

ПРЕДИСЛОВИЕ

Кому предназначена эта книга?

Данная книга посвящена вопросам моделирования компонентов ИС и полупроводниковых приборов для выполнения задач схемотехнического проектирования ИС. Она будет полезна всем тем, кому приходится иметь дело с различными сферами разработки и применения этих моделей:

- студентам, магистрам и аспирантам специальностей, связанных с разработкой и изготовлением полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;
- разработчикам интегральных микросхем и полупроводниковых приборов;
- потребителям полупроводниковых и микроэлектронных приборов;
- разработчикам и потребителям САПР в области электроники;
- системным интеграторам в области микроэлектроники и информационных технологий.

Содержание книги

Современный уровень развития микроэлектроники предъявляет новые требования к качеству подготовки специалистов. Это связано прежде всего с тем, что при переходе к электронике СБИС (*сверхбольших интегральных схем*) возрастает роль составляющей учебного процесса, связанной со схемотехническим и системным компонентами образовательного процесса [77–80].

В схемотехническую компоненту входят средства, предназначенные для моделирования компонентов и фрагментов СБИС на аналоговом уровне. Несмотря на доминирование в средствах проектирования СБИС цифровых методов моделирования, значимость схемотехнического моделирования с ростом степени интеграции изделий микроэлектроники не падает, а наоборот — возрастает. Это обусловлено следующим комплексом причин:

1. Переход полупроводниковой технологии в нанометровую область (минимальные размеры находятся в диапазоне 20–50 нм) привел к появлению множества новых электрических эффектов, которые ранее наблюдались только в аналоговых схемах и которые не могут быть учтены средствами упрощенного временного анализа. Поэтому при разработке даже цифровых СБИС уже нельзя обойтись только логическим моделированием. Требуется анализ

не только отдельных фрагментов, но и всей СБИС целиком на предельно детальном схемотехническом уровне с учетом всех паразитных элементов.

2. Бурный рост средств телекоммуникации, потребительской и автомобильной электроники, а также средств индустриальной автоматизации привели к тому, что уже в настоящее время порядка 50% всех проектируемых систем на кристалле (SOC) являются аналого-цифровыми, и ожидается, что их доля в ближайшем будущем достигнет 70%. Логические схемы, память и аналоговые блоки, которые ранее располагались в виде отдельных микросхем на печатной плате, теперь размещаются внутри одного кристалла. Верификация такой системы имеющимися средствами цифрового и системного моделирования стала невозможной.

3. Продолжается интенсивное развитие средств аналоговой техники, ведущие производители которой (Burr-Brown, Analog Devices, MAXIM, Motorola, Texas Instruments, National Semiconductor и др.) выпускают все новые и новые аналоговые элементы с уникальными характеристиками. Многие из этих микросхем предназначены для работы с аналоговыми сигналами в цифровых системах.

4. Последнее время отмечено бурным развитием силовой электроники, приведшей к появлению новых типов мощных ключевых элементов с уникальными характеристиками: IGBT- и MOSFET-транзисторов, тиристоров с управляемым затвором GTO и др. Указанные полупроводниковые приборы принципиально изменили подход к построению базовых схем промышленной электроники: управляемых выпрямителей, инверторов тока и напряжения. Построенные на них силовые каскады, которые управляются микроконтроллерами, требуют компьютерного анализа и тщательной проработки всех режимов. Иначе не обеспечить надежности, а надежность — главное для мощных схем.

В силу перечисленных причин резко возросла актуальность *точного схемотехнического моделирования*, которое еще 5–10 лет назад использовалось исключительно для моделирования аналоговых цепей или небольших фрагментов цифровых БИС.

Многообразие задач проектирования породило целый спектр систем схемотехнического моделирования. Общепризнанно, что максимальной точностью и достоверностью среди них обладают классические программы схемотехнического моделирования (так называемые SPICE-подобные СМ), которые включены в состав практических современных САПР электронных изделий. В них реализованы наиболее эффективные алгоритмы решения систем нелинейных дифференциальных уравнений без применения упрощающих предположений. Поэтому *достоверность результатов моделирования лимитируется в основном адекватностью используемых в них моделей компонентов СБИС*.

В указанных системах схемотехнического моделирования используется особый класс моделей полупроводниковых приборов и компонентов СБИС, известных как SPICE-модели. Они представляют собой универсальные нелинейные физические модели, на базе которых можно достаточно легко перейти к любой традиционной системе параметров моделей полупроводниковых

приборов, включая малосигнальные модели на базе z -, y - или h -параметров. Количество параметров, необходимых для описания таких моделей, определяется величиной топологической нормы, и для SPICE-моделей МОП-транзисторов, используемых в качестве элементной базы современных микропроцессоров и схем памяти, их число перевалило за сотню. Эти модели получили поддержку производителей микроэлектронных компонентов — в настоящее время большинство крупных зарубежных фирм-производителей наряду с традиционным способом представления параметров выпускаемых приборов дает в руки разработчиков их SPICE-модели.

Синтез SPICE-моделей осуществляется на базе традиционного подхода, основанного на математическом моделировании компонентов ИС с использованием элементарных алгебраических функций, обыкновенных дифференциальных уравнений и их решения численными методами. Для получения экономичной компонентной модели вводятся упрощающие допущения, которые неизбежно приводят к потере достоверности моделирования и возрастанию неопределенности в определении области ее допустимого применения. Выходом из этой ситуации является создание иерархии моделей компонентов, позволяющей достичь разумного компромисса между точностью и сложностью модели. Так, существующие на рынке SPICE-подобные СМ поддерживают более двадцати разновидностей SPICE-моделей одних только МОП-транзисторов.

Разработка точных моделей приборов составляет неотъемлемую часть современной индустрии производства СБИС. Это связано также с тем, что модели приборов крайне важны не только при проектировании и моделировании работы схем, но часто используются в качестве инструмента для оптимизации процесса производства. Поэтому поддержка доминирующих тенденций развития технологий производства СБИС, связанных с постоянной миниатюризацией, требует разработки адекватных моделей компонентов СБИС.

Повышение роли и значимости автоматизированных систем моделирования, оперирующих с моделями компонентов СБИС, нашло подтверждение в выпуске широкого спектра англоязычной литературы по этой тематике (см., например, [18, 23, 24, 32, 33, 39, 51]). К сожалению, этот процесс практически не отражен в отечественной технической литературе. В учебных планах радиоэлектронных специальностей также отсутствуют дисциплины, предоставляющие студентам и инженерам возможности знакомства с этим классом моделей.

В результате сегодня наблюдается разрыв между предметной областью, определяемой набором специальных дисциплин, и существующим программным обеспечением, в частности SPICE-подобными системами схемотехнического моделирования. Каждая из них существует практически сама по себе. Отчасти это связано с тем, что новые серьезные учебники в настоящее время практически не выпускаются. Попытка же удовлетворения имеющегося в микроэлектронике «информационного голода» путем переиздания ряда популярных учебников, изданных еще в доперестроечную эпоху (см., например, [10]), когда САПРы воспринимались как экзотика, не устраниет проблемы.

Другая причина такого положения заключается в том, что учебные планы специальностей по электронике отстают от современного состояния дел в промышленности и области проектирования. И, наконец, выпускаемые книги по САПР в микроэлектронике и радиоэлектронике (см., например, [11, 15]) скорее напоминают русифицированный Help или руководство пользователя, они слабо связаны со схемотехникой и элементной базой микроэлектроники.

По нашему мнению, наиболее эффективный способ знакомства с этим классом моделей — введение соответствующих разделов в специальные дисциплины, предназначенные для изучения физики работы полупроводниковых приборов и компонентов ИС. Тем более что такой подход не потребует кардинального изменения технологии изложения этих дисциплин, поскольку, как уже отмечалось, SPICE-модели представляют собой не формальные, а физические модели, структура и параметры которых определяются физикой работы прибора.

Данная книга может также рассматриваться как дополнительное учебное пособие по ряду традиционных дисциплин, используемых в соответствующих учебных программах подготовки специалистов в следующих областях:

- микроэлектроника;
- радиоэлектроника;
- измерительная техника;
- информационная техника.

Как составлена книга

Данная книга содержит девять глав и одно приложение.

Глава 1. САПР, СМ, модели. В отличие от последующих глав, нацеленных в основном на изучение физических процессов, лежащих в основе моделирования различных компонентов СБИС с целью создания их SPICE-моделей, эта глава представляет собой введение в системы автоматизированного проектирования (САПР), используемые для проектирования изделий электроники. Ее назначение — дать представление об основных этапах имитационного проектирования изделий микроэлектроники и широкого класса поддерживаемых ими моделей, что позволит понять роль и место схемотехнического этапа проектирования и используемых для его реализации основных типов моделей компонентов.

Глава 2. Введение в СМ SPICE. Эта глава предназначена для начального знакомства с системой схемотехнического моделирования SPICE, которая оперирует специальным классом моделей, предназначенных для оценки качества схемных проектов. Анализу и синтезу этих моделей посвящена основная часть данной книги. Их основное отличие от большинства моделей, рассмотренных в первой главе, — физичность.

Здесь рассмотрены две коммерческие версии СМ SPICE: PSPICE, получившая наибольшее распространение в нашей стране, и AIM-SPICE — относительно новая версия, к достоинствам которой можно отнести поддержку широкого спектра моделей новых компонентов: гетеробиполярного транзистора, полевого транзистора на гетеропереходе, двух вариантов тонкопленочного полевого транзистора и ряда универсальных моделей МОП-транзи-

сторов. Дополнительным достоинством отмеченных СМ является наличие бесплатно распространяемых полнофункциональных учебных версий, что делает их удобными для использования в учебном процессе.

Глава 3. Механизмы переноса носителей заряда в полупроводниках. Назначение данной главы — дать краткое введение в основные характеристики полупроводниковых материалов и фундаментальные уравнения, описывающие процессы переноса носителей заряда в полупроводниках. Они используются для синтеза SPICE-моделей полупроводниковых приборов, без которых невозможно выполнение адекватного моделирования компонентов ИС, и реализации на их базе последующего имитационного моделирования схем.

Эта информация важна для понимания связи параметров моделей приборов, используемых в системах схемотехнического моделирования, с различными характеристиками полупроводниковой структуры и атрибутами материала.

Глава 4. Компоненты с двумя выводами. Здесь рассматриваются принципы моделирования компонентов с двумя выводами, которые широко используются как в дискретном исполнении, так и в качестве компонентов интегральных схем. Они также входят в состав более сложных полупроводниковых приборов в форме разнообразных структурных блоков. Их основу составляют различные типы переходов, включая гомогенные переходы между различными областями одного и того же полупроводникового материала, отличающихся типом электропроводности и уровнем легирования; гетеропереходы на базе разных полупроводников; различные типы переходов «металл–полупроводник», используемых в качестве омических контактов и диодов Шоттки; переходы «полупроводник–диэлектрик». Для каждого из перечисленных типов переходов рассмотрены протекающие в них физические процессы, используемые для синтеза соответствующих им SPICE-моделей, и варианты реализации этих моделей в СМ на примере AIM-SPICE.

Глава 5. Биполярные транзисторы. Назначение этой главы — дать введение в основные процессы, протекающие в биполярном транзисторе с целью получения математических выражений, используемых при расчете параметров SPICE-моделей двух типов биполярных транзисторов — традиционного, реализованного на базе гомогенных переходов, и гетероструктурного, содержащего один или два гетероперехода.

Глава 6. Полевые транзисторы. Данную главу можно рассматривать как обзор и введение в физические принципы работы различных типов полевых транзисторов. Наряду с классическим ПТ на базе структуры «металл–окисел–полупроводник» (МОП) здесь рассмотрен ряд новых типов ПТ: на базе структуры «металл–полупроводник» — МЕППТ (ПТШ), на гетероструктуре (ГПТ) и тонкопленочные на аморфном (α -Si:H) и поликристаллическом кремнии.

Для каждого из перечисленных типов ПТ выполнен анализ и сравнение базовых моделей. В случае МОП-транзистора это модели, базирующиеся на приближении плавного канала (GCA): простая зарядоуправляемая модель (SCCM или модель Шихмана–Ходжеса), модель Мейера (ММ) и модель, учитывающая насыщение скорости дрейфа (VSM). Для ПТШ — модель Шокли и модели, учитывающие насыщение скорости дрейфа. Для ГПТ — простая зарядоуправляемая модель.

Приведены также различные SPICE-варианты реализации перечисленных базовых моделей в СМ SPICE и AIM-SPICE.

Глава 7. Универсальные модели полевых транзисторов. В этой главе изложена концепция, используемая для синтеза универсальной модели ПТ, которая базируется на модифицированном варианте зарядоуправляемой модели. При этом под термином «универсальная» понимается возможность использования ее для моделирования нескольких типов ПТ. По сравнению с базовыми моделями в ней учтен ряд дополнительных эффектов, характерных для короткоканальных приборов, включая насыщение дрейфовой скорости, зависимость подвижности от напряжения затвора, ударную ионизацию, последовательные сопротивления стока и истока, модуляцию длины канала, DIBL-эффект и др.

Важной особенностью таких моделей является использование в них непрерывных аналитических выражений, описывающих ВАХ и ВФХ для всего диапазона работы прибора, что исключает появление разрывов производных при использовании численных методов расчета. К достоинству универсальных моделей следует также отнести использование относительно небольшого числа подгоночных параметров, экстрагируемых из экспериментальных данных.

Указанные свойства делают универсальную модель пригодной для моделирования различных типов субмикронных ПТ, включая МОП-транзисторы, ГПТ, ПТШ на GaAs и тонкопленочные на базе аморфного и поликристаллического слоев кремния. Для каждого из перечисленных типов ПТ рассмотрены варианты их реализации в СМ AIM-SPICE.

Глава 8. Руководство пользователя AIM-SPICE. Данная глава выполняет функции руководства по работе с системой моделирования схем — AIM-SPICE (Automatic Integrated Circuit Modeling Spice). Эта программа базируется на популярной СМ SPICE, являющейся де-факто стандартом в области моделирования и расчета электронных и интегральных схем. Здесь приведена основная информация относительно базовых возможностей версии 3e.1 программы SPICE, которая полностью аккумулирована в СМ AIM-SPICE, а также рассмотрены дополнительные возможности, предоставляемые AIM-SPICE.

Параграф 8.2 «Приложение AIM-Postprocessor» можно рассматривать как путеводитель по дополнительному приложению — графическому постпроцессору AIM-Postprocessor, поставляемому в составе AIM-SPICE. Это приложение предоставляет дополнительные возможности для работы с результатами моделирования как с целью получения дополнительной информации, так и для приведения их к виду, наиболее информативному для презентации и публикации.

Глава 9. Справочное пособие по AIM-SPICE. В этой главе приведена справочная информация о параметрах встроенных моделей компонентов, источников сигналов и управляющих операторах, предназначенных для настройки рабочего пространства СМ AIM-SPICE.

Приложение. Принципы масштабирования МОП-транзисторов. В этой части книги приведено приложение, предназначенное для знакомства с технологией масштабирования, широко используемой на этапе проектирования ИС с целью оценки влияния изменения топологической нормы на параметры МОП-транзисторов.

Используемые в книге обозначения

В книге главным образом использована оригинальная англоязычная терминология. В основной части книги это англоязычные термины и названия параметров моделей компонентов ИС. В главах 8 и 9, посвященных описанию СМ AIM-SPICE, английские названия команд, инструментов, окон диалога и их параметров сопровождаются соответствующими русскоязычными аналогами, часть из которых дана в соответствии с устоявшейся терминологией [11, 15], другая является переводом авторов.

Такой подход не является новым, он отражает тенденцию, наметившуюся в последнее время в издании серьезной отечественной литературы по микроэлектронике (см., например, [20, 21]), что обусловлено в основном двумя причинами:

- подавляющее большинство оригинальных разработок в области технологии, схемотехники и системотехники СБИС выполнено за рубежом, что нашло отражение в бесчисленном количестве соответствующих англоязычных публикаций;
- координирующая политика государственных структур в выработке стандартов в области терминологии отсутствует. Ранее эта проблема отчасти решалась путем выпуска большого количества переводов и рефератов наиболее актуальных публикаций и реферируемых специализированных периодических изданий типа «Электроника» и «ТИИЭР», представлявших оперативные переводы наиболее популярных и информативных зарубежных периодических изданий, в которых затрагивались различные аспекты производства и проектирования изделий микроэлектроники.

Как уже отмечалось, с расширением сферы применения схемотехнических СМ специалисты из многих областей знаний (микроэлектроники, радиоэлектроники, измерительной техники и информационных технологий) оказались вовлеченными в процесс работы с ними, не обладая достаточными представлениями о предмете. В основном это касается параметров SPICE-моделей компонентов ИС. Хотя сегодня имеется ряд книг по SPICE-образным СМ, в них предполагается, что пользователь уже знаком с терминологией и техническим материалом, лежащим в их основе. Поэтому, наряду с изложением теоретического и практического материала, одной из основных задач данной книги является акцентирование внимания на разъяснении смысла оригинальных англоязычных терминов и понятий.

Отличительной чертой книги является наличие большого количества примеров, демонстрирующих влияние учета различных нелинейных эффектов как на характеристики самих моделируемых приборов, так и на параметры проектируемых на их базе схем. Следует отметить, что эти упражнения в большинстве случаев сами по себе несут смысловую нагрузку. Они не просто иллюстрируют учет того или иного эффекта, а предлагают методические приемы использования СМ SPICE для их имитации и визуализации.

Выполнение приведенного в книге комплекса примеров позволит читателю освоить основные приемы и методики схемотехнического проектирования ИС. Последнее утверждение основывается на том, что представленные в ней программы, в частности AIM-SPICE и PSPICE, базируются на общем

для всех SPICE-образных СМ ядре. Поэтому многие идеи и алгоритмы, представленные в них, являются программно независимыми, что позволяет применить раскрываемые с их помощью технологии для большинства имеющихся на рынке СМ.

Авторы надеются, что книга будет полезна широкому кругу пользователей САПР, разработчикам и пользователям изделий радиоэлектроники и микроэлектроники, студентам, магистрам и аспирантам высших учебных заведений, поскольку ее содержание базируется на многолетнем опыте преподавания дисциплин, связанных с моделированием и проектированием полупроводниковых приборов в высшей школе.

В книге можно также встретить множество специальных указателей и элементов оформления, которые способствуют быстрому поиску нужной информации.

Новые термины оформляются курсивом, например: *кремний на изоляторе, тактовая частота, дельта-легирование, аппроксимация плавного канала*.

Клавиши на клавиатуре, пункты меню, названия панелей инструментов, окон диалога, вкладок, полей, опций и других элементов окон диалога и т. п., встречающихся в тексте глав книги при описании выполняемых с помощью программы AIM-SPICE примеров, а также при изложении приложений, выделяются следующим шрифтом: Ctrl, F3, File (Файл), Analysis (Анализ), Transient Analysis (Анализ переходного процесса), Y Axis Format (Форматирование оси Y), OK, Legends (Маркеры).

Выражение «выберите Control ▶ Exit Analysis Mode (Управление ▶ Выйти из режима анализа)» означает, что нужно открыть меню Control (Управление) и в этом меню выбрать команду Exit Analysis Mode (Выйти из режима анализа).

Если в тексте встречаются два обозначения клавиш, между которыми стоит знак плюс (например, Ctrl+E), то это означает, что сначала нажимают и удерживают первую клавишу, затем нажимают вторую, после чего отпускают обе.

В книге есть множество особых вставок. В них содержится дополнительная информация, облегчающая чтение и восприятие информации.

Примечание. Данные врезки акцентируют внимание на информации, которая выходит за рамки книги, но необходима для углубленного понимания рассматриваемого вопроса.

Совет. Это просто подсказки, сообщение о том, как можно эффективнее выполнить ту или иную операцию или группу операций при выполнении практических примеров.

Внимание. Предупреждения указывают на опасности, связанные с теми или иными критическими или ошибочными действиями.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

САПР, СМ, МОДЕЛИ

ВВЕДЕНИЕ

Сложность современных СБИС, содержащих десятки и сотни миллионов компонентов, делает их проектирование традиционными (ручными) методами с обязательным изготовлением макета практически невозможным.

Именно по этой причине резко возрос интерес разработчиков СБИС и электронной аппаратуры к системам автоматизированного проектирования (САПР) и входящим в их состав системам моделирования (СМ). Об этом можно судить по количеству вложенных в них развитие средств, которое, по зарубежным оценкам, превышает годовой оборот такого гиганта, как фирма Intel (расходы Intel только на разработки в 2003 г. составили около 4,3 млрд долларов США).

Сегодня источником успехов полупроводниковой промышленности в первую очередь является сфера проектирования полупроводниковых изделий. Так, крупнейшая фабрика проектирования СБИС — Силиконовая Долина (США, Калифорния) — не имеет на своей территории полупроводниковых заводов, занимаясь исключительно научноемкими разработками и проектированием.

Это связано с относительно новым явлением в полупроводниковой промышленности — появлением в начале 1990-х годов полупроводниковых компаний, не имеющих собственных полупроводниковых заводов (*Fabless companies*), которые обеспечивают полный бизнес-цикл изделия от идеи до продажи, исключая только изготовление кристаллов, которое выполняется по контракту с «кремниевыми мастерскими». Отсутствие собственных заводов позволяет компании сосредоточить усилия на проектировании и новых разработках.

Из «старой гвардии» сегодня только Intel, IBM, Infineon, AMD, Texas Instruments и Samsung владеют собственными действующими фабриками по производству микросхем на трехсотмиллиметровых подложках. Другие создаются и управляются совместно объединениями компаний, например «Motorola — Philips — STMicroelectronics — Taiwan Semiconductor». Несомненным лидером в планах постройки новых фабрик является Тайвань. Уже в 2001 г. на острове была изготовлена пятая часть всех произведенных в мире

подложек, а к 2010 г. эта доля может достичь 40%. «На пятки» Тайваню наступают Китай, Малайзия и Сингапур — они планируют построить 15 фабрик, пять из которых будут работать на трехсотмиллиметровых пластинах.

В соответствии с наметившейся тенденцией на современном этапе можно выделить два основных направления развития индустрии производства микросхем:

1. Разработка архитектуры, включающая в себя выбор тех или иных функций и особенностей будущих схем, микросхемотехнику и компоновку на кристалле функциональных блоков и их элементов, которые воплощают выбранные функции. Оптимизация готовых блоков с целью устраниния узких мест, повышения производительности и надежности работы будущих схем, упрощения и удешевления их массового производства. Эти работы можно условно назвать «бумажными» — они выполняются «на кончике пера» и существуют лишь в виде компьютерных файлов и чертежей проектов будущих микросхем, что отнюдь не исключает многократного компьютерного моделирования физической работы как отдельных блоков, так и микросхемы в целом. Для этого используются специальные, тщательно согласованные с реальными приборами физические модели транзисторов и других функциональных элементов. Чем тщательнее смоделирована работа проекта, тем быстрее и с меньшими ошибками будет изготовлена сама микросхема (имеется в виду ее финальный, массовый вариант). Ведь отладка, поиск и исправление ошибок проектирования в уже готовом кристалле, как правило, значительно сложнее и дороже, чем моделирование на компьютере.

2. Собственно полупроводниковые технологии производства микросхем, реализованные с помощью кремниевых мастерских. Сюда входят научная разработка и воплощение в «кремний» все более быстродействующих и миниатюрных транзисторов, цепей связи между ними и прочим «обрамлением» микроструктур на кристалле, создание технологий изготовления рисунка линий и транзисторов на поверхности кремния, новых материалов и оборудования для этого, а также «manufacturability» — области знаний о том, как производить микросхемы более высокого качества, более быстрые, с большим количеством годных кристаллов на пластине, меньшим числом дефектов и разбросом рабочих параметров.

Качество технологии и проектирования характеризуется:

- количеством циклов устранения ошибок, допущенных при проектировании;
- процентом параметрического брака в изготовленных изделиях;
- размером кристалла;
- качественными показателями полученного изделия.

Примечание. Следует отметить, что требования к качеству проектирования постоянно возрастают. Это вызвано не только естественными требованиями рыночной конкуренции, но также применением полупроводников в областях, связанных с жизнеобеспечением человека, с искусственными органами, с космической и военной техникой.

САПР и ее неотъемлемая часть — *автоматизированные системы моделирования* (АСМ) — умеют сейчас очень многое. Они позволяют проверять не только правильность работы проектируемого устройства, но и выяснить его основные характеристики начиная с самых первых шагов, когда прорабатываются только архитектурные решения будущего проекта, и заканчивая реализацией в «кремнии».

В основу современных САПР заложены две концепции: *имитационное моделирование* и *многоуровневое (иерархическое) проектирование*. Каждое из них в свою очередь базируется на понятиях модели и системы. Их раскрытию будут посвящены следующие параграфы данной главы.

1.1. СУТЬ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для имитации различных процессов и операций (т. е. их моделирования), выполняемых реальными устройствами, при проектировании сложных изделий (каковыми являются СБИС) широко используются компьютерные технологии. Устройство или процесс обычно именуют *системой*. Для научного исследования системы прибегают к определенным допущениям, касающимся ее функционирования. Эти допущения, как правило, имеющие вид математических или логических соотношений, составляют модель, с помощью которой можно получить представление о поведении системы.

Если соотношения, которые образуют модель, достаточно просты для получения точной информации по интересующим нас вопросам, то можно использовать математические методы. Такого рода решение (модель) называется *аналитическим*. Однако большинство существующих систем являются очень сложными, поэтому для них невозможно создать реальную модель, описанную аналитически. Такие системы следует изучать с помощью моделирования или собственно *имитационного моделирования*. Согласно словарю Вебстера (Webster's New Collegiate Dictionary) *имитировать* — значит «вообразить, постичь суть явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте».

На самом деле, каждая модель представления объекта есть форма имитации. Существует много определений понятия имитационного моделирования. Здесь мы приведем одно из них [3], наиболее полно отражающее, на наш взгляд, его смысл и назначение.

Имитационное моделирование есть процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы.

Под *моделью* реальной системы в данном случае понимается представление группы объектов или идей в некоторой форме, отличной от реального воплощения.

Таким образом, процесс *имитационного моделирования* понимается как процесс, включающий и конструирование модели, и применение модели для изучения некоторой проблемы.

Сегодня имитационное моделирование является экспериментальной и прикладной методологией, используемой для анализа существующих объектов и создания новых, не существующих в природе (как СБИС). В отличие от большинства технических методов, которые могут быть классифицированы в соответствии с научными дисциплинами, в которые они уходят своими корнями (например, с физикой или химией), имитационное моделирование применимо в любой отрасли науки.

С помощью имитационного моделирования решаются две глобальные задачи:

- исследование (изучение, анализ) естественных материальных объектов и процессов;
- проектирование (разработка, синтез) искусственных материальных объектов и процессов.

В процессе исследования или проектирования могут ставиться более конкретные цели и задачи, такие как:

- выбор оптимального варианта решения;
- усовершенствование базового варианта решения;
- прогноз;
- планирование;
- управление;
- обучение.

1.2. МОДЕЛИ

Основу имитационного моделирования составляют *модели*. Знание особенностей моделей, методов и алгоритмов решения проектных задач необходимо инженеру для постановки задач, для правильной формулировки исходных задач и интерпретации получаемых результатов, а также при принятии решения об использовании тех или иных компонентов математического обеспечения в процессе решения проектных задач.

При проектировании СБИС модели используются в различных *системах моделирования* (СМ), которые являются неотъемлемой частью большинства САПР. В нашей стране в среде разработчиков и сотрудников учебных заведений наибольшее распространение получили схемотехнические СМ, входящие в программные пакеты PCAD, OrCAD и PSpice (DesignLab).

СМ фактически заменяет натурный (физический) эксперимент имитационным экспериментом (имитационным моделированием), который выполняется на компьютере. Вместо фрагментов реальных микросхем используются их программные модели, которые соединяются между собой связями, диктуемыми структурой фрагмента схемы на используемом уровне абстракции.

Результаты испытаний часто представляются в виде временных диаграмм. Однако, в отличие от натурного эксперимента, они контролируются не осциллографом, а выводятся на экран монитора. Другими словами, создается полная иллюзия, что вы работаете с реальным объектом или его дейст-

вующим макетом. Этот эффект в иностранной литературе носит название *virtual reality* (виртуальная реальность).

Модель — это физическая или абстрактная система, адекватно (правдоподобно) представляющая собой объект исследования или проектирования в форме, отличной от его реального существования.

1.2.1. СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ

В основе построения моделей лежит использование набора аксиом, которые принимаются «на веру» и не требуют доказательств. Приведем основные из них [6]:

1. Модель не существует сама по себе, а выступает в tandemе с некоторым материальным объектом, который она представляет (замещает) в процессе его изучения или проектирования.

2. Для естественных материальных объектов модель вторична, т. е. появляется как следствие изучения и описания этого объекта (например, модель солнечной системы).

Для искусственных материальных объектов (создаваемых человеком или техникой, какой в нашем случае является интегральная схема) модель первична, так как предшествует появлению самого объекта (например, модель микропроцессора, модель АЛУ).

3. Модель всегда проще объекта. Она отражает только некоторые его свойства, а не представляет объект «во всем великолепии». Для каждого объекта можно построить целый ряд (иерархию) моделей, отражающих его поведение или свойства с разных сторон или с разной степенью детальности. При бесконечном повышении качества модели она приближается к самому объекту.

4. Модель должна быть подобна тому объекту, который она замещает, т. е. модель в определенном смысле является копией, аналогом объекта.

Если в исследуемых ситуациях модель ведет себя так же, как и моделируемый объект, или это расхождение невелико и устраивает исследователя, то говорят, что модель *адекватна* оригиналу.

Адекватность — это, в данном случае, воспроизведение моделью с необходимой полнотой и точностью всех свойств объекта, существенных для целей данного исследования.

5. Построение модели не самоцель. Она строится для того, чтобы можно было экспериментировать не с самим объектом, а с более удобным для этих целей его представлением, называемым моделью.

Экспериментирование с моделью, «игра», позволяет добыть информацию о поведении и свойствах исследуемого объекта, не подвергая его опытам. Тут обнаруживается «великая сила моделирования»: сложный, длительный, дорогой (а иногда и просто невозможный) физический эксперимент с реальным объектом заменяется более простым, быстрым и дешевым экспериментом с его моделью.

С моделью можно экспериментировать сколько угодно и как угодно, помещая ее в любые условия, не опасаясь катастрофических последствий опыта (пограничные и предельные испытания).

При проектировании *новых технических объектов* моделирование (т. е. построение и последующее испытание модели) позволяет выявить работоспособность и качество работы проектируемого объекта до его физического воплощения.

Конечно, за все приобретения надо расплачиваться: платой за простоту, скорость и дешевизну модельного эксперимента является некоторая потеря точности и надежности получаемых результатов. Следует, правда, заметить, что эти потери поддаются контролю со стороны разработчика модели.

6. При моделировании сложных технических объектов следует, по возможности, выбирать самый высокий уровень иерархии, при котором еще достижима желаемая точность. Такое моделирование называется *высокоуровневым*.

1.3. ИЕРАРХИЯ СБИС И УРОВНИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Материальный мир склонен к иерархии. Это значит, что любой объект можно представить как совокупность взаимодействующих частей, которые, в свою очередь, состоят из более мелких деталей. Так, проводя аналогию с третьим поколением ЭВМ применительно к СБИС, последние можно разбить на блоки, те, в свою очередь, — на устройства, устройства — на узлы, узлы — на элементы, элементы — на компоненты, компоненты — на топологические фигуры (рис. 1.1).

Примечание. Такой подход к проектированию СБИС известен также, как блочно-иерархический [1].

Суть блочно-иерархического (структурного) подхода состоит в том, что сложная задача большой размерности разбивается на последовательно решаемые группы (уровни абстракции) задач меньшей размерности, причем внутри групп входящие в них задачи могут решаться параллельно (рис. 1.1).

Графически иерархию объектов (иначе абстрактных представлений) можно представить в виде усеченной пирамиды. Расширение ее книзу означает увеличение степени детализации, рост количества примитивов, которые

должны обрабатываться при изучении или проектировании. На высшем уровне используется наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих уровнях степень рассмотрения подробностей возрастает, при этом система рассматривается не в целом, а отдельными блоками. Такой подход позволяет на каждом уровне формулировать и решать задачи приемлемой

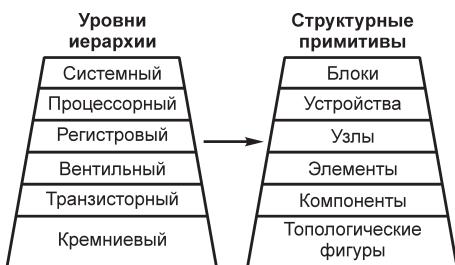


Рис. 1.1
Иерархия этапов проектирования СБИС и соответствующих им примитивов

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru