировать студентам свои действия (например, подсоединив свой компьютер к проектору).

Также, в связи с прикладным характером моделирования, в преподавании данной дисциплины более чем уместен контекстный подход [4], который предполагает глубокое погружение обучаемого в профессиональную проблематику, активное использование примеров практических задач, а также вовлечение студента в их решение.

Подводя итоги, следует отметить, что для наиболее продуктивного применения моделирования на практике специалисту необходимы глубокие теоретические познания в

той области, в которой лежит поставленная перед ним задача. Нельзя добиться положительных результатов в попытке смоделировать сложную электрическую схему, не обладая познаниями в электротехнике, нельзя создать адекватную модель полупроводникового прибора без глубокого понимания принципов его работы. Поэтому обучающие курсы, связанные с моделированием, следует включать в программу не раньше, чем студент приобретёт фундаментальные знания в области электроники и физики твёрдого тела и полупроводниковых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nagel L., Rohrer R. Computer analysis of nonlinear circuits, excluding radiation (CANCER) // Solid-State Circuits, IEEE Journal. – 1971. – №4. – pp. 166–182.
2. Болотовский Ю., Таназлы Г. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2 (часть II) [Электронный ресурс] // Силовая электроника. – 2004. – №2. – URL: www.power-e.ru/pdf/2004_02_96.pdf (дата обращения: 30.11.2013).
3. Болотовский Ю., Таназлы Г. Способ определения значения ряда опций, задающих параметры численных методов в OrCAD [Электронный ресурс] // Силовая электроника. – 2005. – №3. – URL: www.power-e.ru/pdf/2005_03_114.pdf (дата обращения: 30.11.2013).
4. Вербицкий А. А. Активное обучение в высшей школе: контекстный подход: метод. пособие. – М.: Высш. шк., 1991. – 208 с.
5. Горячкин Ю. В., Нестеров С. А., Сурин Б. П. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD: учеб. пособие. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.
6. Лаврентьев Г. В., Лаврентьева Н. Б., Неудахина Н. А. Инновационные обучающие технологии в профессиональной подготовке специалистов (часть 2). – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www2.asu.ru/cppkp/index.files/ucheb.files/innov/Part2/> (дата обращения: 30.11.2013).
7. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 210100 «Электроника и наноэлектроника» (квалификация (степень) «бакалавр»). – [Электронный ресурс]. – URL: http://www.moeobrazovanie.ru/data/dir_specs_files/2583/dir_specs_2583.pdf (дата обращения: 30.11.2013).