

УДК 621.3

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ И РАЗРАБОТКЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Р.О.Мазманян, канд.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Представлена методика применения компьютерной структурной, структурно-схемотехнической и схемотехнической симуляции при создании измерительных систем с прогнозируемыми свойствами. Приведен пример моделирования по предложенной методике экстремальной системы автоматического регулирования с модуляцией, который включает в себя синтез структур настраиваемой модели объекта с единственным максимальным значением статической характеристики и собственно регулятора с синхронным детектором для определения градиента регулируемой величины по управляющему сигналу. Приведены результаты вычислительных экспериментов и показан поэтапный переход от структурной модели к смешанной структурно-схемотехнической. Библ. 21, рис. 7.

Ключевые слова: структурное моделирование, поведенческое моделирование, схемотехническое моделирование, SPICE, измерительные информационные системы.

Введение. Компьютерная симуляция является важным этапом в создании широкого спектра устройств и систем различного назначения. В первую очередь это относится к разработке и подготовке к производству интегральных микросхем, в основу которых положены новейшие результаты научных исследований. На определяющее значение проектирования в разработке микроэлектронных изделий указывает и отсутствие собственных производств у ведущих полупроводниковых компаний (Fabless companies) [20], которые обеспечивают полный бизнес-цикл изделия от идеи до продажи без изготовления кристаллов. Изготовление чипов выполняется по заказу компаний-разработчиков специализированными кремниевыми производствами.

Поскольку верификация проектного продукта посредством макетирования недостоверна, то его качество обеспечивается затратами на опытные партии изделия, устранение ошибок, допущенных при проектировании, процентами условного или безусловного брака и др., сказываясь, таким образом, на себестоимости продукции.

Другой областью электронной техники, в которой компьютерные средства исследования и проектирования также играют определяющую роль, является создание приборов и систем, предназначенных для выполнения измерений электрических и неэлектрических величин, автоматического управления отдельными устройствами, технологическим и производственным оборудованием, системами сбора, обработки, хранения и отображения различного рода – в том числе и измерительной – информации. Возрастающие требования к качеству проектирования в полной мере относятся и к электронным устройствам, предназначенным для работы с объектами энергетики. Это вызвано не только экономической целесообразностью или естественными требованиями рыночной конкуренции, но и эксплуатацией в экстремальных условиях и повышенной опасностью обслуживания такого оборудования.

Прикладные исследования, проводимые в академическом институте, непосредственно не связаны с массовым или серийным производством электронных устройств и систем и в подавляющем большинстве не требуют использования заказных интегральных микросхем. Несмотря на это, применение компьютерного моделирования на этапах исследований и разработки может привести как к ускорению процесса технической реализации результатов научных исследований, повышению качества проектируемого изделия, снижению расходов на создание приборов в целом, так и к созданию технических решений, пригодных для частичного или полного включения в последующие разработ-

ки. Возможность виртуального тестирования разработки с целью, например, определения параметрической или температурной критичности, его статических, динамических или частотных характеристик является одним из мощных средств создания систем с прогнозируемыми характеристиками.

Программные средства проектирования электронных устройств. Несмотря на исключительное значение симуляции разрабатываемых электронных устройств, сама программа симуляции, как, собственно, и процедура моделирования, являются частью общей, целостной системы «сквозного» [3,9,10] компьютерного проектирования в единой программной среде, включающей также и средства проектирования печатных плат. Единая среда разработки поддерживает верификацию печатных плат путем определения межтрековых связей и введения в моделирующую схему компонентов, которые отражают паразитные воздействия, вызванные особенностями топологии печатной платы.

Ядром многих программных средств компьютерной симуляции электронных устройств является **SPICE** (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) — симулятор электронных схем общего назначения. SPICE был разработан в Electronics Research Laboratory в Калифорнийском университете Беркли в начале 70-х годов. Последующие версии этого программного продукта обеспечили более высокую точность моделей компонентов и скорость моделирования, повышение надежности за счет лучшей сходимости решений алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих моделируемую схему.

Входная информация для программы-интерпретатора SPICE задается в виде текстового файла определенного формата (скрипта). Файл содержит описание схемы и тип выполняемого анализа. Со временем SPICE стала общепринятым стандартом схемотехнического моделирования.

По существу, программные средства компьютерной симуляции данного класса в виде интегрированной среды разработки ИСП (*IDE, Integrated development environment или integrated debugging environment*) являются оболочкой SPICE-ядра, обеспечивающей интерфейс с пользователем посредством реализации графического программирования – способа создания программы для компьютера путём манипулирования графическими объектами вместо написания её кода или скрипта. Во всех современных программах схемотехнического моделирования используются графические редакторы, позволяющие размещать символические изображения стандартных компонентов электроники и устанавливать связи между ними. Распространение различных программ моделирования с ядром SPICE [15,16,17,19,21] поддерживается производителями полупроводниковых приборов и интегральных схем, сопровождающих выпускаемую ими продукцию SPICE-макромоделями.

Особо следует отметить наличие во всех SPICE-симуляторах библиотек стандартных компонентов для поведенческого, т.е. структурного или функционального моделирования [10,18], что представляется весьма эффективным средством тестирования разработки на стадии проверки идей и составления его функциональной спецификации. Новейшие версии программ для компьютерного моделирования электронных устройств обеспечивают также возможность симуляции в едином проекте одновременно аналоговых, цифровых и программируемых компонентов.

Технологии компьютерного моделирования в создании измерительных информационных систем. Проведение прикладных исследований в области измерений, как правило, имеет конечной целью создание новых приборов, устройств или систем. Здесь рассмотрим этапы и последовательность их выполнения, непосредственно связанные с применением компьютерного моделирования в исследованиях и разработке измерительных информационных систем без привлечения безусловно существующей предыстории стартового этапа НАЧАЛО в схематическом представлении рассматриваемых процедур (рис. 1).

Разумеется, основные требования к создаваемому устройству должны быть сформулированы на стадии подготовки к проведению исследований. Именно эти обобщенные требования будут определять направление исследований, результаты которых будут реализованы в аппаратной (*hardware*) и программной (*software*) составляющих создаваемого программно-аппаратного комплекса.

Результаты прикладных исследований в виде формального описания измеряемой величины, всех основных операций измерений, средств их реализации, алгоритмов обработки значений измеряемой величины, источников погрешностей и их особенностей, методов и средств повышения точности измерений являются основой для составления функциональной спецификации – выполняемых функций разрабатываемого устройства.

Важной частью прикладных исследований является представление измерительных преобразователей в виде схем замещения, которые необходимы для разработки обобщенных и рабочих моделей первичных измерительных преобразователей, параметры и характеристики которых определя-

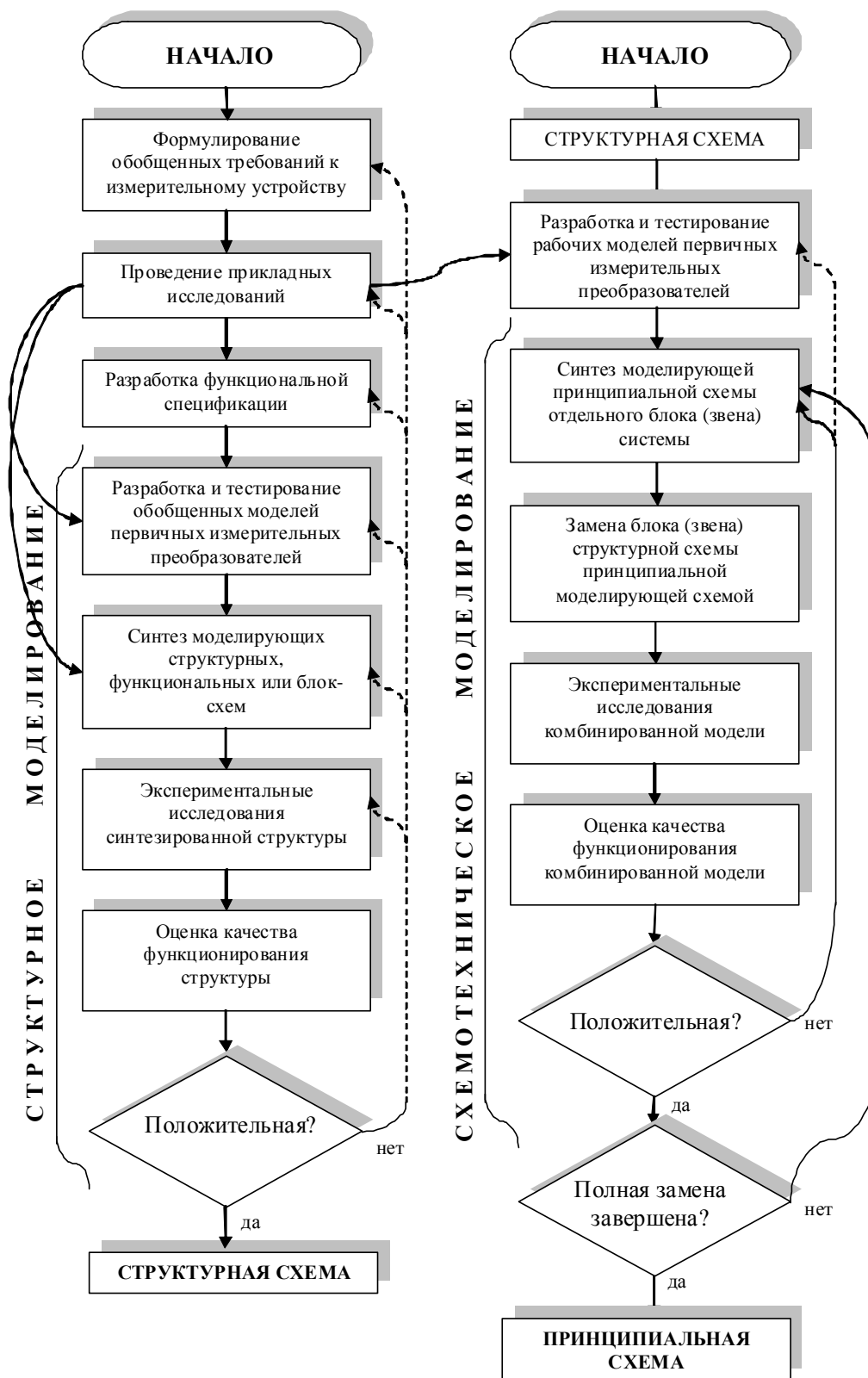


Рис. 1

ются посредством вычислений (индукционные, емкостные датчики) или проведения физических экспериментов (датчики Холла).

Операции измерений, алгоритмы и другие результаты исследований вместе с функциональной спецификацией определяют состав и конфигурацию моделирующих структурных, функциональных или блок-схем, которые в дальнейшем будем называть структурными схемами. Последующие

этапы вместе с уже описанными образуют итерационный цикл, в результате выполнения которого будет синтезирована моделирующая структурная схема, реализующая назначение (функциональная спецификация) разрабатываемого устройства.

Выходным продуктом этой части компьютерного моделирования является моделирующая структурная схема, которая будет положена в основу дальнейшего схмотехнического моделирования. Следующая часть компьютерного моделирования – схмотехническое моделирование – также имеет стартовый этап НАЧАЛО и готовую для дальнейших преобразований СТРУКТУРНУЮ СХЕМУ.

При структурном моделировании во многих случаях достаточным является описание измерительного преобразователя в виде звена с идеальной функцией преобразования, на основе которого и строится его модель. Схмотехническому моделированию, представляющему собой итерационную процедуру, на каком-то этапе не будет удовлетворять идеализированное описание преобразователя в силу необходимости достижения, например, заданной точности измерений системы с реальными компонентами.

Степень приближения свойств модели к характеристикам реального преобразователя может определяться не только требованиями разрабатываемого проекта, но и особенностями текущей стадии итерационного процесса схмотехнического моделирования.

Следующие этапы процесса схмотехнического моделирования предполагают последовательную замену отдельных звеньев структуры моделями их схмотехнических реализаций с непрерывной оценкой качества функционирования комбинированной (структурно-схмотехнической) модели разрабатываемого устройства, состоящего как из звеньев структурной схемы, так и моделей принципиальных схем. Процесс итерации продолжается до полной замены звеньев структуры их схемными реализациями. Результатом схмотехнического моделирования является принципиальная схема, пригодная после редактирования к использованию для разработки печатных плат проектируемого устройства в той же или какой-либо другой среде проектирования.

Структурное и схмотехническое моделирование в проектировании экстремальной системы. Демонстрацию некоторых этапов компьютерного проектирования выполним на примере структурного и схмотехнического моделирования простейшей одномерной экстремальной системы с использованием синхронного детектора для поиска максимума регулируемой величины.

Системы экстремального регулирования, являющиеся частью широкого класса адаптивных систем [1,13,14], обеспечивают автоматическое определение градиента регулируемой величины и организацию движения к точке экстремума [2,11]. Для поиска экстремального значения регулируемой величины в ряде случаев удобно использовать метод синхронного детектирования, основанный на модуляции медленно изменяющейся регулируемой величины у гармоническим сигналом [8]. Регулируемая величина вместе с гармонической составляющей поисковой траектории поступает на один вход синхронного детектора, на другой, опорный вход которого подается сигнал генератора поисковых движений. Для одномерной, одноконтурной экстремальной системы выходной сигнал синхронного детектора определяет значение производной – градиент регулируемой величины у по управляющему сигналу x в этой точке.

Одно- и многомерные системы экстремального регулирования находят применение для оптимизации различных производственных процессов и оборудования, например, в энергетике [12]. Развитие методов экстремального регулирования и параметрической модуляции [4,6], их использование в измерительных системах постоянного и переменного тока сформировало новую область в науке об измерениях электрических величин [5].

Очевидно, что не только демонстрационный характер примера, но и цели проводимого моделирования, связанные с созданием и тестированием разрабатываемой системы, требуют использования некоторой обобщенной модели объекта управления, статическая характеристика которого в заданных пределах управляющего воздействия имеет один, четко выраженный максимум. При экспериментальных исследованиях системы имеет исключительное значение возможность предопределяемого постоянного для данного эксперимента или управляемого изменения положения экстремальной точки обобщенной модели по каждой из двух координат статической характеристики.

Еще одно требование, связанное с отсутствием разрывов как самой статической характеристики, так и с непрерывностью его первой производной по регулирующему воздействию, исключает применение кусочно-линейной аппроксимации для синтеза модели объекта регулирования.

На рис. 2, а показана структурная схема модели объекта со статической характеристикой, имеющей единственный экстремум в диапазоне изменения регулирующего воздействия от 0.75V до 4.5V.

В синтезированной структуре использованы стандартные звенья библиотеки аналогового поведенческого моделирования ABM (*Analog Behavioral Modeling*), имеющейся в SPICE-подобных программах для моделирования. Константа CONST1 задает такое смещение статической характеристики, чтобы ее максимум приходился на середину диапазона изменений регулирующего воздействия. Звено COS1 вычисляет значение косинуса от смещенного входного сигнала и инвертирует его для переноса в область положительных значений.

Максимум регулируемой величины 4V задается постоянным напряжением источника V2 и может изменяться как до начала, так и во время проведения эксперимента. На рис. 2, б показаны изменения входного сигнала V(INPUT) для трех фиксированных значений напряжения источника V3, сдвигающих максимум статической характеристики в направлении оси абсцисс, и экспериментально полученные статические характеристики модели объекта V(OUTPUT).

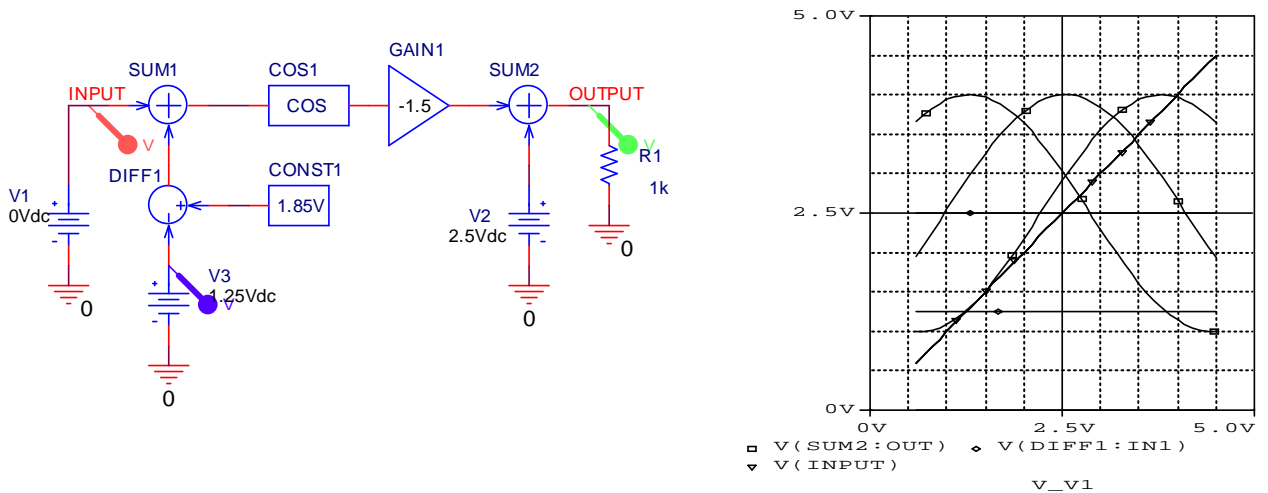


Рис. 2, а,б

Моделирующая структурная схема (рис. 3) содержит описанную выше модель объекта МО с единственным экстремумом, генератор модулирующего сигнала ГМС, задающий траекторию поиска экстремума через сумматор SUM3, на второй вход которого поступает управляющее воздействие – сигнал с выхода идеального интегратора с передаточной функцией $W_{int}=25/s$, звена LAPLACE1. Вход интегратора подключен к синхронному детектору СД, выходной сигнал которого формируется перемножением (MULT1) регулируемой величины на выходе модели объекта регулирования и сиг-

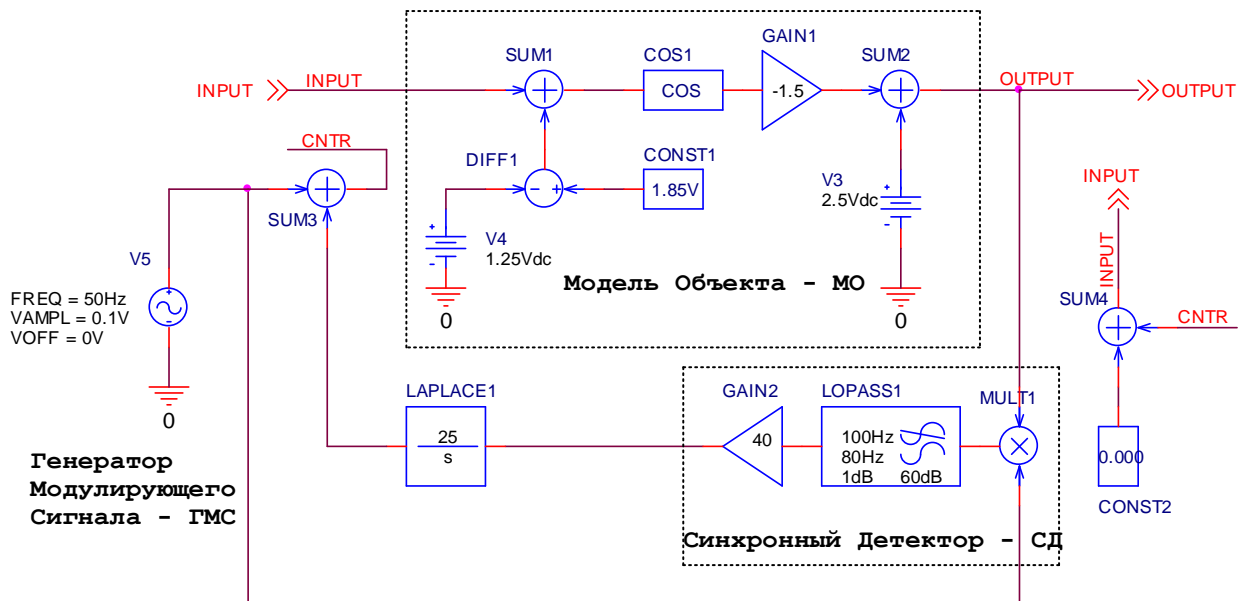


Рис. 3

нала ГСМ, фильтрацией нижних частот (LOPASS1) и усилителем напряжения (GAIN2). Значения параметров идеальных звеньев указаны на структурной схеме экстремальной системы (рис. 3).

Для оценки способности моделируемой системы реализовать свое основное функциональное назначение экспериментально определялись изменения регулируемой величины и управляющего воздействия (рис. 3) при трех фиксированных положениях экстремума статической характеристики объекта, показанных на рис. 2. Эксперименты проводились для различных начальных положений регулируемой величины OUTPUT – слева (рис. 4, а) и справа (рис. 4, б) от точки экстремума. Управляющее воздействие V(INPUT) в обоих случаях стремится к установлению такого значения «снизу» (рис. 4, а)

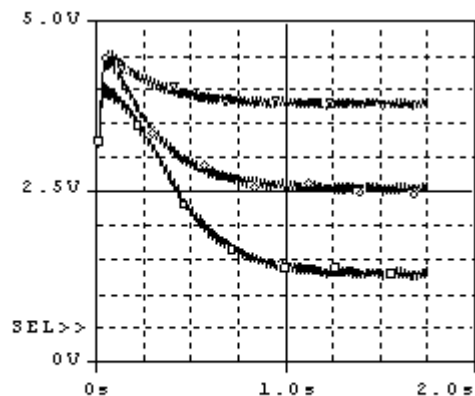
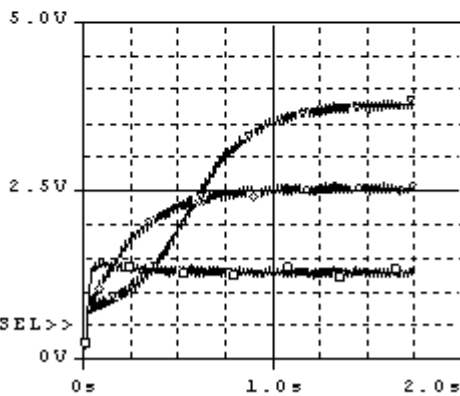
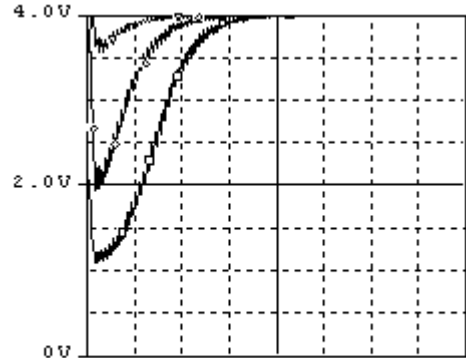
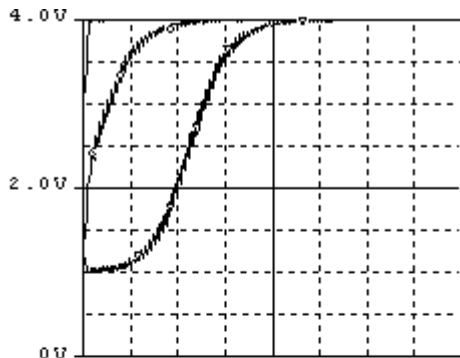


Рис. 4, а, б

и «сверху» (рис. 4, б), при котором регулируемая величина принимает максимальное значение.

Задание начального смещения регулируемой величины OUTPUT обеспечивалось коррекцией сигнала INPUT цепочкой SUM4, CONST2, включенной последовательно с выходом сумматора SUM3.

Следующий эксперимент проводился для оценки способности разработанной структуры со-

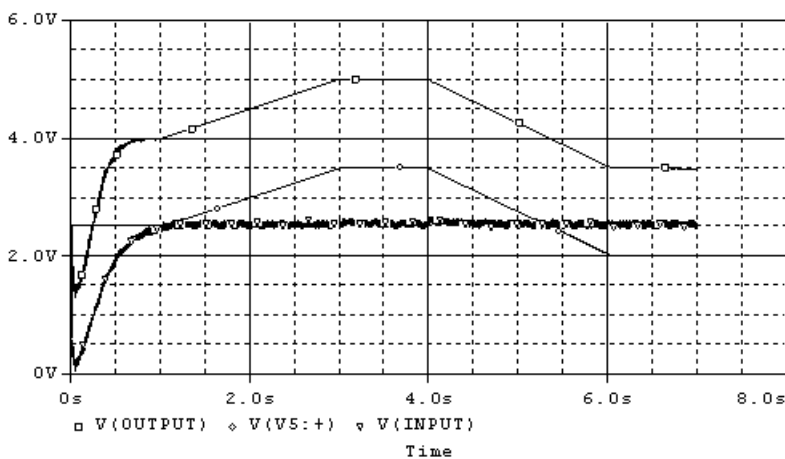


Рис. 5

проводить непрерывные изменения максимального значения регулируемой величины. Изменение смещения статической характеристики в направлении оси ординат моделировалось путем замены источника напряжения V3 (рис. 3) элементом библиотеки – стимулом VSTIM, с помощью которого кусочно-линейными отрезками были графически заданы изменения напряжения смещения V(V5:+) во времени (рис. 5). Здесь же показаны регулируемая величина V(OUTPUT) и управляющее воздействие

V(INPUT). Отметим, что изменение значения экстремума (но не его по-ложения) не приводит к дополни-тельным затратам поисковых усилий – управляющее воздействие остается неизменным.

Переход к схмотехническому моделированию в структурной схеме (рис. 3) начнем с замены моделями схемных реализаций ее двух функционально завершенных блоков – фильтра нижних

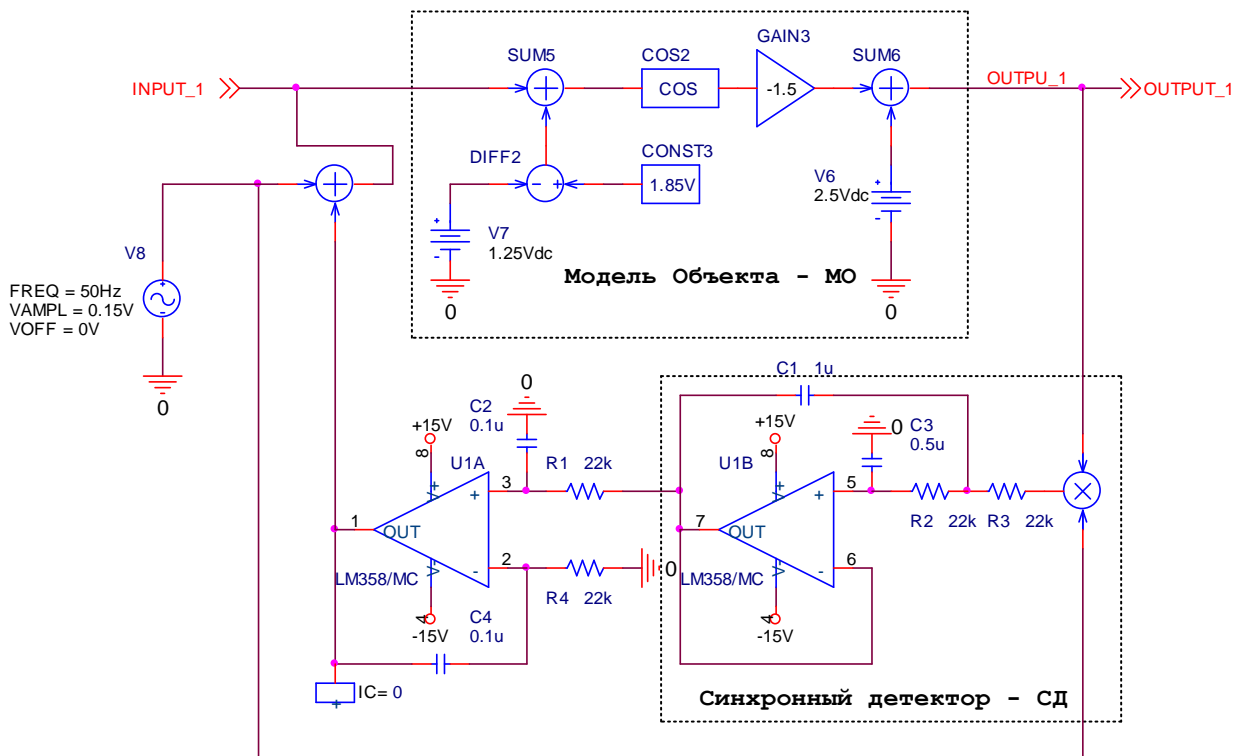


Рис. 6

частот ФНЧ и интегратора, входящего в состав синхронного детектора, (рис. 6).

Используем в качестве ФНЧ фильтр Баттеруорта второго порядка, обеспечивающий доста-точную скорость спада амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в переходной области [7]. Экспериментально определенные АЧХ для примененного при структурном моделировании LOPASS

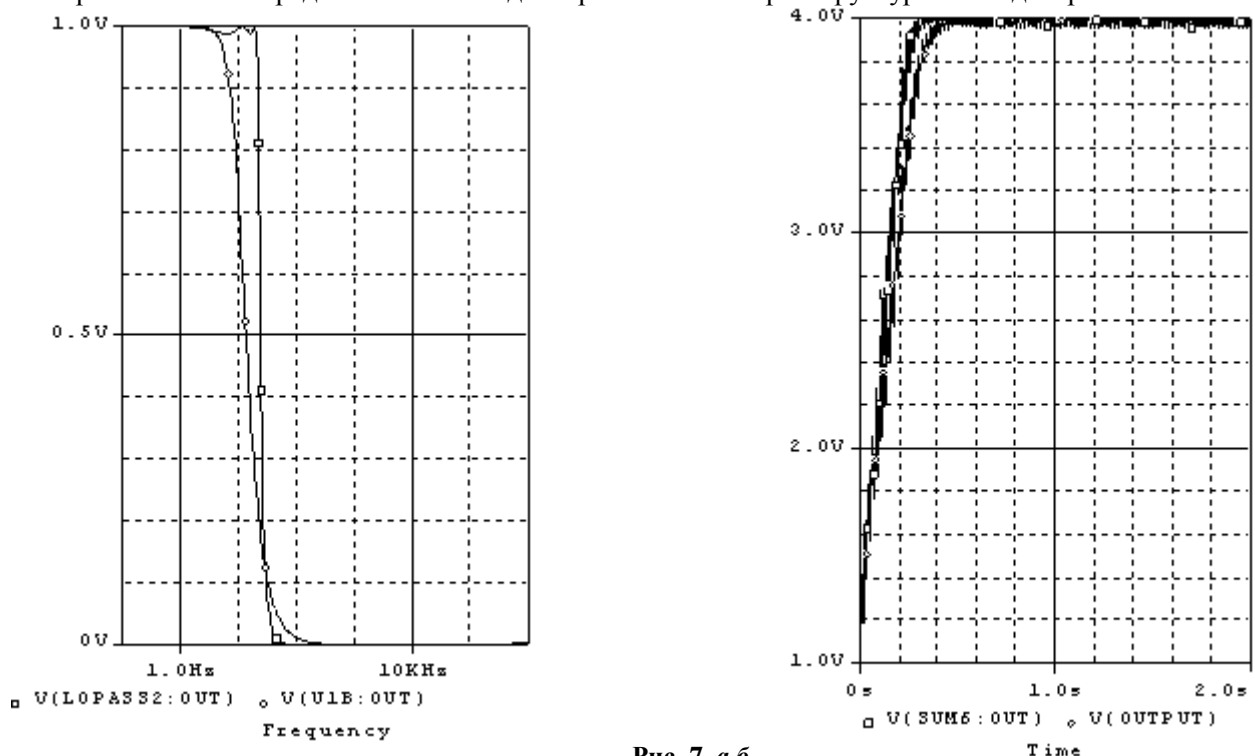


Рис. 7, а,б

фильтра и фильтра Баттеруорта с единичным коэффициентом усиления показаны на рис. 7, а.

Сравнение переходных характеристик структурной и структурно-схемотехнической моделей (рис. 7, б) показывает их функциональную идентичность. Это может служить основанием для продолжения дальнейших работ по синтезу принципиальных схем, реализующих рассмотренную структуру автоматической экстремальной системы или для поиска структурных методов и инструментальных средств для повышения точности и быстродействия, расширения функциональных возможностей проектируемой системы.

Выводы. Предложена методика применения средств структурной и схемотехнической симуляции в сквозном проектировании интегральной электроники, обеспечивающая неразрывность перехода от структурных или поведенческих моделей разрабатываемой измерительной системы к ее конкретной реализации в виде принципиальной схемы с моделями реальных компонентов полупроводниковой электроники.

Предпочтительными при выборе ИСР представляются те из них, которые обеспечивают возможность проведения одновременно с аналого-цифровым моделированием совместную симуляцию и отладку программируемых электронных компонентов, что исключительно важно при создании встро-енных систем.

Рассмотренный пример структурного и схемотехнического моделирования демонстрирует эффективность симуляции работы экстремальной системы регулирования в различных режимах и исключительную наглядность в отображении результатов компьютерных экспериментов.

1. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. – М: Высш. шк., 1989. – 263 с.
Aleksandrov A.G. Optimal and adaptive systems. – Moskva: Vysshiaia shkola, 1989. – 263 p. (Rus.)
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М: Физматгиз, 1978. – 768 с.
Besekerskii V.A., Popov E.P. The theory of automatic control systems. – Moskva: Fizmatgiz, 1978. – 768 p. (Rus.)
3. Булгакова Е. Altium Designer — система сквозного проектирования // САПР и графика. – 2010. – №5. – С. 65–67.
Bulgakova E. Altium Designer — through designing system // SAPR i grafika. – 2010. – №5. – P. 65–67. (Rus.)
4. Гриневич Ф.Б. Автоматические мосты с экстремальным регулированием при фазовой селекции регулирующих воздействий // Измерительная техника. – 1962. – №2.
Grinevich F.B. Automatic bridges with extreme control with phase selection of regulatory impacts // Izmeritelnaia tekhnika. – 1962. – №2. (Rus.)
5. Гриневич Ф.Б. Применение экстремального регулирования и параметрической модуляции при построении автоматических электроизмерительных устройств // «Автометрия», Сибирское отделение АН СССР, 1965. – С. 38–42.
Grinevich F.B. Application of extreme regulation and parametric modulation in the construction of electrical circuit devices // "Avtometriia", Sibirskoe otdelenie AN SSSR, 1965. – P. 38–42. (Rus.)
6. Гриневич Ф.Б. Принципы построения автоматических мостов переменного тока с экстремальным регулированием // Измерительная техника. – 1960. – №12.
Grinevich F.B. Principles for the construction of automatic ac bridge with an extreme control // Izmeritelnaia tekhnika. – 1960. – №12. (Rus.)
7. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. 2-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
Gutnikov V.S. Integrated electronics in the measuring devices. Second Edition. – Leningrad: Energoatomizdat, 1988. – 304 p. (Rus.)
8. Дехтяренко П.И. Синхронное детектирование в измерительной технике и автоматике. – К.: Техніка, 1965. – 315 с.
Dekhtiarenko P.I. Synchronous detection in the measuring technology and automation. – Kyiv: Tekhnika, 1965. – 315 p. (Rus.)
9. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. – М.: Солон, 2001. – 528 с.
Razevig V.D. Design system OrCAD 9.2. – Moskva: Solon, 2001. – 528 p. (Rus.)
10. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab. – М.: Солон, 1999. – 703 с.
Razevig V.D. System for electronic devices through design DesignLab. – Moskva: Solon, 1999. – 703 p. (Rus.)
11. Чинаев П.И. Самонастраивающиеся системы. Справочник. – К.: Наукова думка, 1969. – 528 с.

Chinaev P.I. Self-adjusting system. Reference. – Kyiv: Naukova dumka, 1969. – 528 p. (Rus.)

12. Шиняков Ю.А., Гордеев К.Г., Черданцев С.П., Обрусник П.В. Варианты построения экстремальных шаговых регуляторов мощности солнечных батарей // Труды ВНИИЭМ. Электромеханические устройства космических аппаратов. – 1997. – Т. 97. – С. 83–92.

Shiniakov Yu.A., Gordeev K.G., Cherdancev S.P., Obrusnik P.V. Building variants of the power extreme step controller for solarpanels // Trudy VNIEM. Elektromekhanicheskie ustroystva kosmicheskikh apparatov. – 1997. – Vol. 97. – P. 83–92. (Rus.)

13. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.

Yurevich E.I. Automatic Control Theory. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2007. – 560 p. (Rus.)

14. Astrom K.J., Wittenmark B. Adaptive Control. Addison-Wesley. – 1989, 2d ed., 1994.

15. Cadence OrCAD Solutions, <http://www.cadence.com/products/orcad/pages/default.aspx>.

16. Micro-Cap 9, <http://www.spectrum-soft.com/demo.shtml>

17. Microcontroller Unit Co-Simulation for SPICE-Based Circuits in NI Multisim, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5629> 18.

18. Parallel and distributed computing handbook. Zomaya A.Y., editor. – NY: McGraw-Hill, 1996, – 1232 p.

19. Proteus VSM simulation, <http://www.blitzlogic.com/VSM.HTM>

20. Understanding fabless IC technology. – Jorge S. Hurtarte, Evert A. Wolsheimer, Lisa M. Tafoya. – Newnes, 2007. – 273 с.

21. VMLAB: hardware and software together, <http://amctools.com/vmlab.htm>

УДК 621.3

Р.О.Мазманян, канд.техн.наук,

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Комп'ютерне моделювання в дослідженнях і розробці вимірювальних інформаційних систем

Представлено методику застосування комп'ютерної структурної, структурно-схемотехнічної і схемотехнічної симуляції при створенні вимірювальних систем з прогнозованими властивостями. Наведено приклад моделювання екстремальної системи автоматичного регулювання з модуляцією згідно із запропонованою методикою, яка включає синтез структур моделі об'єкту, що налаштовується, з одним максимальним значенням статичної характеристики і власне регулятора з синхронним детектором для визначення градієнта регульованої величини по керуючому сигналу. Наведено результати обчислювальних експериментів і показано поетапний перехід від структурної моделі до змішаної структурно-схемотехнічної. Бібл. 21, рис.7.

Ключові слова: структурне моделювання, поведінкове моделювання, схемотехнічне моделювання, SPICE, вимірювальні інформаційні системи.

R.O.Mazmanian,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Computer modeling in research and development of measuring information systems

A method of computer aided structural, mixed structural/schematic and schematic simulation for measuring systems with predictable properties design is presented. Here we demonstrate the proposed technique application on extremal automatic control system simulation. The application itself includes synthesis of the structures set up - a model of the object with a single maximum value of static characteristics and the actual controller with a synchronous detector which determines the gradient of the controlled variable to a control signal. Also we report obtained results of computational experiments and present the gradual transition from the structural to a mixed model. References 21, figures 7.

Key words: structural modeling, behavioral modeling, circuit simulation, SPICE, measuring system.

Надійшла 01.03.2011

Received 01.03.2011