

*Proceedings of The Second International Conference  
New Information Technologies in Education*

***NITE '96***



Belarusian and Polish Centres  
in Development



*Труды Второй международной конференции*

***НОВЫЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
В  
ОБРАЗОВАНИИ***

Ноябрь 12-13, 1996

*Том II*

Минск  
Республика Беларусь

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЯХ

## СОВРЕМЕННОМУ УРОВНЮ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ - СООТВЕТСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРА-ЛОГИКА

ЗОЛОТОРЕВИЧ Л.А.

Беларусь, 220050, г. Минск, ул. Бобруйская, 7, Белгосуниверситет, факультет прикладной математики и информатики, НИЛ математического моделирования в электронике, т. 26-58-81.

Рассматриваются особенности подготовки специалистов для работы в областях интегральной схемотехники, цифровой электроники, разработки и эксплуатации САПР микроэлектроники, приводятся некоторые результаты, полученные в данном направлении в Белгосуниверситете. Отставание отечественной компьютерной техники, интегральной схемотехники, являющихся стратегическими направлениями развития промышленности стран Запада, в большой степени обусловлено недостаточным уровнем подготовки специалистов для работы в данных областях. Особенностью указанных направлений является высокая наукоемкость, большая потребность применения математического моделирования на всех стадиях проектирования устройств и разработки средств их тестового диагностирования. Проектирование современной сложности логической СБИС доступно специалисту, обладающему не только знаниями в области физики процессов, но и умеющему правильно оценивать степень адекватности разных математических моделей реальному процессу в устройстве, так как математическое моделирование в интегральной схемотехнике является единственным инструментом для исследования проекта.

Рассматриваются вопросы анализа точности математических моделей и области их практического применения.

Происходивший весьма активно в последние пять лет процесс компьютеризации всех отраслей народного хозяйства предоставил большие возможности для внедрения современных технологий и дал толчок развитию информатики как науки, предметом которой являются процессы, методы и системы получения, хранения, передачи, распространения, использования и преобразования информации [1]. Казалось бы, что наиболее простым, естественным и первоочередным является эффективное использова-

ние возможностей современных ЭВМ для создания высоких технологий в области проектирования и производства самих же ЭВМ. На самом же деле разработка высоких технологий проектирования ЭВМ тесно взаимосвязана с процессом разработки технологий проектирования в микроэлектронике, причем каждый из этих процессов многогранен, алгоритмически сложен, ряд задач, требующих практического решения, необходимо дополнительно исследовать с точки зрения создания более точных моделей, повышения эффективности используемых методов и алгоритмов. Решение указанных задач доступно лишь специалистам, владеющим в определенной степени как знаниями в области физики полупроводников, так и в ряде областей информатики, таких как теория алгоритмов, алгебра логики, теория структур данных, теория баз данных, математического моделирования, теория программирования, искусственный интеллект и др. (специалиста, обладающего указанной базой знаний, иногда принято называть инженером-логиком). Заметим, что для подготовки квалифицированного инженера-логика современный уровень компьютеризации предоставляет большие, но, к сожалению, не используемые в полной мере на данном этапе возможности. Поэтому специалист, обладающий знаниями в области физики полупроводников чаще всего плохо работает с моделями реальных объектов, а специалисты, обладающие необходимой теоретической подготовкой в областях математических методов и программирования, теории моделирования с трудом настраиваются на решение реальных задач проектирования и, в частности, моделирования изделий микроэлектронной техники.

Рассмотрим основные направления использования возможностей современных ПЭВМ в процессе обучения. Первое и наиболее распространенное - использование информационных

систем на базе ПЭВМ, обеспечивающих оперативный поиск и обращение к источникам необходимой информации по различным интересующим предметам. Второе - использование обучающих систем, ориентированных на изучение языков программирования, операционных систем и оболочек к ним, баз данных, то есть на изучение инструментальных средств универсального характера. Третье - использование учебных средств, ориентированных собственно на подготовку специалиста в заданной предметной области, в данном случае на подготовку инженера-логика [2], а также применение средств проектирования промышленного назначения.

Необходимо отметить, что подключение к международной информационной сети не может решить в полной мере задачи оперативного доступа к необходимой информации ввиду ее неполноты или отсутствия. Отечественные информационные системы практически отсутствуют. Наиболее развитым направлением в настоящее время является использование обучающих систем универсального назначения. Достаточно широко используются программные средства для изучения языков программирования, иностранных языков, оболочек операционных систем, текстовых и графических редакторов. При этом применяются как отечественные средства, так и ряд зарубежных продуктов, к сожалению, часто нелегального вида. Изучение и последующее использование программных средств универсального характера позволяет существенным образом повысить уровень использования ЭВМ при решении на ней задач общего назначения: при создании баз данных и систем управления ими, при ведении издательской деятельности и т.д. В то же время для использования ЭВМ при обучении специалистов в конкретной предметной области, в частности, при подготовке специалиста для работы в области САПР микроэлектроники необходима разработка соответствующих как информационных, так и учебных систем, созданных на основе программных средств промышленного назначения.

Рассмотрим особенности подготовки инженера-логика-специалиста для создания САПР микроэлектроники или применения подобных современных зарубежных комплексов при разработке новых проектов логических СБИС. Следует отметить, что в динамично развивающихся наукоемких отраслях, таких как микроэлектроника, и теоретическая, и практическая

базы для подготовки специалистов быстро устаревают и требуют постоянного обновления. Что касается собственно предметной области САПР микроэлектроники, то подобная база первоначально была развита крайне недостаточно. Так до настоящего времени отсутствуют монографии, тем более учебники с изложением известных и применяемых на практике методов построения математических и программных моделей изделий микроэлектронной техники, их сравнительным анализом с точки зрения точности получаемых моделей, эффективности моделирования, с результатами исследований областей их наиболее эффективного применения. Знания в указанной области складываются из разрозненных идей и результатов, с которыми можно ознакомиться только по публикациям в отечественных и зарубежных периодических изданиях. В сложившейся обстановке в республике оказалось очень мало специалистов, которые способны грамотно интерпретировать результаты моделирования проекта, выбрать нужный на соответствующем этапе проектирования метод моделирования, обеспечить максимальный уровень автоматизации процесса проектирования и соответственно ускорить момент запуска изделия в серию. В подобных условиях особенно остро встает задача создания современной компьютерной технологии для подготовки инженера-логика (СКОПИЛ). Для создания такой системы в Белгосуниверситете имеется как научный, так и практический задел.

Система включает информационную среду и обеспечивает оперативное получение необходимой информации как теоретического, так и практического характера по любому разделу, относящемуся к предметным областям микроэлектроники, устройств цифровой электроники, методов и средств автоматизированного проектирования, математического моделирования и др. Информация должна быть достаточно полной и хорошо структурированной. По каждому направлению должны быть разработаны учебные курсы на основе программных средств решения задач конкурентоспособными методами, средства контроля освоения материала. Целесообразно, чтобы подобные компьютерные технологии интегрировали как средства проектирования производственного назначения, так и основанные на их базе средства для подготовки специалистов.

Рассмотрим более детально проблемы подготовки специалиста в предметной области, со-

ответствующей иерархическому моделированию изделий микроэлектроники, и, в первую очередь, моделированию цифровых устройств на функционально-логическом и функционально-переключательном уровнях. В соответствующем разделе информационной подсистемы системы СКОПИЛ содержится структурированная информация по методам математического моделирования микроэлектронных устройств в соответствии с рис. 1. Эта подсистема выполняется по правилам построения информационно-поисковых систем и обеспечивает оперативное обращение к любому блоку с описанием интересующего метода. В учебной подсистеме имеются средства, позволяющие построить программные модели любого устройства по конкурентоспособным методам, сравнить эффективность и точность получаемых моделей, определить области их наиболее эффективного применения.

Известно, что при проектировании современных логических СБИС приходится решать различные задачи анализа проекта на каждом этапе проектирования. Проектирование логически сложных СБИС на системном уровне до настоящего времени автоматизировано крайне недостаточно. Функционально-логический уровень проектирования также автоматизирован далеко не полностью. Это существенно увеличивает вероятность внесения ошибок, сопутствующих включению человека в процесс проектирования в условиях больших размеров проектируемых объектов. В связи с этим требуется тщательное исследование проекта на всех стадиях проектирования, применение программных имитационных моделей, обеспечивающих требуемую точность моделирования.

Отладка логики функционирования схемы, полученной на этапе структурного или функционально-логического проектирования, первоначально осуществляется на алгоритмически простых программных моделях и по мере отлаженности проекта и перехода к так называемому уровню электрической схемы - на более сложных динамических моделях, позволяющих анализировать функционирование проектируемого устройства в непрерывном спектре значений задержек составляющих компонентов, зависящем как от конструктивно-технологических факторов, так и от дестабилизирующего воздействия внешней среды.

Рассматривая, акценты в использовании фрагментов учебной системы СКОПИЛ при изучении таких ветвей дискретной математики

как булева алгебра, теория конечных автоматов, сети Петри, многозначные алгебры, теория графов и др. и методов математического логико-динамического моделирования цифровых устройств на функционально-переключательном уровне, основанных на указанной выше математической базе.

### 1. Изучение точности булевых моделей и областей их применения для верификации проектов и генерации тестов цифровых устройств.

Наиболее простым методом логического моделирования, +применяемым на начальном этапе верификации проекта, является метод квазистатического двоичного моделирования. Основная область применения - верификация структурных схем комбинационного типа. Двоичное моделирование можно применить косвенным образом для анализа логики функционирования последовательностных схем. Метод основан на описании компонентов моделируемой структуры булевыми функциями. На рис.2,а приведена логическая структура тривиального элемента памяти, так называемого триггерного кольца, построенного на двух элементах Шеффера, и результаты его двоичного моделирования. Анализ результатов моделирования триггера на входной последовательности (00-11) показывает неоднозначность конечного состояния, определяемого порядком моделирования элементов структуры. Результат моделирования оказывается равным или (01) или (10) в зависимости от того, какой элемент был выбран первым для моделирования. Выбор очередности моделируемых элементов должен определяться тем, на какой элемент ранее пришло событие, то есть на каком входе схемы произошли раньше изменения логического состояния сигнала, или, в случае мгновенного и одновременного их изменения, что теоретически можно предположить, на каком из логических элементов структуры задержка сигнала оказалась большей. Булева алгебра не имеет возможности учитывать временные параметры описываемых сигналов, поэтому она не может применяться для моделирования последовательностных структур, функционирование которых существенно определяется задержками элементов и линий связи. В то же время результаты двоичного моделирования косвенно могут в определенной мере использоваться с целью исследования функционирования устройства. Студентам, изучающим физические основы



ЭВМ, можно показать, на примере двоичного моделирования асинхронного R-S-триггера, каким образом может быть составлена таблица функционирования некоторого логического блока, являющаяся основной частью его паспортной информации. Для этого осуществляется двоичное моделирование функционального блока при всех возможных входных и внутренних состояниях. Анализируется детерминированность переключения блока при воздействии на его входы любой пары входных состояний сигналов в условиях существования состязаний входных сигналов. Для R-S-триггера недетерминированность переключения обнаруживается при изменении входных сигналов (00-11). Результат переключения блока определяется результатом входных состязаний сигналов. В связи с этим указанный переход необходимо блокировать, что возможно лишь путем запрещения входного состояния (00).

Показывается область применения двоичного моделирования при построении средств тестового диагностирования. Изучаются методы моделирования неисправных модификаций цифровых устройств (внесение одиночной неисправности, параллельное моделирование неисправностей, дедуктивный метод моделирования), основанные на описании сигналов булевыми функциями и на теоретико-множественном описании неисправностей, обнаруживаемых заданным тестом.

Студенту предоставляются программные средства моделирования для исследования или изучения логики любого объекта проектирования, а также средства для автоматического анализа полноты теста, построенного вручную. Кроме того, предоставляется возможность сгенерировать тест с помощью моделирования устройства на псевдослучайных входных наборах и анализе их проверяющих свойств.

## 2. Изучение точности многозначных логических моделей и области их применения для верификации проектов.

Для исследования переходных процессов в дискретных устройствах зачастую используется троичное моделирование по Эйхельбергеру, когда третье логическое состояние  $x$  означает и начальную неопределенность сигнала, и сигналы простого переключения, и сигналы типа динамического и статического рисков сбоя. Студентам показываются ошибочность результата троичного моделирования фрагментов структур с повторно сходящимися ветвлениями.

Показываются границы возможностей повышения точности логических моделей цифровых устройств по мере повышения значности применяемой алгебры моделирования. Путем уменьшения степени неопределенности логического состояния сигнала при переходе от троичной алгебры к пятизначной, девятизначной и алгебрам, определенным на еще большем числе значений переменных, несколько расширяется класс структур, для которых можно получить достаточно адекватные квазистатистические модели. Отмечается целесообразность использования математических методов, способных описывать временные параметры сигналов, возникающих в цепях устройства, для качественного улучшения результатов моделирования. Студентам предоставляется возможность автоматически получать троичные модели любого устройства и сравнивать результаты с его двоичными моделями. Кроме того, программные средства позволяют автоматически настраиваться на требуемую значность логических моделей.

## 3. Изучение точности динамических моделей и области их практического применения для верификации проектов.

Показывается, что введение в логические модели даже косвенным путем фактора задержки сигналов (на примере методов асинхронного и  $\wedge$ -троичного моделирования) позволяет существенно повысить точность логических моделей по сравнению с квазистатистическим моделированием практически при любой значности используемой алгебры моделирования. Учет фактических значений задержек компонентов в логических моделях позволяет полностью заменить физическое моделирование объекта программным. В случае моделирования СБИС программная модель с учетом фактических значений задержек компонентов является более предпочтительной по сравнению с физической моделью, так как позволяет с небольшими затратами отлаживать проект устройства.

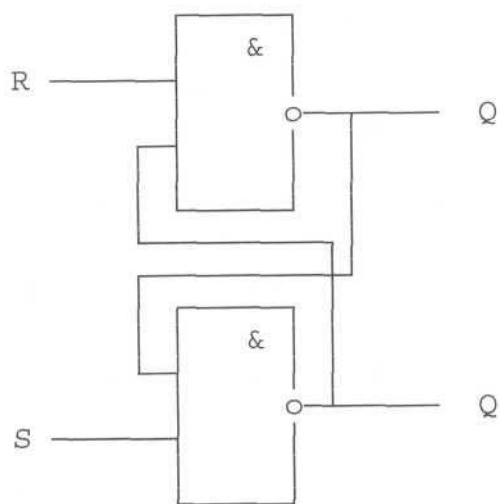
Студентам предлагается проведение экспериментов по событийному моделированию устройств общего вида с учетом номинальных значений задержек элементов. На основе многозначных динамических моделей изучаются методы моделирования неисправностей и методы генерации проверочных тестов.

Обсуждается проблема отсутствия достоверной информации о фактических задержках компонентов на этапе функционально-



Рис.1.

Классификационная диаграмма логико-динамических средств функционально-переключательного моделирования цифровых устройств.



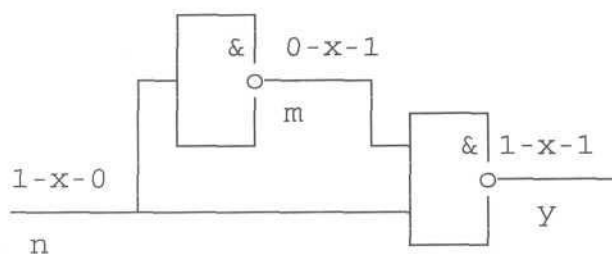
a)

R	S	Q	Q	Q	Q
0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1
0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0
0	0	1	1	1	1
0	1	1	1	1	0
1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	?	?

б)

R	S	Q	Q	Q	Q
0	0	Q	Q	запрет	
0	1	Q	Q	1	0
1	0	Q	Q	0	1
1	1	Q	Q	Q	Q

Рис. 2.  
Применение булевых моделей для анализа устройств с памятью.



a)

	0	1	2	3	4
n					
m					
y					

б)

Рис. 3.  
Сравнение по точности квазистатических и динамических моделей.

логического проектирования. Ставится задача построения динамических моделей устройств в непрерывном спектре значений задержек элементов, расположенных в некотором диапазоне, зависящем как от ряда конструктивно-технологических факторов, так и от дестабилизирующего воздействия внешней среды. Изучается интервальная временная алгебра и ее применение для моделирования устройств с учетом диапазонов флуктуаций задержек компонентов. Приводятся особенности интервального временного моделирования, которые заключаются в расширении зон неопределенности, что ограничивает область использования метода.

#### 4. Изучение особенностей моделирования неисправностей цифровых устройств, создаваемых на основе МОП-технологии.

Изучаются особенности функционирования изделий микроэлектронной техники, разработанных на основе МОП-технологии. Показывается непригодность классической теории вентиляльного моделирования для создания моделей неисправностей таких структур [3]. Рассматриваются подходы к переключательному моделированию цифровых структур, основанные на построении неориентированного трюичного переключательного графа структуры по методу Брайента и использовании многозначных моделей компонентов транзисторной структуры в методе СКА-моделирования Хейеса. Показывается процесс создания переключательной и иерархической модели, основанной на описании структуры модифицированной сетью Петри и сведении моделирования к выполнению сети. Студентам предлагается автоматически построить иерархическую модель функционально-переключательной схемы, в которой компонентами являются как блоки, задаваемые на автоматном уровне, так и фрагменты, представленные на транзисторном уровне, если отсутствует вентиляльное представление фрагмента или решается задача моделирования неисправностей МОП-структур в расширенном классе.

#### 5. Изучение вопросов применения логико-динамического моделирования для генерации тестовых процедур.

При рассмотрении общих подходов к решению задачи контроля цифровых устройств большее внимание уделяется методам и средствам тестового диагностирования и, в частности, задачам построения проверочных тестов, решаемым как путем направленного поиска, так и

на основе решения задачи анализа векторов претендентов на полноту [4]. В Белгосуниверситете разработана система программ, ориентированная на построение логико-динамических моделей изделий микроэлектронной техники, представленных на функционально-переключательном уровне [5]. В системе реализован ряд конкурентоспособных методов, позволяющих обеспечить требуемую точность и эффективность процесса моделирования как при изучении функционирования объектов, так и на этапе верификации корректности проектов, анализе полноты ручных тестов и автоматическом их построении. Система является открытой для пользователя, что позволяет ему легко настраиваться на требуемую элементную базу. В системе имеется язык для текстового введения разноуровневого пофрагментного описания моделируемого устройства неподготовленным пользователем или для его графического ввода, для чего используются возможности системы PCAD. Система использовалась в учебном процессе для организации лабораторных работ по спецкурсам "Математические основы логического проектирования", "Теоретические проблемы технической диагностики", при выполнении курсовых и дипломных работ, с помощью данной системы решались конкретные задачи практического проектирования и генерации тестов контроля.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Бургии М.С. Информатика как научная дисциплина и проблемы ее преподавания. - М. АПН. 1987. 12 с.
2. Золоторевич Л.А. Комплекс программно-технических средств для обучения студентов по специализации "САПР в микроэлектронике". - Материалы 1-ой Белорусской конференции "Новые информационные технологии обучения". Минск. 1992. С.68-69.
3. Золоторевич Л.А. Переключательное моделирование и тестирование МОП-структур. - автоматика и телемеханика. 1992. N 11. С. 133-144.
4. Zolotorevich L. A., Baturinsky M.A. Deductive switch-level CMOS-VLSI fault simulation. - The International Conference Computer-Aided Design of Discrete Devices (CAD DD'95). Vol. 2. Minsk-Szczecin. 1995. PP.157-164.
5. Золоторевич Л.А., Игнатонко Л.И. и др. Система VLSI-SIM моделирования и генерации тестов СБИС. - Труды международной конференции "Автоматизация проектирования дискретных систем". 1995. Минск. С. 77.