

Полунатурная компактная модель МОП-транзистора

В.В. Денисенко

Научно-исследовательская лаборатория автоматизации проектирования, ООО
(НИЛ АП), Россия, г. Таганрог, victor@rlda.ru

Аннотация — Предлагается принципиально новый тип компактных моделей МОП-транзисторов - моделей, использующих реальный транзистор, подключенный через систему аналого-цифрового преобразования к компьютеру. Рассмотрены методы регулировки параметров, методы включения модели в SPICE-подобные программы моделирования, особенности применения, недостатки и достоинства.

Ключевые слова — Компактные модели, МОП-транзистор, схемотехническое моделирование, достоверность, точность.

I. ВВЕДЕНИЕ

До появления SPICE-подобных программ моделирования проектирование электронных цепей выполнялось методом макетирования, т.е. собирался макет электронной цепи, содержащий реальные транзисторы, резисторы, конденсаторы. С помощью паяльника, осциллографа и вольтметра выполнялась оптимизация структуры, подбор наилучших значений параметров, оценивалась чувствительность по параметрам и т.п.

Позже вместо реальных транзисторов использовались их квазианалоговые модели, построенные с помощью теории подобия и работающие в замедленном масштабе времени [1].

С появлением SPICE-подобных программ интерес к макетированию угас, однако, в связи с невысокой достоверностью моделирования, многие проектировщики по-прежнему больше доверяют проверке схемотехнических решений непосредственно в кремнии, чем с помощью программ моделирования [1]. Для этого изготавливаются тестовые кристаллы, содержащие отдельные блоки будущей ИС.

Ниже предлагается оригинальный метод, объединяющий достоинства SPICE-подобного моделирования с макетированием. Главная идея состоит в том, чтобы вместо математической модели МОП-транзистора использовать реальный транзистор, подключаемый к компьютеру с помощью систем аналого-цифрового ввода-вывода [2]. Такой транзистор должен быть способен заменить математическую модель транзистора в процессе традиционного SPICE-подобного моделирования. Аналогичные отечественные или зарубежные разработки отсутствуют.

Предлагаемый подход имеет главной целью улучшение достоверности моделирования [3], однако его воплощение в стандартные средства САПР СБИС ставит ряд новых, нетрадиционных технических и методологических проблем. В статье предлагаются пути их решения.

II. ОСНОВНЫЕ ИДЕИ

Основная идея состоит в том, что реальный транзистор является самой точной моделью самого себя. Для его использования необходимо построить аппаратно-программную систему (т.е. полунатурную компактную модель МОП-транзистора), которая вела бы себя точно так, как математическая модель, чтобы иметь возможность подключить ее к стандартной программе схемотехнического моделирования, например, SPICE.

Опишем возникающие при этом проблемы.

A. Моделирование динамики

При обращении программы моделирования к реальному транзистору возникает проблема паразитных связей между реальным транзистором и устройствами аналого-цифрового ввода-вывода. Эти связи при измерении статических характеристик могут быть сделаны пренебрежимо малыми, однако измерения в динамике становятся практически неосуществимыми.

B. Проблема шума квантования

Моделирование с помощью SPICE-подобных программ использует 32-х или 64-х разрядное представление данных. Результаты же измерений являются, как правило, 16-разрядными. Шумы квантования измеренных данных, обусловленные низкой разрядностью измерений, приводят к разрыву производных и расходимости метода Ньютона-Рафсона, а также могут быть многократно усилены при моделировании высокочувствительных аналоговых цепей.

B. Регулировка параметров

В ИС содержится множество транзисторов с разной геометрией, а при решении многовариантных задач (статистический анализ, анализ чувствительности,

оптимизация) необходимо изменять параметры модели транзистора. Однако реальный транзистор не имеет средств перестройки его параметров.

Г. Сшивание математической модели с реальным объектом

Электрическая цепь в компьютере представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Реальный же транзистор представлен в виде результатов измерений отдельных точек вольт-амперной характеристики. Поэтому возникает задача сшивания реального транзистора с математической моделью электрической цепи.

III. ЦЕЛИ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью полунатурного моделирования является повышение достоверности [3] моделирования МОП-транзисторов и ИС. Достоверность повышается за счет следующих факторов:

- отсутствие этапа идентификации параметров или уменьшение количества идентифицируемых параметров;
- исключение этапа разработки модели как источника ошибок;
- отсутствие этапа упрощения системы уравнений полупроводника (уравнения не используются);
- существенное (в сотни раз) уменьшение объема программного кода;
- существенное упрощение модели.

В общем случае полунатурная модель включает в себя этапы экстракции параметров и составление математической модели, однако объем этих этапов пренебрежимо мал по сравнению с аналогичными этапами в классической математической модели [1].

IV. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Полунатурное моделирование имеет ярко выраженные недостатки и преимущества по сравнению с традиционным математическим моделированием, поэтому имеет свою, особую, область применения:

- верификация электрической схемы предварительно спроектированной ИС перед изготовлением комплекта фотошаблонов;
- проектирование фрагментов аналоговых ИС (перемножителей, функциональных преобразователей, дифференциальных усилителей, радиочастотных ИС), требующих высокой точности моделирования нелинейностей транзистора;
- моделирование электрической цепи с новыми приборами, для которых еще не созданы математические модели;

- моделирование МОП-транзисторов при температурах ниже 200К, при которых модели BSIM и EKV становятся несправедливы;
- моделирование электрических цепей с транзисторами, имеющими аномальное поведение, для которых обычные математические модели не созданы или неприменимы [1].

V. НЕДОСТАТКИ И ДОСТОИНСТВА

Полунатурной модели свойственны следующие недостатки:

- требуется изготовление и корпусирование набора опорных (реальных) транзисторов. В ряде случаев могут быть использованы те же транзисторы, что и для экстракции параметров математической модели;
- требуется внесение изменений в алгоритм программы моделирования;
- требуется диагностика измерительной аппаратуры и верификация измеренных данных.

Достоинствами полунатурной модели является:

- высокая достоверность результатов моделирования;
- полунатурная модель является неограниченным источником информации о транзисторе, в то время как количество информации в математической модели фиксировано;
- исключение дорогостоящего и длительного этапа разработки модели для приборов новых конструкций и типов;
- достоинством, по сравнению с табличной моделью, является отсутствие необходимости хранения большого массива данных и возможность уточнения данных в процессе моделирования.

Тестовые транзисторы для математической модели не требуют корпусирования. Их характеристики измеряются с помощью зондовой установки. В отличие от этого, набор опорных (реальных) транзисторов для полунатурного моделирования должен быть помещен в корпус для дальнейшего использования в системе моделирования.

VI. СТРУКТУРА ПОЛУНАТУРНОЙ МОДЕЛИ

В основе полунатурной модели лежит набор реальных транзисторов (в частном случае – один транзистор), геометрия которых может выбираться так же, как и для идентификации параметров стандартной математической модели. Выбор транзистора из набора выполняется с помощью аналогового коммутатора. Измеренные данные вводятся в компьютер с помощью быстродействующего АЦП, задание напряжений (или токов) на выводах транзистора, в соответствии со схемами измерений, осуществляется из компьютера с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) (рис. 1).

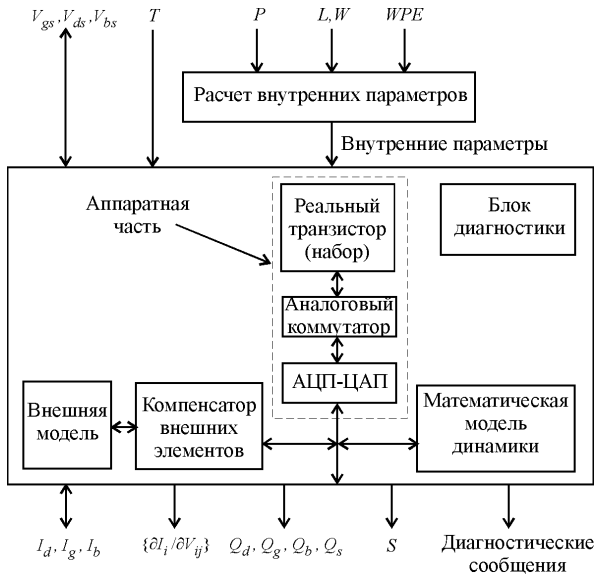


Рис. 1. Структура полунатурной модели; T - температура; P - вектор параметров модели; WPE - "Well Proximity Effect" – параметры эффекта близости кармана; S - спектральная плотность мощности шума; Q_d, Q_g, Q_b, Q_s - заряды, ассоциированные со стоком, затвором, подложкой и истоком, соответственно

Все существующие компактные модели используют деление модели транзистора на статическую и динамическую часть [1]. Такое же деление используется и в полунатурной модели. Однако, поскольку емкости включены во внутренние узлы модели, которые в реальном транзисторе недоступны, то, при использовании реального транзистора, сначала выполняется программная компенсация внешних элементов (сопротивлений истока, стока, подложки, затвора), затем к полученным внутренним узлам модели подключаются модели емкостей транзистора, затем сопротивления истока, стока, затвора и подложки, реализованные программно (см. рис. 2).

Полунатурная модель позволяет регулировать длину и ширину канала (L, W), параметры сопротивлений истока, стока, затвора, подложки, эффект близости кармана. Для учета температуры опорные транзисторы помещаются в термостат с заданной температурой.

Спектральная плотность мощности шума, матрица Якоби и заряды вычисляются программно, с помощью стандартной математической модели.

A. Набор реальных транзисторов для полунатурной модели

При отладке техпроцесса и для идентификации параметров математической модели изготавливаются тестовые транзисторы с различной длиной и шириной канала [1]. Эти же транзисторы могут быть использо-

ваны в качестве опорных для построения полунатурной модели. Количество транзисторов зависит от степени нелинейности зависимости характеристик транзистора от длины и ширины канала, а также требуемой точности моделирования. Обычно достаточно около 15...20 опорных транзисторов, которые изготавливаются на тестовом кристалле для отладки процесса изготовления ИС.

Б. Моделирование паразитных элементов в полунатурной модели

Паразитные элементы в полунатурной модели реализованы программно, как и в стандартных математических моделях.

Измерение одной точки вольтамперной характеристики транзистора в полунатурной модели выполняется за время порядка 1 мкс. При этом динамика транзистора практически не сказывается на погрешности измерений статических характеристик.

Емкости транзистора, как это принято, мы делим на внешние и внутренние. Проблема моделирования емкостей полунатурной модели состоит в том, что некоторые емкости подключены к внутренним узлам транзистора, недоступным для измерений. Для решения этой проблемы обратимся к эквивалентной цепи МОП-транзистора (рис. 2). Если последовательно с сопротивлением, например, области стока R_d , включить сопротивление такой же величины, но противоположного знака ($-R_d$), то мы получаем доступ к внутреннему узлу реального транзистора, к которому можно теперь подключить источник емкостного тока dQ_d/dt и сопротивление области стока R_d . Аналогичную компенсацию внутренних сопротивлений можно сделать для остальных выводов транзистора.

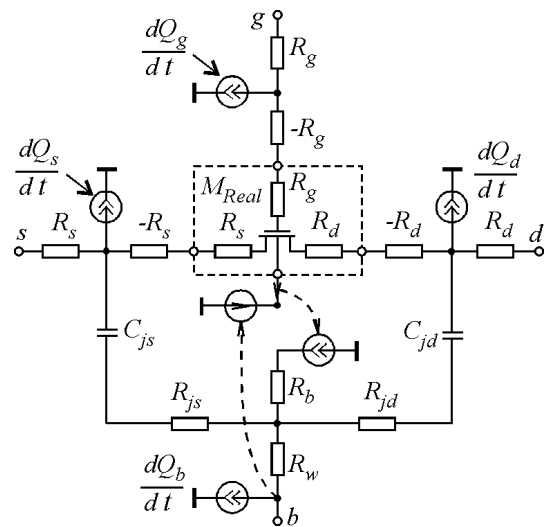


Рис. 2. Эквивалентная электрическая цепь полунатурной модели. Все управляемые источники являются повторителями

Сопротивление подложки может быть как сосредоточенным (на постоянном токе), так и распределенным. Однако, учитывая, что через распределенное сопротивление подложки течет только емкостной ток (постоянная составляющая тока подложки пренебрежимо мала), сопротивлением подложки реального транзистора (который в полунатурной модели работает только на постоянном токе) можно пренебречь, т.е. компенсировать его не нужно.

Неквазистатический эффект моделируется точно так, как и в математических моделях. Практически, динамическая часть математической модели вообще не изменяется (берется из стандартной математической модели), только статическая часть заменяется реальным транзистором (точнее, статической частью полунатурной модели).

В полунатурной модели токи не вычисляются, а измеряются на реальном объекте. Однако длительность измерений (быстродействие измерителя) зависят от величины тока (напряжение) и существенно возрастают при измерении малых токов.

В то же время, токи утечки обычно моделируются независимо от процессов в канале транзистора. Это дает возможность заменить измерение малых токов утечки их вычислением с помощью математической модели, что может ускорить процесс моделирования. Однако эти токи могут быть получены и непосредственно путем измерений.

Моделирование транзистора с high-k диэлектриком и WPE-эффекта (близости кармана) выполняется с учетом того, что гистерезис high-k диэлектрика достаточно мал, порядка 40 мВ [1]. Это позволяет учесть его путем ввода поправки в величину напряжения на затворе, как это обосновано в [1]. Аналогично, путем ввода поправки в величину V_{th0} , моделируется эффект близости кармана.

В. Регулировка параметров полунатурной модели

Регулировка (перестройка) параметров является одной из самых сложных тем в полунатурном моделировании. Регулировка может быть выполнена только путем добавления к реальному транзистору некоторых математических зависимостей, однако они могут явиться причиной снижения точности и достоверности моделирования.

Регулировка параметров может быть выполнена следующими методами:

- интерполяция характеристик между узлами, задаваемыми несколькими реальными (опорными) транзисторами с разной длиной и шириной канала;
- регулировка на основе результатов ЕТ-тестов в качестве параметров модели;
- регулировки с помощью теории нелинейного подобия, на основе стандартной математической модели.

Регулировка параметров необходима в следующих случаях:

- для указания размеров конкретного экземпляра транзистора в пределах ИС;
- для перестройки параметров опорных транзисторов после подстройки техпроцесса;
- для решения многовариантных задач (статистический расчет, оптимизация, анализ чувствительности).

Перечисленные задачи различаются необходимым диапазоном перестройки параметров. Так, для указания размеров конкретного транзистора регулируемые являются только два параметра: длина и ширина канала, изменяемые в широких пределах.

Для перестройки параметров модели после подстройки техпроцесса, а также для статистического анализа и анализа чувствительности достаточно изменение параметров в небольших пределах (до $\pm 5\% \dots \pm 15\%$ от номинального значения) [1]. Для задач оптимизации требуется широкий диапазон изменения параметров, однако только двух из них: W и L .

Таким образом, для решения задач, стоящих перед полунатурной моделью, необходим широкий диапазон перестройки параметров W , L и узкий (до $\pm 15\%$) диапазон перестройки параметров I_{dsat} , V_{th} , γ , $K' = \mu_{eff} C_{ox}$, g_{out} , которые используются при мониторинге и подстройке техпроцесса.

Настройка же модели на конкретный техпроцесс выполняется путем изготовления тестового кристалла, содержащего необходимый набор транзисторов. Для полунатурной модели в качестве перестраиваемых параметров достаточно использовать величины I_{dsat} , V_{th} , γ , g_m , g_{out} , измеряемые в процессе электрического тестирования кристаллов, поскольку часть параметров техпроцесса "встраиваются" в опорный транзистор во время его изготовления.

Г. Регулировка длины и ширины канала методом интерполяции

Для регулировки длины и ширины канала методом интерполяции изготавливается набор реальных (опорных) транзисторов с разной длиной и шириной канала. Выбор транзистора нужных размеров выполняется с помощью аналогового коммутатора. Если транзистор с интересующими разработчика длиной и шириной канала отсутствует в указанном наборе, то при моделировании измеряют токи I трех ближайших соседних транзисторов $i, j, i+1, j$ и $i, j+1$, где i, j - номера транзисторов, расположенных в порядке увеличения длины (i) и ширины (j) их канала при заданных значениях V_{ds} , V_{gs} , V_{bs} . Интересующий ток $I(L, W)$ транзистора с длиной канала L и шириной W находят путем линейной интерполяции:

$$I(L, W) = \frac{I_{i+1,j} - I_{i,j}}{L_{i+1}^{-1} - L_i^{-1}} L^{-1} + \frac{I_{i,j+1} - I_{i,j}}{W_{j+1} - W_j} W + \frac{(I_{i,j+1} + I_{i+1,j+1} - I_{i,j})L_i^{-1}W_j - L_i^{-1}W_{j+1}I_{i+1,j+1} - L_{i+1}^{-1}W_jI_{i,j+1} + L_{i+1}^{-1}W_{j+1}I_{i,j}}{(L_{i+1}^{-1} - L_i^{-1})(W_{j+1} - W_j)}$$

где нижние индексы при параметрах W и L указывают конкретный транзистор из набора. Вместо длины канала в приведенной формуле использована обратная ей величина L^{-1} , поскольку для длинноканального транзистора ток стока прямо пропорционален L^{-1} , а не L .

Для транзистора с коротким каналом пороговое напряжение начинает существенно зависеть от длины канала, линейность зависимости нарушается и погрешность линейной интерполяции возрастает. Поэтому встает вопрос о выборе таких интервалов длины ΔL и ширины ΔW каналов транзисторов в наборе, при которых обеспечивается заданная погрешность моделирования.

На рис. 3 приведена зависимость ΔL от номера транзистора, если нумерацию начинать с транзистора минимальных размеров, на рис. 4 - погрешность интерполяции.

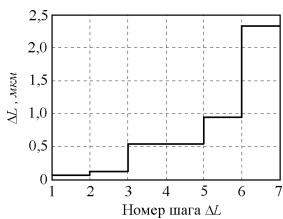


Рис. 3. Интервал (шаг) изменения длины канала набора реальных транзисторов. Точные значения по оси ординат равны [0,22; 0,28; 0,38; 0,92; 1,46; 2,4; 4,72] мкм

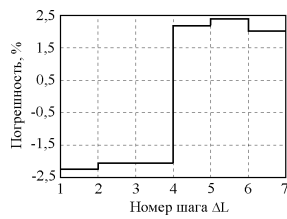


Рис. 4. Относительная погрешность линейной интерполяции тока стока для технологии SCN018, RUN: T18N кремниевой мастерской TSMC

Д. Регулировки с использованием ЕТ-тестов

При статистическом моделировании ИС возникает проблема получения исходных данных, поскольку традиционный подход к моделированию требует идентификации большого (статистически значимого) числа транзисторов, специально изготовленных для идентификации параметров компактной модели. В то же время, в процессе изготовления ИС постоянно выполняется мониторинг технологического процесса, результатом которого являются параметры V_{th} , K' , I_{dss} , γ для каждого кристалла, пластины, лота, запуска техпроцесса. Таким образом, в кремниевой мастерской существует ценный статистический материал, которым желательно воспользоваться при статистическом моделировании ИС.

Использование этих данных позволяет также очень просто учесть пространственную корреляцию параметров транзисторов и достаточно точно предсказать выход годных кристаллов.

Поэтому для регулировки параметров полунатурной модели предлагается использовать результаты электрических тестов (ЕТ-тестов).

Особенностью задач расчета чувствительности или статистического моделирования [1], а также задачи настройки модели на техпроцесс после его подстройки является то, что для их решения достаточно изменять параметры модели в небольших пределах ($\pm 5... \pm 15\%$) [1]. Это позволяет обойтись небольшим числом регулируемых параметров модели.

Как следует из экспериментальных графиков, проходные характеристики МОП-транзисторов отличаются сдвигом и наклоном, т.е. величиной порогового напряжения V_{th} и удельной крутизной β или K' , а основное различие стоковых характеристик наблюдается в величине тока насыщения I_{dsat} . Небольшое различие имеется также в величине выходной проводимости g_{out} (в наклоне характеристик в области насыщения). Обе упомянутые выше кремниевые мастерские для мониторинга техпроцесса измеряют параметры V_{th} , K' , I_{dss} , γ .

Для регулировки в небольших пределах подвижности или токового фактора $K' = \mu_0 C_{ox} / 2$, которые определяются по наклону линейного участка проходной характеристики, мы предлагаем между выводами истока и стока опорного транзистора T_R (рис. 5) включить управляемый источник тока j_μ , воспроизводящий зависимость

$$j_\mu = \frac{K_\mu}{1 + \eta(V_{gs} - V_{th})} i_{dR},$$

где K_μ - параметр полунатурной модели, определяющий величину токового фактора K' ; $V_{gs} = V_g - V_s$, $\eta = 1B^{-1}$ - константа. Знаменатель выражения для j_μ позволяет грубо учесть зависимость подвижности носителей в канале от напряженности вертикального электрического поля.

Аналогично реализованы регулировки других параметров: V_{th} , I_{dsat} , γ . На рис. 6 сплошной линией

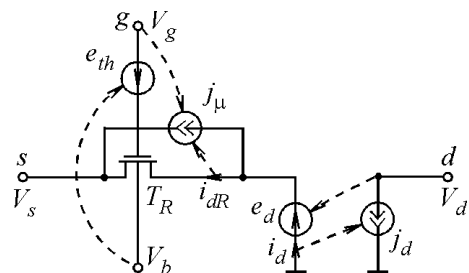


Рис. 5. Эквивалентная электрическая цепь полунатурной модели. Все управляемые источники являются повторителями

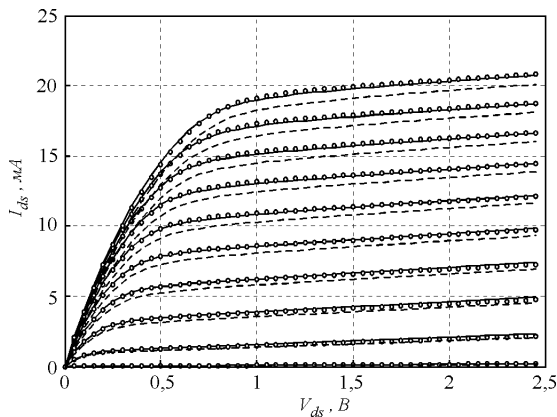


Рис. 6. Семейство выходных характеристик модели МОП-транзистора (сплошная линия), объекта моделирования (точки) и опорного транзистора (штриховая линия) с длиной канала 0,18 мкм и шириной 0,27 мкм, техпроцесс SCN018 (0,18 мкм) фирмы TSMC (а) и транзистора с длиной канала 0,12 мкм

показаны характеристики модели и объекта моделирования (кружочками). Штриховой линией показаны характеристики опорного транзистора. Графики иллюстрируют возможность подстройки параметров модели описанным способом.

Описанная выше методика регулировки параметров полунатурной модели рассчитана на применение результатов ЕТ-тестов, набор которых ограничен параметрами V_{th} , K' , I_{dsat} , γ . Однако в случае, когда в распоряжении проектировщика имеются вольтамперные характеристики объекта моделирования, точность идентификации полунатурной модели может быть существенно повышена.

VII. ИНТЕГРАЦИЯ В САПР

Полунатурная модель с точки зрения САПР ничем не отличается от математической компактной модели и ее настроечные параметры хранятся в обычной библиотеке моделей. Однако при обращении к этой модели в процессе моделирования включается в действие измеритель, содержащий набор АЦП и ЦАП. Принципы построения такого рода средств измерений подробно описаны в книге [2].

Полунатурная модель может быть встроена в стандартные системы схемотехнического проектирования путем некоторой доработки алгоритма моделирования. В частном случае, при проектировании цифровых СБИС, может быть использован алгоритм SPICE без его модификаций и модуль DeviceEquations из пакета DesignLab/OrCAD.

Для учета влияния температуры на проектируемую ИС тестовые транзисторы помещают в термостат с заданной температурой. Значение температуры или ее

зависимость от времени задается из системы проектирования с помощью ПИД-регулятора [2].

При существующей идеологии взаимодействия проектировщиков ИС с кремниевой мастерской последняя изготавливает тестовые транзисторы для идентификации моделей при каждом изменении технологического процесса. После этапа идентификации параметры моделей рассылаются проектировщикам ИС. Применение полунатурной модели предполагает, что кремниевая мастерская будет рассылать не файлы параметров, а наборы реальных транзисторов.

Вместо рассылки наборов реальных транзисторов в кремниевой мастерской может быть организован интернет-доступ к полунатурной модели, расположенной на ее территории. Для анализа 100 тыс. транзисторов при количестве узлов сплайна 100 достаточен пакет данных размером около 20 Мбайт. Такой пакет может быть передан через интернет за время около 1 с. При моделировании фрагмента СБИС, содержащего 100 тыс. транзисторов, и использовании метода релаксации формы сигнала [1] задержки на доставку функций времени через интернет будут пренебрежимо малы по сравнению с временем моделирования.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полунатурная модель позволяет осуществить перестройку параметров, достаточную для решения практических задач.

Параметры полунатурной модели могут быть получены по результатам ЕТ-тестов с помощью простой процедуры, что является существенным преимуществом по сравнению со стандартными математическими моделями.

Моделирование динамики выполняется методами математического моделирования.

Высокая достоверность полунатурной модели обеспечивается благодаря применению реального транзистора вместо его математической модели, а сложность аппаратного обеспечения примерно на два порядка оказывается ниже сложности программного обеспечения математической модели (на два порядка меньше элементов структуры модели и проще логика связей между ними).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. — М.: Физматлит, 2010. — 406 с.
- [2] Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. — М.: Горячая линия-Телеком, 2009. — 608 с.
- [3] Денисенко В.В. Точность и достоверность моделирования МОП-транзисторов СБИС // Микроэлектроника. — 2009. Т. 38. - №4. - С. 302-308.