

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**  
*Кафедра радиофизики*

**А.В. КАРПОВ, С.А. КАЛАБАНОВ, Р.И. ШАГИЕВ**

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА  
СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И  
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Учебно-методическое пособие**

**Казань – 2013**

**УДК 004.94**  
**ББК 30в6**

*Принято на заседании кафедры радиофизики  
Протокол № 8 от 25 марта 2015 года*

**Рецензент:**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры Информатики и информационно-управляющих систем КГЭУ  
**Р.А. Ишмуратов**

**КАРПОВ А.В., КАЛАБАНОВ С.А., ШАГИЕВ Р.И.**

**Современные программные средства структурно-функционального и схемотехнического моделирования / А.В. Карпов, С.А. Калабанов, Р.И. Шагиев. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 36 с.**

Пособие посвящено наиболее мощно развивающейся области моделирования – структурно-функциональному моделированию. Упор сделан на приложения, связанные с радиоэлектроникой. В настоящем пособии рассмотрены наиболее распространенные программные продукты, используемые на следующих двух основных этапах проектирования радиоэлектронного устройства: моделирования структурно-функциональной схемы и моделирования принципиальных электрических схем.

Изложено современное состояние предметной области, назначение и принципы структурно-функционального моделирования, представлены соответствующие интернет ресурсы. Принципиально важным является тот факт, что данное пособие представлено именно в электронном виде, а не бумажном виде. По соответствующей ссылке студент может сразу выйти на Интернет-ресурс (сайт) и оперативно более детально изучить предметную область приложения.

Обзор программных продуктов сделан по информации с сайтов основных мировых производителей, таких как The MathWorks Inc., Arden Technologies Inc., Agilent Technologies, National Instruments Corporation, Visual Solutions, AWR Corporation и др.

Учебно-методическое пособие предназначено для обучающихся в магистратуре по специальности «011800.68 радиофизика» профилю подготовки «Информационные процессы и системы» в рамках изучения дисциплины «Моделирование радиофизических процессов и систем» в целях подготовки к выполнению курсовых работ, дипломных проектов и магистерских диссертаций

© Карпов А.В., Калабанов С.А., Шагиев Р.И., 2013  
© Казанский университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Применение структурно-функционального моделирования в радиотехнике .....	6
Программные пакеты моделирования структурно-функциональной схемы.....	8
Моделирование принципиальных электрических схем .....	21
Симулятор электронных схем SPICE.....	22
Программные пакеты создания и проверки SPICE моделей электронных компонентов.....	27
Программные пакеты моделирования принципиальных электрических схем..	29
Контрольные вопросы.....	35
Список использованных Интернет-ресурсов .....	36

## ВВЕДЕНИЕ

Структурно-функциональное моделирование – вид моделирования, при котором моделями являются блок-схемы, графики, чертежи, диаграммы, таблицы, рисунки и взаимосвязи между ними. Структурно-функциональное моделирование берет свои истоки в основах электрических цепей и радиотехнике.

Впервые понятие "структурный анализ" было использовано в конце 60-х годов прошлого столетия профессором Массачусетского технологического института Дугласом Россом, который разработал основы современных методов структурно-функционального анализа и моделирования сложных систем. Методология структурно-функционального моделирования и анализа сложных систем (SADT) широко использовалась для эффективного решения целого ряда таких проблем, как:

- управление финансами и материально-техническим снабжением крупных фирм;
- разработка программного обеспечения АСУ телефонными сетями;
- долгосрочное и стратегическое планирование деятельности фирм;
- проектирование вычислительных систем и сетей и др.

Методы структурно-функционального моделирования основаны на следующих принципах:

- расчленение систем на части типа "черные ящики";
- иерархическая организация этих "черных ящиков";
- использование графических средств для определения функциональных связей между блоками.

Вкратце рассмотрим эти принципы. Удобство применения принципа "черного ящика" при изучении систем заключается в том,

что нет необходимости знать внутреннее устройство каждого отдельного блока, следует лишь знать набор его входов и выходов, а также назначение, т.е. функцию, согласно которой происходит преобразование входного сигнала в выходной.

Разбиение на «черные ящики» должно удовлетворять следующим критериям:

- каждый "черный ящик" реализует единственную функцию системы;
- функция каждого "черного ящика" является легко понимаемой независимо от сложности ее внутренней структуры;
- связь между "черными ящиками" вводится только при наличии связи между соответствующими функциями системы;
- связи должны быть простыми, с минимальным количеством перекрестных и обратных связей между составными блоками, для обеспечения, насколько это возможно, их независимости друг от друга.

Идея, или принцип иерархии (расположение частей или элементов системы в порядке от высшего к низшему), заключается в последовательной детализации структурно-функционального описания системы – сначала система описывается как взаимодействие наиболее крупных блоков, затем каждый блок детализируется. Это значительно облегчает понимание работы сложных систем.

Третий момент, касающийся методов структурно-функционального моделирования – использование графических средств описания связей. Очевидно, что именно графическое представление взаимодействия блоков системы в полной мере реализует принципы, отмеченные выше.

## **Применение структурно-функционального моделирования в радиотехнике**

Типовой цикл проектирования радиоэлектронной аппаратуры можно разбить на несколько этапов:

- разработка структурной схемы;
- разработка принципиальной схемы, включая моделирование ее работы;
- предварительное определение конструктивных требований;
- разработка (трассировка) печатной платы (пластины из диэлектрика, на поверхности и/или в объеме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы);
- разработка корпуса и конструкции прибора в целом;
- оценка электромагнитной совместимости;
- оценка тепловых режимов;
- оценка надежности.

В современных условиях почти на всех перечисленных этапах предлагается использование специализированных программных пакетов автоматизированного проектирования электронных устройств (САПР). Поэтому основные направления и этапы проектирования можно разделить на следующие задачи:

- моделирование на уровне структурных схем;
- моделирование смешанных аналого-цифровых устройств;
- моделирование и синтез логики для ПЛИС;
- схемотехническое и электромагнитное моделирование СВЧ-устройств;
- проектирование печатных плат;
- анализ электромагнитной совместимости;
- тепловое моделирование.

Общие преимущества использования систем САПР при проектировании радиоэлектронных устройств можно сформулировать следующим образом:

- нет необходимости в экспериментальных исследованиях, для проведения которых требуется приобретение дорогостоящих измерительных приборов, радиодеталей, трудоемкая сборка и длительная настройка макетов;

- всестороннее исследование разрабатываемых устройств в различных режимах работы (например, в предельно допустимых режимах), что не всегда возможно при натурных испытаниях;

- оценка влияния статистического разброса параметров отдельных компонентов на работы системы в целом;

- исследование влияния дестабилизирующих внешних факторов.

## Программные пакеты моделирования структурно-функциональной схемы

Разработка любого электронного устройства начинается с идеи, которая первоначально воплощается в виде структурной схемы. Быстро проверить работоспособность и все возможные варианты развития будущей системы можно с помощью специальных программ функционального моделирования. На функциональном уровне важно оценить поведение каждого структурного элемента системы, а также обеспечить правильное соединение элементов друг с другом.

Здесь можно порекомендовать программные пакеты – SimuLink, SysCalc, SystemView, LabView, Hyper-Signal Block Diagram, VisSim, VSS – которые позволяют построить моделируемую систему из "кубиков" в точной аналогии со структурной схемой.

Обычно работа таких систем представляет собой конструктор, с помощью которого из стандартных библиотечных "кубиков" строится структурная схема. В библиотеке выбирают нужный элемент, который затем переносят на схему.

Рассмотрим вкратце каждый из перечисленных программных пакетов

### 1. Simulink

*Производитель: The MathWorks, Inc.*

*Сайт продукта: <http://www.mathworks.com/products/simulink/>*

Программа Simulink является приложением (расширением) к пакету MATLAB [1]. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип так называемого визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране монитора из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от прежних классических способов моделирования, пользователю не нужно



досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MATLAB и при работе с ним совсем не требуется знать сам MATLAB и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям MATLAB и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в Simulink. Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset – моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д.).

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять целые библиотеки новых блоков.

При моделировании пользователь может выбирать стратегию и технику моделирования, например: численный метод решения дифференциальных уравнений, способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом) и т.д. В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные «устройства наблюдения», входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты проведенного моделирования могут быть наглядно представлены в виде графиков или таблиц.

Преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пользователю самостоятельно пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм написанных как на языке MATLAB, так и на классических языках алгоритмического программирования (C ++, Fortran).

На рисунке 1 показан пример моделирования ветрогенератора в пакете Simulink.

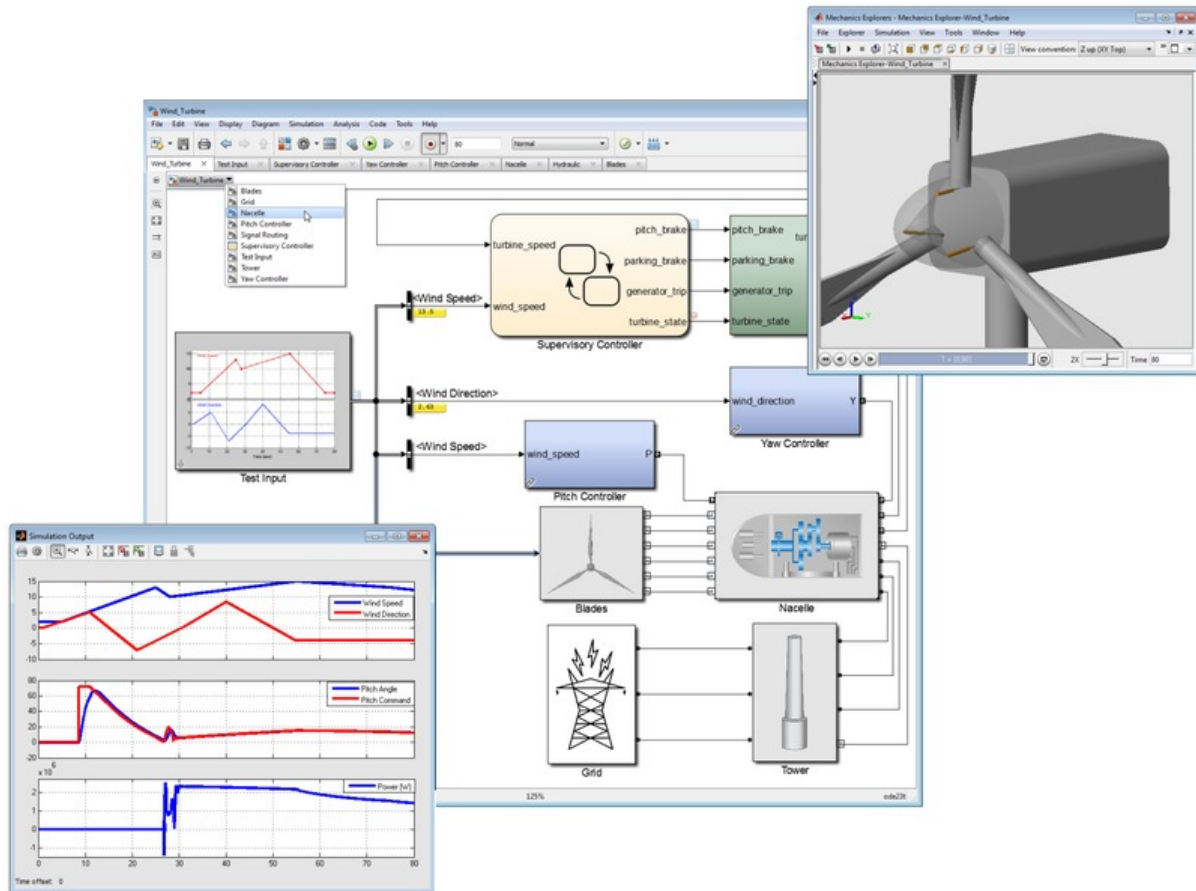


Рис. 1. Пример моделирования в Simulink

## 2. SysCalc

Производитель: *Arden Technologies, Inc.*

Сайт продукта: <http://www.ardentech.com/>

SysCalc – это программный пакет для расчета на системно-техническом уровне различных характеристик: шумовых, коэффициента усиления, интермодуляционных характеристик и суммарного коэффициента усиления последовательности каскадно включенных компонентов, где каждый компонент описывается своими параметрами [2].

Программа SysCalc позволяет на этапе эскизного проектирования осмысленно подбирать такие параметры системы и отдельных блоков, как динамический диапазон, чувствительность,

уровни побочных гармоник, и найти их оптимальное по каскадному распределению. Используя данную программу, можно оценить, какие узлы в тракте вносят ухудшение в результирующие характеристики всего тракта, а также исчерпывающе документировать разрабатываемые проекты. SysCalc использует иерархические закладки, чтобы объединить компоненты в связанные «страницы» автономной системы. Страницы затем объединяются, формируя законченную систему. Каждая Системная страница может быть отдельно настроена, чтобы отображать только важную для пользователя информацию и поля данных. Число компонентов, которые могут быть помещены в страницу или число страниц, которые могут быть созданы в проекте, произвольно. Вы можете также присоединять один или большее количество Отчетов (таблиц и графиков) к каждой системной странице. Система отчетов программы SysCalc позволяет производить следующие виды анализа: моделирование фазового шума, анализ линейности и ее диапазон, оценка энергетического потенциала канала связи, анализ побочного электромагнитного излучения и т.п. (см. рисунок 2).

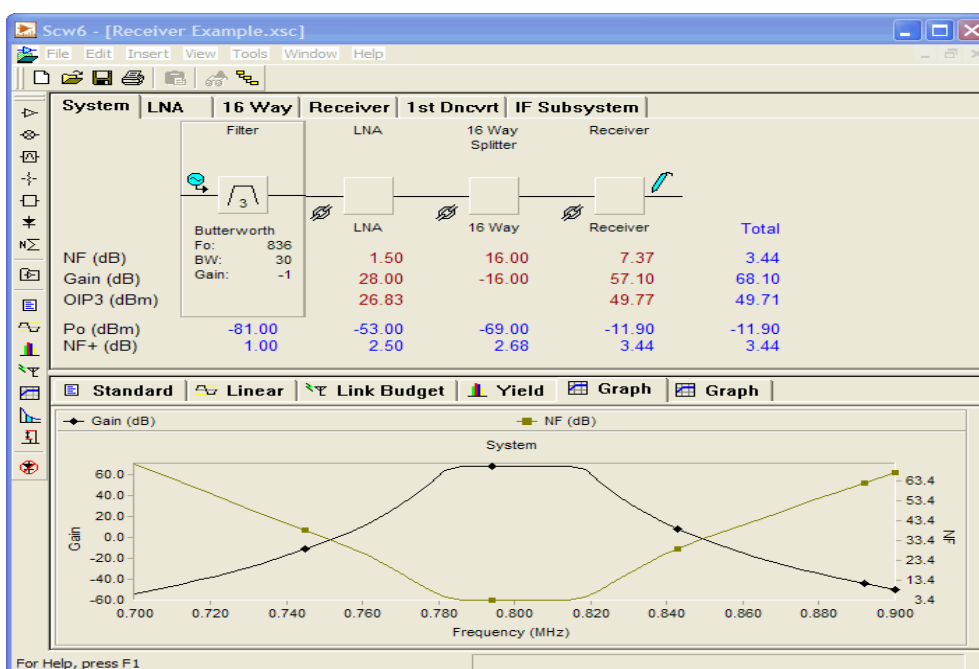


Рис. 2. Пример моделирования в SysCalc

### 3. SystemVue

*Производитель: Agilent Technologies*

*Сайт продукта: <http://www.agilent.com/find/eesof-systemvue>*

SystemVue является специализированным программным средством автоматизированного проектирования электронных устройств на системном уровне. SystemVue позволяет разработчикам радиосистем проектировать физический уровень наземных беспроводных и аэрокосмических оборонных систем связи и имеет ценность для разработчиков, программирующих алгоритмы работы с помощью цифровых сигнальных процессоров и ПЛИС [3].

Платформа SystemVue предоставляет собой простую в использовании среду с современными технологиями моделирования, с возможностью подключения к реальной измерительной аппаратуре и проведения испытаний. Она позволяет создавать алгоритмы работы и прототипы архитектур для сложных систем связи. SystemVue имеет интуитивно понятный блочный интерфейс среды разработки с обширными библиотеками блоков для построения коммуникационных систем, элементов адаптивного управления и компонентов цифровой обработки сигналов. SystemVue поддерживает алгоритмы разработки прототипов и реализации через генерацию VHDL кода для ПЛИС (FPGA) и ANSI C кода для встраиваемых цифровых сигнальных процессоров.

На рисунке 3 приведен пример моделирования радиосистемы в пакете SystemVue.

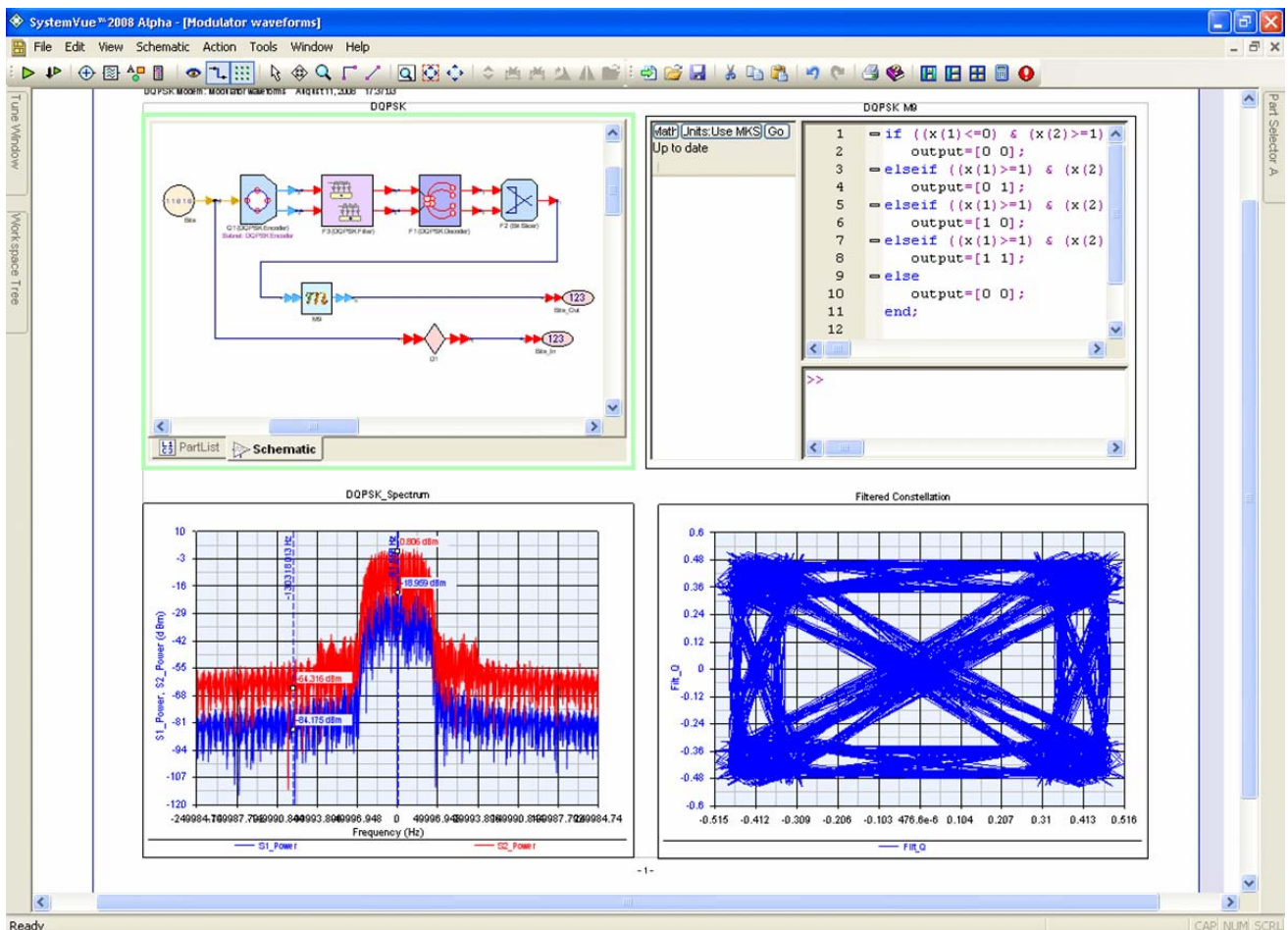


Рис. 3. Пример моделирования в SystemVue

#### 4. LabVIEW

Производитель: *National Instruments*

Сайт продукта: <http://www.labview.ru/>

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – среда разработки лабораторных виртуальных приборов) – это среда прикладного графического программирования, которая используется разработчиками, инженерами, преподавателями и учеными по всему миру для быстрого создания комплексных приложений в задачах измерения, тестирования, управления, автоматизации научного эксперимента, а также в области образования.

В основе LabVIEW лежит концепция графического программирования («графический язык G»), заключающаяся в описании системы в виде графической блок-диаграммы, состоящей из

функциональных блоков и связей между ними [4]. Несмотря на графический ввод, в языке G используются те же конструкции и методы, что и в классических языках программирования: типы данных, циклы, переменные, рекурсия, обработка событий и объектно-ориентированное программирование.

LabVIEW является идеальным программным средством для создания информационно-измерительных систем, а также систем автоматизации управления на основе технологии виртуальных приборов. LabVIEW позволяет взаимодействовать с реальными аппаратными средствами, такими как встраиваемые в компьютер многоканальные измерительные аналого-цифровые платы, платы захвата и синхронизации видеоизображения для систем машинного зрения, платы управления движением и исполнительные механизмы, а также измерительные приборы, подключаемые к компьютеру через стандартные интерфейсы RS-232, RS-485, USB, GPIB (КОП), PXI, VXI. Все это в комплексе позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности.

Кроме того, LabVIEW может интегрировать в себя программы, написанные в среде MATLAB и на языке C. Большое количество встроенных алгоритмов цифровой обработки одномерных и двумерных сигналов позволяет осуществлять весьма сложную обработку сигнала, изображения и экспериментальных данных во временной, пространственной и спектральной областях. Программная среда LabVIEW постоянно расширяется новыми средствами обработки сигналов на основе вейвлет-анализа, алгоритмов нечеткой логики, сетевых технологий и т. д.

Эффективность использования среды LabVIEW в научных исследованиях состоит в том, что, оставаясь в ее рамках, можно как разрабатывать математическую модель объекта, так и снабжать эту

модель экспериментальными данными с помощью аппаратных средств ввода-вывода, сопряженных с реальным объектом.

На рисунке 4 приведен пример графического моделирования в пакете LabVIEW.

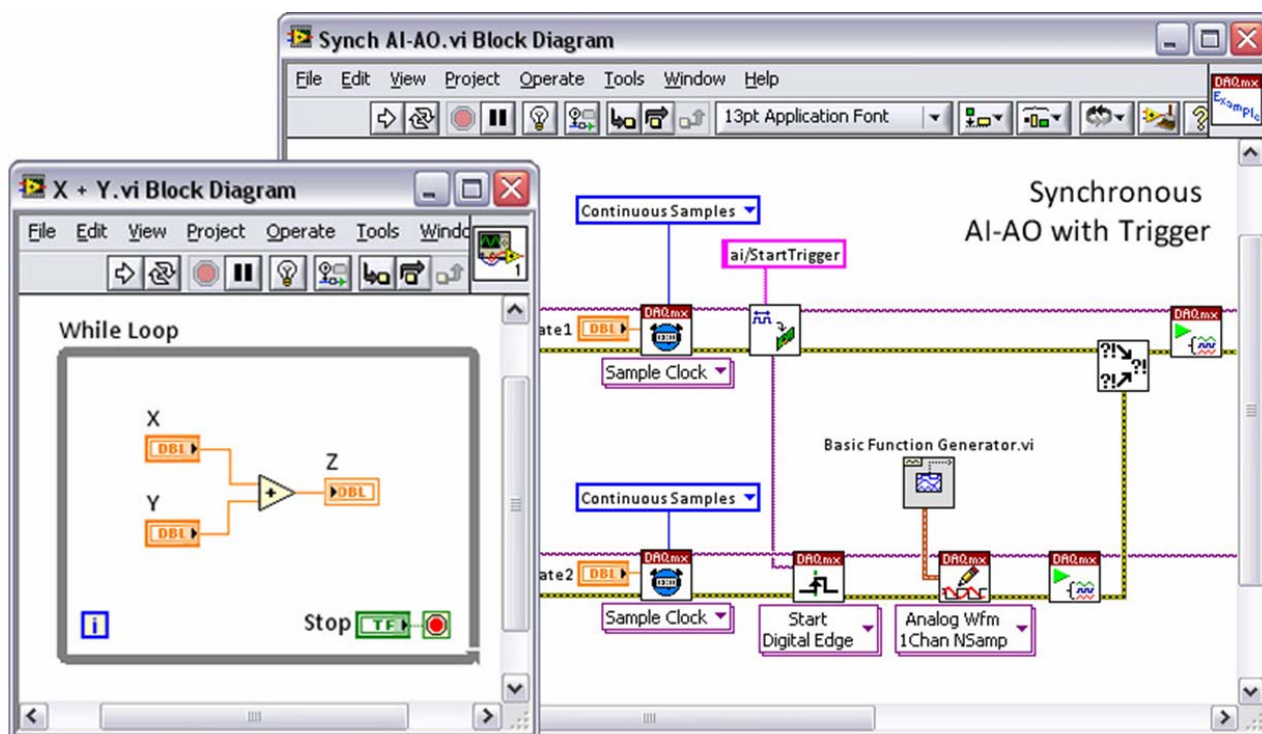


Рис. 4. Пример моделирования в LabVIEW

## 5. Hypersignal RIDE (Hypersignal Block Diagram)

Производитель: National Instruments

Сайт продукта: <http://www.ni.com/support/ride.htm>

В 1990 г. фирма Hyperception выпустила систему автоматизированного проектирования Hypersignal Block Diagram для визуального проектирования и моделирования на ПК сложных динамических систем с использованием вычислительных возможностей ПК. В 2003 году компания National Instruments объявила о приобретении Hyperception. Логическим развитием пакета Block Diagram стала САПР Hypersignal RIDE, которая поддерживает аппаратные средства цифровой обработки сигналов (ЦОС), установленные в ПК или связанные с ним по последовательному интерфейсу, и позволяет



комбинировать в одном проекте как функции, выполняющиеся в среде процессора ПК, так и функции, выполняющиеся в среде процессора ЦОС.

В состав Hypersignal входят несколько сотен тематически сгруппированных функций-блоков [5]. Среди них: блоки генераторов сигналов, блоки арифметических функций, блоки матричных и векторных операций, блоки функций ЦОС, блоки файловых операций, блоки визуализации сигналов и так далее. В состав САПР Hypersignal также входят блоки управления: клавиатуры, переключатели, линейные и стрелочные индикаторы и так далее. Наличие этих функциональных блоков позволяет создавать пользовательский интерфейс разрабатываемой системы совместно с разработкой алгоритма функционирования. В дополнение поставляются специализированные библиотеки функций для обработки речи (Advanced Speech Library), библиотеки коммуникационных функций (Advanced Transmission Library) и библиотеки функций для обработки изображений (Image Processing Library).

Пользователям САПР Block Diagram и RIDE дополнительно предлагается генератор ANSI Си-кода. Генератор Си-кода генерирует ANSI Си-код, соответствующий "визуализованному" алгоритму, разработанному с помощью Hypersignal RIDE или Hypersignal Block Diagram. В дальнейшем этот код может быть встроен в различные программные продукты для ПК, перенесен на альтернативные UNIX-платформы или встроен с применением соответствующих средств кросс-компиляции в автономные системы реального времени, построенные на базе различных процессоров.

На рисунке 5 приведен пример моделирования системы амплитудной модуляции/демодуляции в пакете Hypersignal.



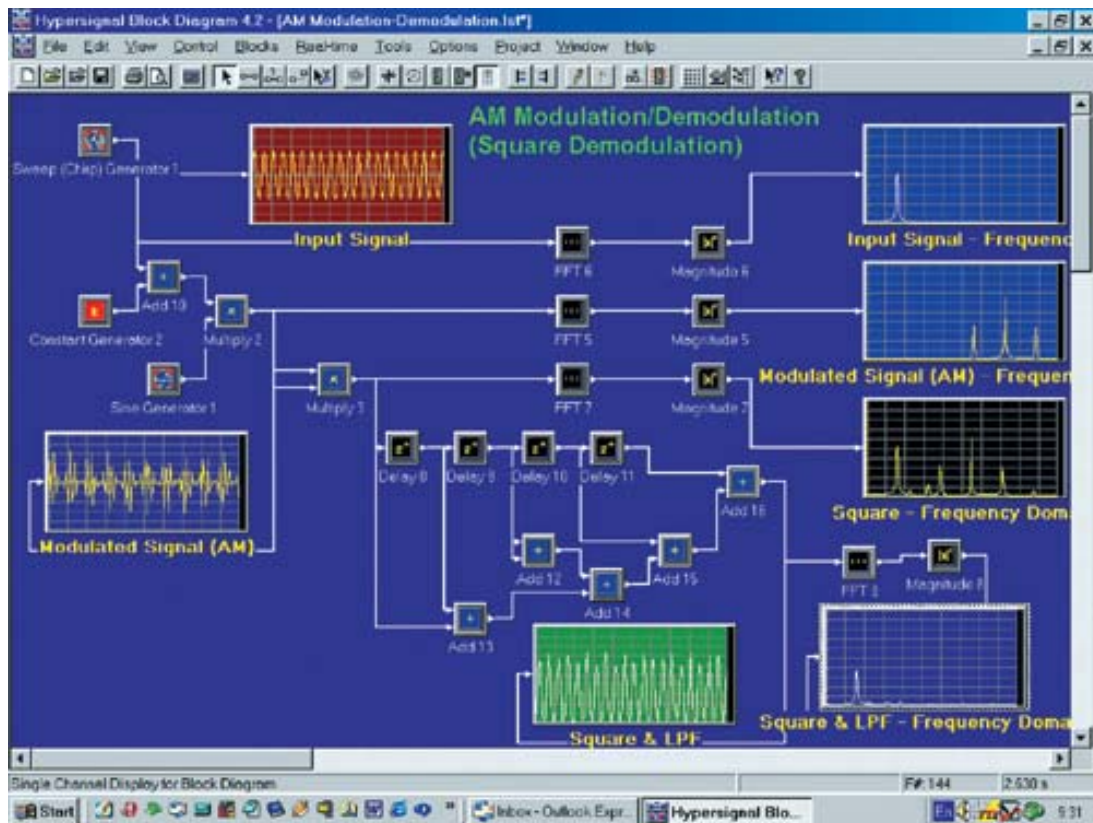


Рис. 5. Пример моделирования в Hypersignal

## 6. VisSim

Производитель: *Visual Solutions*

Сайт продукта: <http://www.vissim.com/>

Программа VisSim предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе и систем управления [6]. VisSim – это сокращение выражения Visual Simulator – визуальная, т.е. непосредственно воспринимаемая зрением, программная среда и средство моделирования.

Программный пакет предоставляет человеку развитой графический интерфейс, используя который исследователь создает модель из виртуальных элементов (с некоторой степенью условности и идеализации компонентов) так же, как если бы он строил реальную систему из настоящих элементов (см. рисунок 6). Это позволяет

создавать, а затем исследовать и оптимизировать модели систем широкого диапазона назначения и различного уровня сложности.

При использовании VisSim'a не требуется владеть программированием на языках высокого уровня или на ассемблере. В то же время, специалисты, владеющие программированием, могут создавать собственные блоки, дополняя ими богатую библиотеку стандартных блоков VisSim'a.

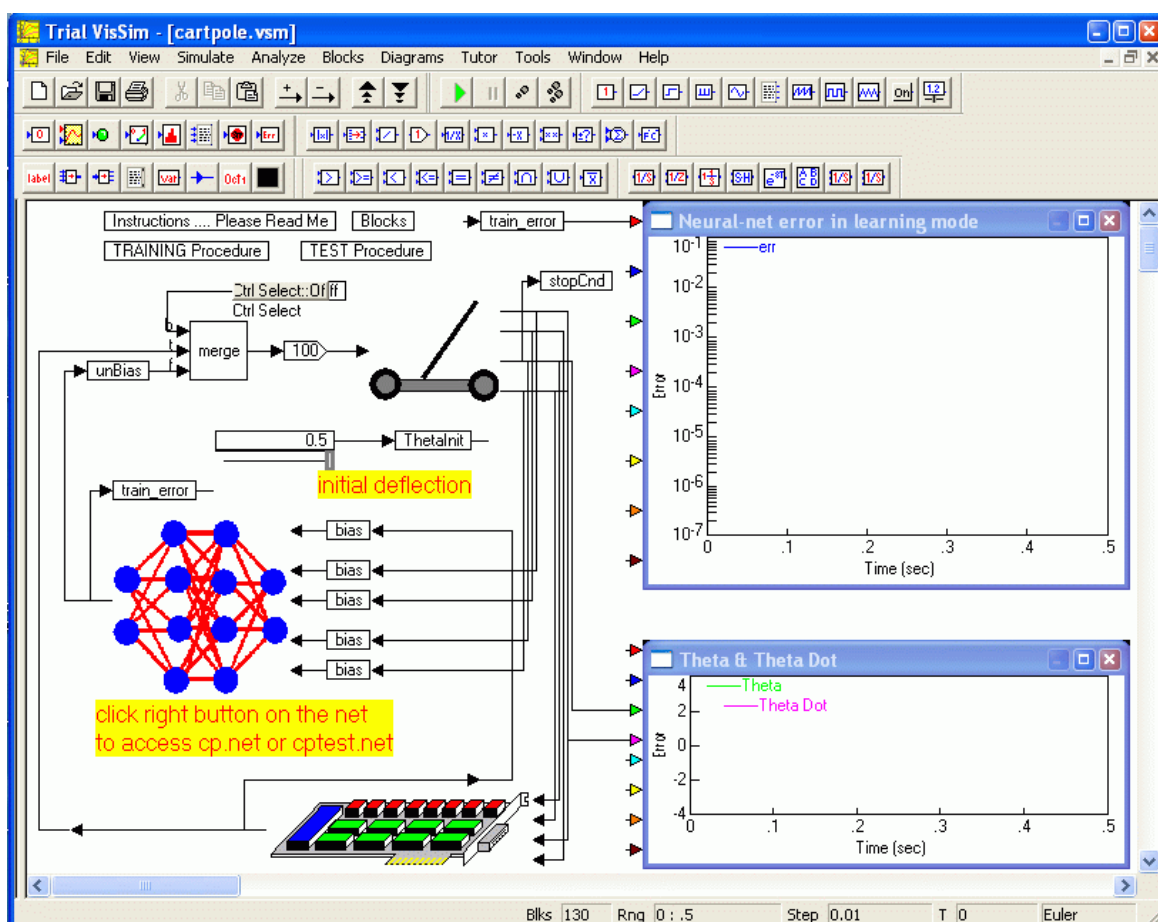


Рис. 6. Пример моделирования в VisSim

## 7. Visual System Simulator

Производитель: AWR Corporation

Сайт продукта: <http://www.awrcorp.com/ru/products/visual-system-simulator>

Visual System Simulator (VSS) - программа моделирования коммуникационных систем на уровне функциональных блоков.

Ключевые возможности [7]:

- интеграция схем и систем на уровне блоков;
- высокая скорость моделирования на системном уровне;
- обширная библиотека моделей, описывающих стандарты связи GSM, CDMA и др.;
- программа RFA предназначена для оценки качества оборудования на основе данных о мощности сигнала и помех, взаимодействия паразитных эффектов. Включает RF Inspector;
- измерение характеристик радиоустройств, таких как фазовый шум, сигнал/шум, модуль вектора ошибки EVM (Error Vector Magnitude), коэффициент мощности в соседнем канале ACPR (Adjacent Channel Power Ratio);
- возможность импорта модулей из LabVIEW и Matlab;
- тесная интеграция с пакетами Microwave Office и Analog Office;
- настройки в широком диапазоне пределов измерений, которые позволяют уменьшить время анализа;
- прямая связь программы Visual System Simulator с контрольно-измерительными приборами, подключаемыми к ПК.

На рисунке 7 приведен пример моделирования LTE-связи в пакете Visual System Simulator.

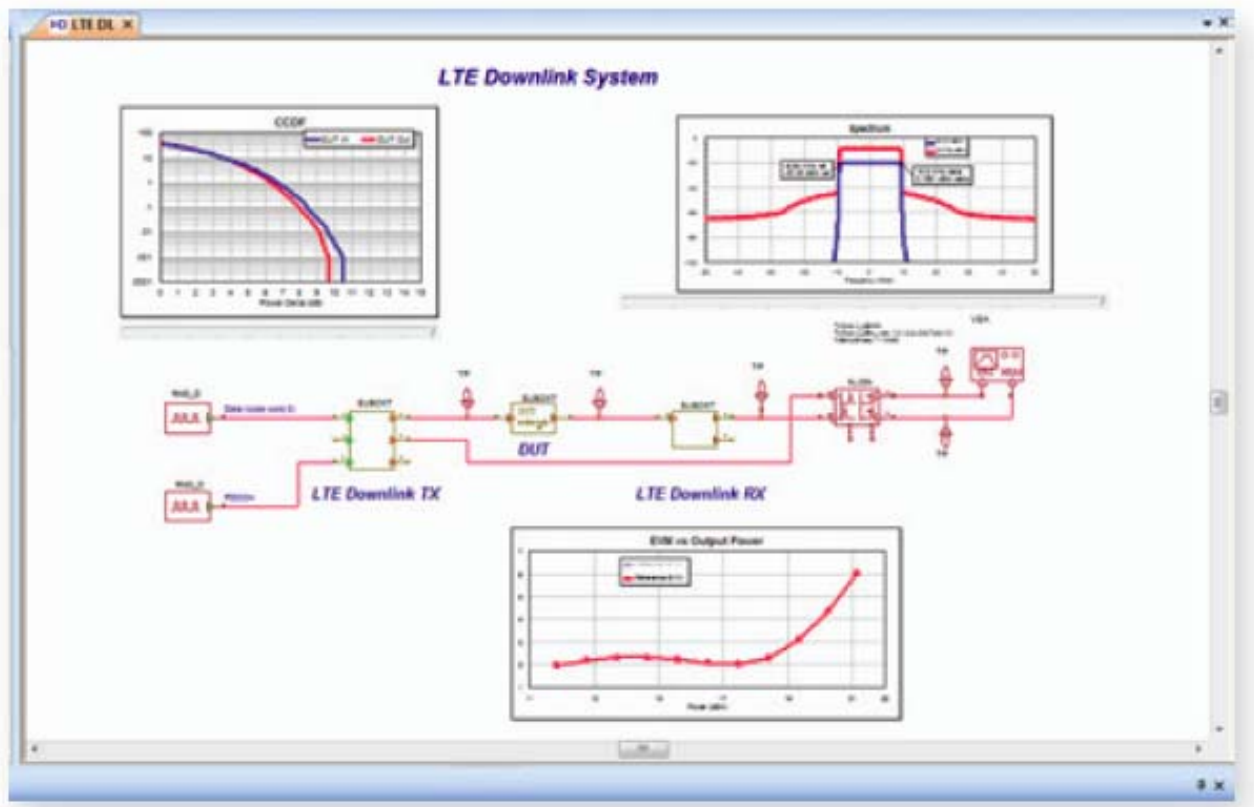


Рис. 7. Пример моделирования в Visual System Simulator

## **Моделирование принципиальных электрических схем**

После моделирования структурной схемы проектируются принципиальные электрические схемы самих составных блоков, осуществляются различные проверки работоспособности и выбирается элементная база.

Детальное проектирование и исследование радиоэлектронных устройств на ЭВМ на уровне принципиальных схем можно провести с помощью целого ряда специальных прикладных программных пакетов. В учебных целях и на начальных этапах работы целесообразно применять более простые программные пакеты: MiltiSim (Electronics Workbench), MicroCAP, CircuitMaker и др. Большинство этих пакетов использует данные в текстовом формате SPICE, чем обеспечивается их совместимость со многими САПР.

Для более сложных задач используются такие профессиональные пакеты, как OrCAD (PSpice A/D), P-CAD 2000-200X (ACCEL EDA), Altium Designer (Protel), eProduct Designer, PowerPCB, CAM 350, Viewlogik (Analog), BETASoft, MATLAB+Simulink (SimElectronics Toolbox) и др.

При проектировании устройств сверхвысокочастотного диапазона могут быть использованы программы Microwave Office, CST Microwave Studio, EMPro, Momentum и др.

Все современные программные продукты предполагают графический ввод проекта в редакторе принципиальных схем, после чего автоматически генерируется список схемных соединений, необходимый для работы программы моделирования. В качестве вычислительного ядра почти во всех пакетах используется программа SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Различные версии этой программного продукта были в разное время заимствованы производителями схемотехнических САПР для использования в своих прикладных пакетах в качестве основного

вычислительного ядра. Сейчас для моделирования аналоговых устройств в основном используется версия SPICE 3, а для моделирования смешанных аналого-цифровых устройств – версия XSPICE. Рассмотрим SPICE подробнее.

### **Симулятор электронных схем SPICE**

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. Является мощной программой, используемой в разработке печатных плат для проверки целостности схемы и для анализа ее поведения. В настоящее время SPICE де-факто стала эталонной программой-ядром моделирования аналоговых и аналого-цифровых электронных цепей.

Первая версия SPICE была разработана в середине 70-х годов в Electronics Research Laboratory в Калифорнийском университете в Беркли. Она позволяла анализировать линейные и нелинейные цепи во временной области, рассчитывать частотные характеристики линейных цепей. Программа SPICE 1 была целиком написана на языке FORTRAN, и для анализа линейных резистивных цепей использовался метод узловых напряжений. Библиотека моделей электронных компонентов включала модели диода и биполярного транзистора (модель Молла-Эберса).

В последующем программа SPICE совершенствовалась, появлялись новые версии, расширялся список моделей компонентов, и уже в конце 70-х годов SPICE стала широко использоваться в промышленности для проектирования и моделирования электронных схем.

В 1975 году вышла вторая версия программы SPICE 2, которая так же была написана на FORTRAN, но имела больше элементов, позволяла изменять временной шаг при моделировании, а уравнения

цепей формулировались при помощи модифицированного метода узловых потенциалов.

Последняя редакция второй версии SPICE 2G.6 появилась в 1983 году. В ней были переработаны модели биполярных и полевых МОП-транзисторов. Модель биполярного транзистора в версии SPICE 2G.6 основана на уравнениях Гуммеля-Пуна.

В 1985 году была разработана следующая версия программы, SPICE 3. Она базируется на версии SPICE 2G.6 и является ее развитием. Математическое ядро программы было полностью переписано на языке С. Для представления результатов моделирования стал использоваться графический интерфейс (эпюры напряжений, графики частотных характеристик и т.д.). В программу были включены программные модели новых электронных компонентов: длинные линии с потерями, неидеальные ключи и т.д. Появились новые модели МОП-транзисторов, учитывающие физические эффекты, возникающие при уменьшении геометрических размеров приборов.

В середине 80-х годов появились программы схемотехнического моделирования, предназначенные для персональных компьютеров. В 1984 г. корпорация MicroSim представила свою версию SPICE для персональных компьютеров, назвав ее PSpice. Эта программа и все ее последующие версии используют математические модули SPICE, а также SPICE формат представления входных и выходных данных.

Первые версии PSpice компании MicroSim позволяли моделировать только аналоговые радиоэлектронные устройства. Рассчитывались переходные процессы при действии сигналов различной формы, частотные характеристики, рабочие точки нелинейных приборов. В начале 90-х годов были созданы версии, позволяющие моделировать не только аналоговые, но и смешанные аналого-цифровые устройства. Программа получила более удобный

интерфейс, обеспечивающий графический ввод схем вместо текстового.

Современные версии PSpice представляют вычислительную среду, предназначенную для моделирования аналоговых и цифровых электронных схем. Существенное достоинство программы заключается в возможности моделирования смешанных аналого-цифровых схем без применения вспомогательных программных модулей согласования аналоговых и цифровых сигналов. Это достигается за счет автоматического использования специальных интерфейсов и значительно облегчает моделирование смешанных аналого-цифровых устройств.

Процедура моделирования электронных схем в программе PSpice состоит из трёх этапов:

1. Создание принципиальной схемы в графическом редакторе;
2. Непосредственно моделирование работы схемы;
3. Представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме (эпюры напряжений, АЧХ и т.д.).

Базовый набор электронных элементов PSpice включает резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы (с управляющим  $p-n$  переходом и изолированным затвором), длинные линии, источники напряжения и тока, генераторы сигналов различной формы. Аналоговые интегральные схемы, а также некоторые электронные компоненты (тиристоры, некоторые виды полевых транзисторов) представляются подсхемами, параметры которых задает пользователь.

Базовый набор электронных компонентов PSpice содержит также цифровые функциональные блоки, выполняющие логические операции. Кроме того, существуют обширные библиотеки серийно выпускаемых цифровых компонентов.



Для примера на рисунке 8 показано описание модели  $n$ -канального МОП-транзистора NMOS5P0.

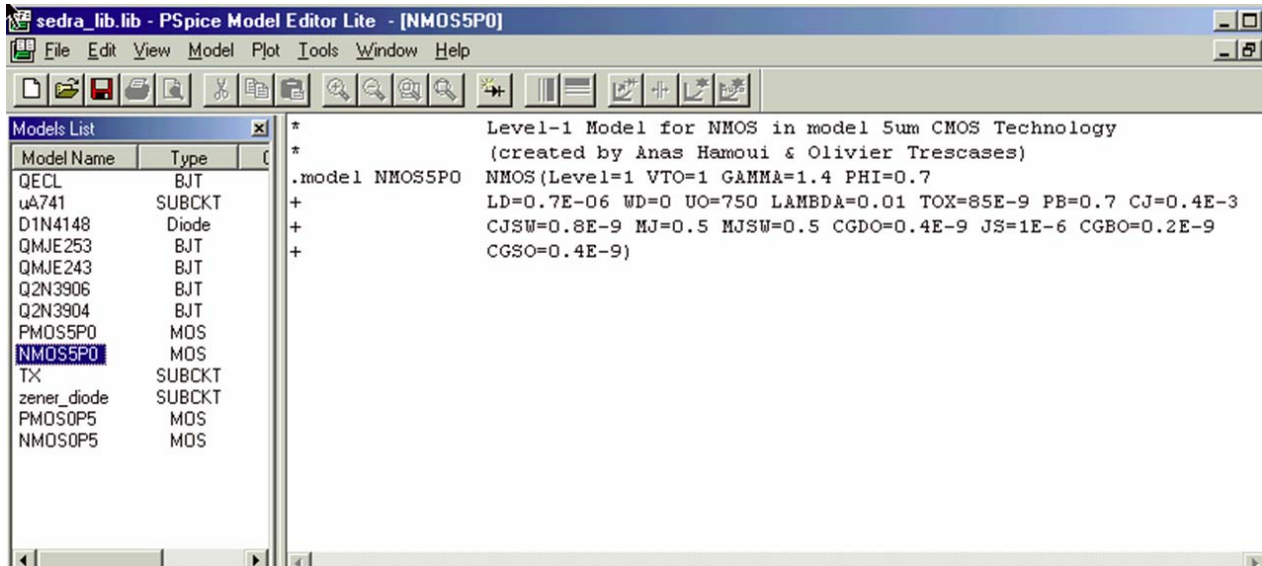


Рис. 8. Модель  $n$ -канального МОП-транзистора в PSpice

В PSpice (SPICE) возможны следующие виды анализа.

1. Bias – Анализ по постоянному току для больших сигналов;
2. DC (Direct Current) – Анализ по постоянному току для малых сигналов;
3. AC (Alternating Current) – Анализ по переменному току (расчет частотных характеристик линейных цепей);
4. Transient – расчет переходных процессов в нелинейных цепях при действии сигналов произвольной формы;
5. Fourier Analysis – Анализ спектров сигналов;
6. Parametric Sweep – Режим вариации параметров компонентов цепи;
7. Sensitivity – Расчет характеристик чувствительности линейных цепей к вариациям параметров компонентов в режимах постоянного и переменного тока (метод наихудшего случая);

8.Noise Analysis – Анализ спектральной плотности мощности шума на входе и выходе схемы;

9.Вероятностный анализ разброса параметров электронных компонентов методом Монте-Карло.

Алгоритм функционирования SPICE приведен на рисунке 9ниже.



Рис. 9. Блок-схема алгоритма функционирования SPICE

## Программные пакеты создания и проверки SPICE моделей электронных компонентов

### 1. Model Builder

*Производитель: Agilent Technologies*

*Сайт продукта: <http://www.agilent.com/find/eesof-mbp>*

Программа Model Builder (MBP) представляет собой комплексное решение для моделирования полупроводниковых приборов на основе кремния и экстракции полученных моделей.

Основные возможности программы Model Builder [8]:

- создание SPICE моделей;
- экстракции моделей для полевых МОП-транзисторов, биполярных транзисторов, диодов и пассивных компонентов;
- поддержка современных моделей, включая BSIM6, BSIM-IMG, BSIM-CMG и др.;
- возможность создания моделей старения, моделей функционирования в условиях перегрузки, моделей высоковольтных устройств;
- дружественный пользовательский интерфейс и широкий набор вспомогательных программ для моделирования.

На рисунке 10 показан пример моделирования транзистора в данном программном пакете.

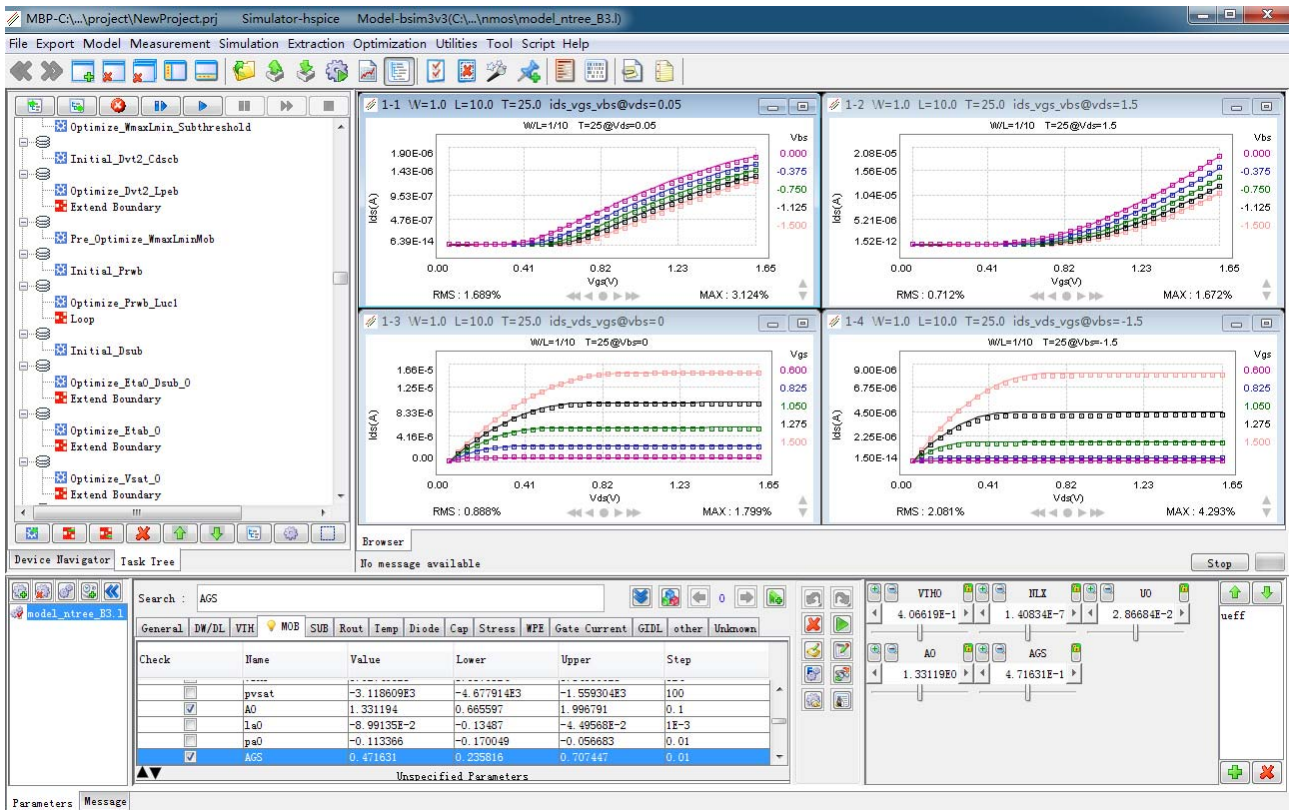


Рис. 10. Пример моделирования в Model Builder (MBP)

## 2. MQA

Производитель: *Agilent Technologies*

Сайт продукта: <http://www.agilent.com/find/eesof-mqa>

Программа проверки качества модели (MQA) позволяет разработчикам и производителям интегральных схем проводить проверку достоверности, сравнение и документирование моделей SPICE.

Основные возможности программы MQA [9]:

- проверка качества и достоверности моделей SPICE;
- отладка результатов моделирования SPICE;
- проверка достоверности заводских моделей; создание детализированных отчетов по проверке качества моделей;
- сравнение различий между версиями модели, симуляторами SPICE и технологиями производства.

Пример анализа моделей SPICE в пакете MQA приведен на рисунке 11.

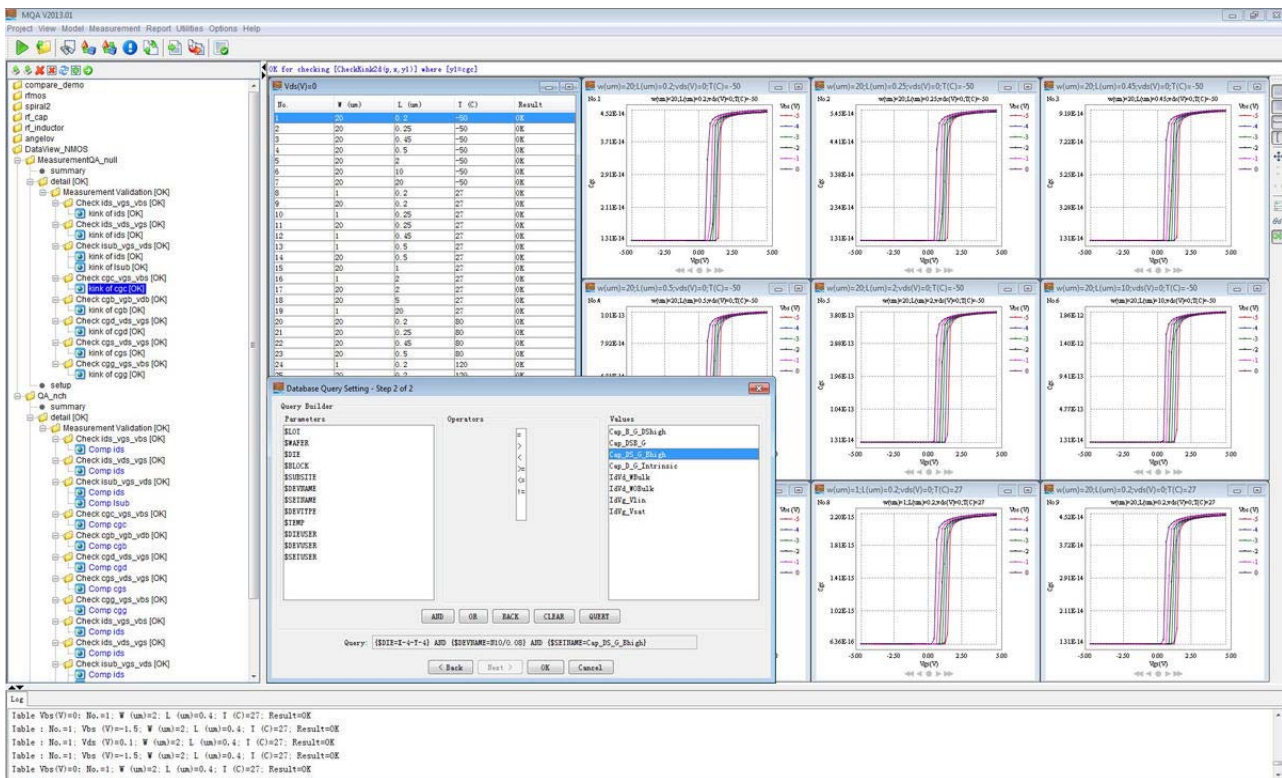


Рис. 11. Пример моделирования в MQA

## Программные пакеты моделирования принципиальных электрических схем

### 1. NI Multisim (Electronics Workbench)

Производитель: National Instruments

Сайт продукта: <http://www.ni.com/multisim/>

Программа NI Multisim (ранее Electronics Workbench) представляет собой программную среду создания и моделирования схем электронных устройств [10]. Multisim является программным пакетом схемотехнического моделирования, использующим оригинальные алгоритмы моделирования вычислительного ядра SPICE Беркли. Multisim первоначально была создана компанией Electronics Workbench, которая в настоящее время является подразделением National Instruments. Пакет Multisim включает в



себя моделирование микроконтроллеров (MultiMCU), а также интегрированные функции импорта и экспорта принципиальных схем, разработанных в других САПР. Multisim широко используется в образовании и промышленности для изучения работы электронных схем и их моделирования.

В программе имеется большой набор виртуальных измерительных приборов (вольтметры, амперметры, генераторы сигналов, осциллограф, измеритель амплитудно-частотной характеристики и т.п.). Испытуемая схема "монтируется" на виртуальном лабораторном столе (workbench), и затем проводятся необходимые измерения (см. рисунок 12). При этом настройка виртуальных измерительных приборов осуществляется практически так же, как и при работе с органами управления передней панели реальных приборов.

Благодаря интеграции пакетов Multisim и LabVIEW, специалисты могут точнее определять и анализировать поведение схем и детектировать ошибки еще на ранних стадиях разработки.

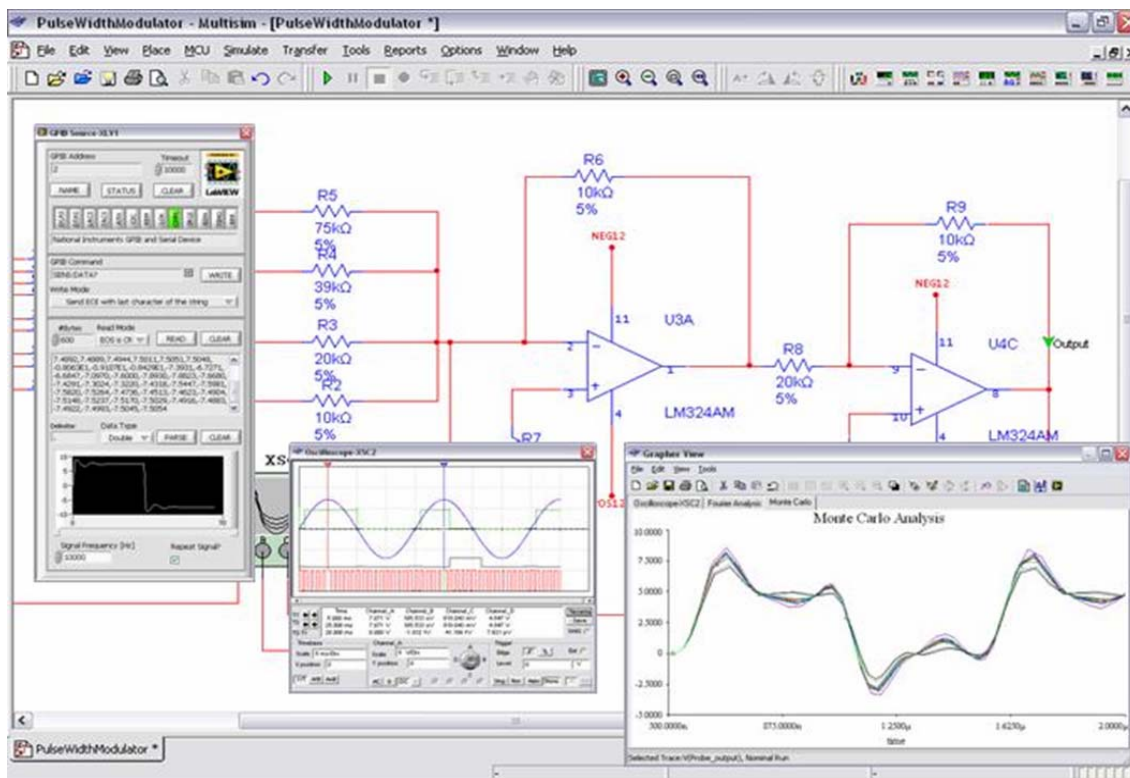


Рис. 12. Пример моделирования в NI Multisim

## 2. Micro-Cap

*Производитель: Spectrum Software*

*Сайт продукта: <http://www.spectrum-soft.com/>*

Семейство программ схемотехнического анализа Micro-Cap (Microcomputer Circuit Analysis Program) пользуется также достаточно большой популярностью. Это связано с тем, что эти программы традиционно имеют удобный, дружелюбный интерфейс и достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам компьютера. Но при этом предоставляемые возможности достаточно велики. Micro-Cap позволяет анализировать не только аналоговые, но и цифровые устройства [11]. Возможно также и смешанное моделирование аналого-цифровых электронных устройств. Опытные пользователи пакета могут также в нестандартной ситуации создавать собственные макромодели, облегчающие имитационное моделирование без потери существенной информации о поведении системы.

Пакет Micro-Cap рекомендуется для выполнения исследовательских работ, не предусматривающих немедленной конструкторской реализации (т.е. разводки печатной платы и оформления конструкторской документации). В состав программы входит модуль расчета параметров моделей аналоговых элементов по результатам экспериментальных исследований (таким способом создаются новые модели). В системе предусмотрен режим исследования чувствительности выходного сигнала к изменению параметров любого элемента схемы. Есть возможность определить входное и выходное сопротивления устройства. Предусмотрена возможность разработки активных и пассивных фильтров с заданными параметрами.

Полная совместимость со SPICE-моделями и SPICE-схемами и развитые возможности конвертирования позволяет пользователю Micro-Cap успешно пользоваться всеми разработками других схемотехнических САПР (например, ORCAD), а полученные навыки проектирования и моделирования позволят в случае необходимости гораздо быстрее осваивать более сложные профессиональные пакеты моделирования.

Пример моделирования принципиальной электрической схемы в пакете Micro-Cap приведен на рисунке 13.

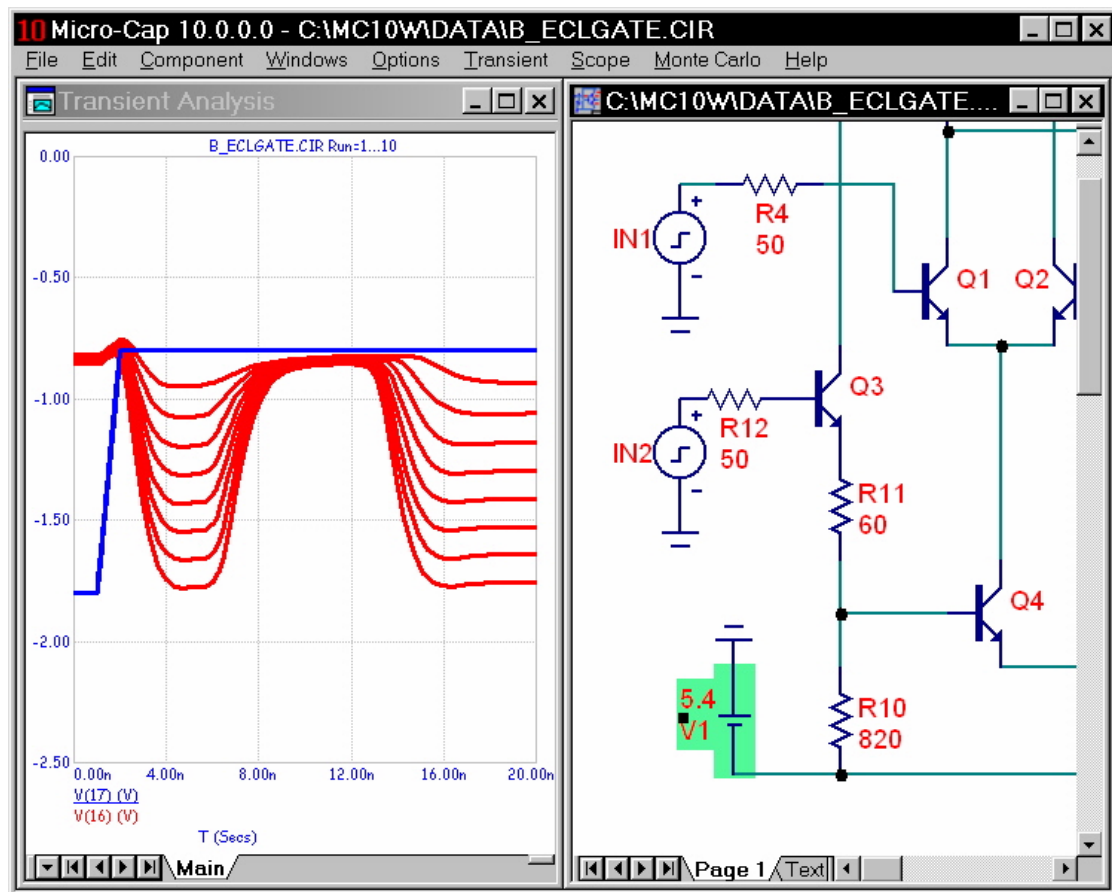


Рис. 13. Пример моделирования в Micro-Cap



### 3. Cadence (OrCAD) PSpice A/D

*Производитель: Cadence Design Systems*

*Сайт продукта: [http://www.cadence.com/products/orcad/pspice\\_simulation/Pages/default.aspx](http://www.cadence.com/products/orcad/pspice_simulation/Pages/default.aspx)*

Cadence Pspice A/D является полнофункциональным симулятором аналоговых и смешанных электрических цепей и де-факто является промышленным стандартом среди программ моделирования, основанных на SPICE. Данный программный пакет позволяет симулировать сложные схемы, содержащими как аналоговые, так и цифровые компоненты, и поддерживает широкий спектр имитационных моделей, таких как транзисторы, широтно-импульсные модуляторы, ЦАП и АЦП [12]. Встроенные математические функций и поведенческие методы моделирования позволяют осуществлять быстрое и точное моделирование схем, а также эффективно выполнять отладку. PSpice A/D также позволяет пользователям разрабатывать имитационные модели для трансформаторов и дросселей постоянного тока.

Дополнительные возможности анализа основаны на интеграции с MATLAB Simulink для совместного моделирования. Продвинутое функции, такие как моделирование температуры компонентов и их стресс-анализ, электромеханическое моделирование, анализ наихудшего случая, моделирование по методу Монте-Карло, – предназначены для разработки высокопроизводительных систем, которые должны быть надежными и выдерживать вариации различных параметров.

Пример моделирования принципиальной электрической схемы в пакете Pspice A/D приведен на рисунке 14.

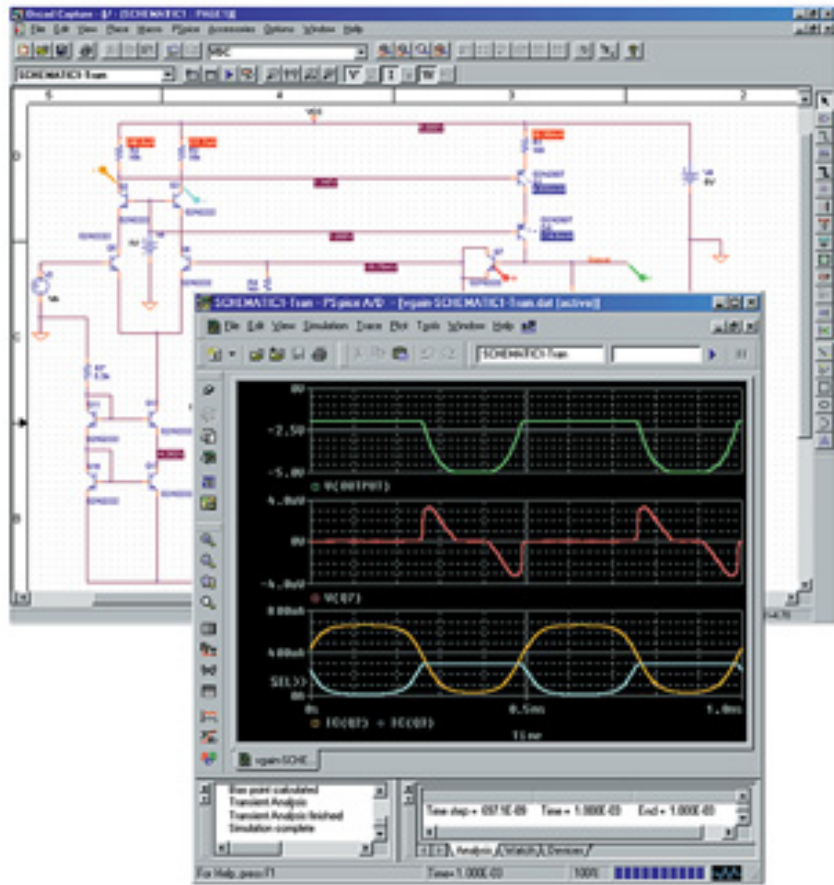


Рис. 14. Пример моделирования в PSpice A/D

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение структурно-функционального моделирования.
2. Перечислите основные принципы структурно-функционального моделирования.
3. В чем заключается принцип «черного ящика»?
4. Какие основные этапы выполняются при проектировании радиоаппаратуры?
5. В чем заключается основное преимущество структурно-функционального моделирования над проведением экспериментальных испытаний?
6. Перечислите основные САПР для функционального моделирования радиоэлектронных систем.
7. В чем заключается концепция графического программирования в пакете LabVIEW?
8. Перечислите основные САПР для создания и моделирования принципиальных электрических схем.
9. Какие виды анализа возможны в SPICE?
10. Опишите алгоритм функционирования SPICE.

## Список использованных Интернет-ресурсов

1. Официальный сайт продукта Simulink (производитель The MathWorks, Inc.) – <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
2. Официальный сайт продукта SysCalc (производитель Arden Technologies, Inc.) – <http://www.ardentech.com/>
3. Официальный сайт продукта SystemVue (производитель Agilent Technologies) – <http://www.agilent.com/find/eesof-systemvue>
4. Официальный сайт продукта LabVIEW (производитель National Instruments) – <http://www.labview.ru/>
5. Официальный сайт продукта Hypersignal RIDE (производитель National Instruments) – <http://www.ni.com/support/ride.htm>
6. Официальный сайт продукта VisSim (производитель Visual Solutions) – <http://www.vissim.com/>
7. Официальный сайт продукта Visual System Simulator (производитель AWR Corporation) – <http://www.awrcorp.com/ru/products/visual-system-simulator>
8. Официальный сайт продукта Model Builder (производитель Agilent Technologies) – <http://www.agilent.com/find/eesof-mbp>
9. Официальный сайт продукта MQA (производитель Agilent Technologies) – <http://www.agilent.com/find/eesof-mqa>
10. Официальный сайт продукта NI Multisim (производитель National Instruments) – <http://www.ni.com/multisim/>
11. Официальный сайт продукта Micro-Cap (производитель Spectrum Software) – <http://www.spectrum-soft.com/>
12. Официальный сайт продукта Cadence (OrCAD) PSpice A/D (производитель Cadence Design Systems) – [http://www.cadence.com/products/orcad/pspice\\_simulation/Pages/default.aspx](http://www.cadence.com/products/orcad/pspice_simulation/Pages/default.aspx)