

УДК 681.5: 004.94

Т.Н. Зайченко

Разработка новой методологии анализа функционирования систем управления

Рассмотрены теоретические и технологические основы исследования функционирования элементов и устройств систем управления полупроводниковых систем средствами вычислительного эксперимента. Представлены подходы к решению задач функционального и схемотехнического моделирования систем управления в методе компонентных цепей.

Ключевые слова: система управления, функциональное моделирование, схемотехническое моделирование, компонент, метод компонентных цепей.

Актуальность разработки инструментальных средств моделирования элементов и устройств систем управления. Современные системы автоматического и автоматизированного управления (САУ) многочисленны и разнообразны. В их состав входят электрические, пневматические, гидравлические и т.п. приборы. Исследование процессов функционирования САУ и их элементов, разработка алгоритмов управления базируются на методах и технологиях математического моделирования и вычислительного эксперимента. Наибольшим спектром возможностей в области моделирования обладает система MatLab с объектно- и проблемно-ориентированными пакетами расширения [1]. Вместе с тем разработка отечественных программных продуктов, конкурентоспособных на мировом рынке, и импортозамещение являются стратегическими государственными задачами [2, 3], поэтому исследования и разработки в области создания программных средств автоматизированного моделирования и проектирования являются актуальными.

На кафедре моделирования и основ теории цепей Томского госуниверситета систем управления и радиоэлектроники проводятся исследования и разработки по развитию методов и программных средств моделирования неоднородных технических устройств и систем. Данные работы выполняются на базе метода компонентных цепей (КЦ) Е.А. Арайса и В.М. Дмитриева [4]. На основе метода КЦ создана система моделирования МАРС (моделирование и автоматический расчет систем) [5]. Метод КЦ, систему моделирования МАРС и технологию формализованного цепного представления САУ для исследования в системе МАРС будем рассматривать как составные части методологии исследования САУ средствами вычислительного эксперимента. В настоящей статье представлены вопросы моделирования одного из основных классов систем контроля и управления – электрических САУ.

Общая характеристика метода компонентных цепей. Метод КЦ предназначен для моделирования объектов, исходная информация о которых может быть представлена в форме КЦ, т.е. в виде модели структуры. Основной структурной сущностью метода КЦ является многополюсный компонент с произвольным числом связей, которым инцидентны переменные связи. Математическая модель компонента – это уравнение либо система уравнений относительно его переменных связей и внутренних переменных. Совокупность компонентов, связи которых, именуемые ветвями КЦ, объединены в общих точках, именуемых узлами, определяется в методе КЦ как компонентная цепь $C_k = \{K, S, N\}$, где K – множество компонентов; S – множество связей компонентов из K ; N – множество узлов цепи.

Методом КЦ предусматриваются четыре типа связей компонента: связи энергетического типа S_k^e , которым соответствует пара топологических координат и пара дуальных переменных – $S_k^e \rightarrow (n_k, \eta_k b_k) \rightarrow (V_{nk}, V_{bk})$, где n_k – номер узла k -й связи; b_k – номер ветви; η_k – знак, задающий ориентацию связи; V_{nk}, V_{bk} – переменные связи потенциального и потокового типа; связи информационного типа S_k^i , которым соответствует одна топологическая координата и одна переменная связи, имеющая произвольный физический смысл – $S_k^i \rightarrow n_k \rightarrow V_{nk}$; связи скалярного типа, к которым относятся связи энергетического и информационного типов, и связи векторного типа, являющиеся объединением связей скалярного типа.

Математическая модель КЦ $M_{\text{ЦФ}}$, описывающая процесс функционирования исследуемого объекта, имеет вид

$$M_{\text{ЦФ}} = \{\mathbf{U}_{\text{КЦ}}, \mathbf{U}_b, \mathbf{U}_t\} \text{ при } S^e \neq \emptyset \text{ либо } M_{\text{ЦФ}} = \{\mathbf{U}_{\text{КЦ}}\} \text{ при } S^e = \emptyset,$$

где $\mathbf{U}_{\text{КЦ}}$ – совокупность уравнений моделей компонентов, входящих в КЦ; \mathbf{U}_b – уравнения базового узла; \mathbf{U}_t – уравнения узловых топологических законов сохранения для переменных потокового типа, записанные для всех узлов КЦ за исключением базового; S^e – множество связей энергетического типа.

Методом КЦ предусматривается автоматическое формирование моделей КЦ во временной и в частотной (для линейных непрерывных схем) областях. Каноническими формами компонентных уравнений во временной области являются: линейное, нелинейное и обыкновенное дифференциальное первого порядка. При моделировании во временной области $V_{nk} \rightarrow x(t)$, $V_{bk} \rightarrow y(t)$, где x, y – физические переменные связи. Использование в качестве компонентных уравнений вышеперечисленного типа позволяет реализовать достаточно широкий спектр моделей элементов в рамках задач схемотехнического и функционального моделирования.

Модель компонента во временной области является базовой. На ее основе формируются уравнения для действительных и мнимых составляющих при моделировании в частотной области.

В результате алгебраизации и линеаризации дифференциальных и нелинейных уравнений модели $M_{\text{ЦФ}}$ модель КЦ принимает вид системы линейных алгебраических уравнений относительно переменных связей КЦ и вспомогательных переменных: $\Phi \mathbf{V} = \mathbf{W}$, где Φ – квадратная матрица коэффициентов; \mathbf{W} – вектор-столбец правых частей; \mathbf{V} – вектор-столбец решения КЦ; $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_n, \mathbf{V}_b, \mathbf{V}_{bh}]^T$, где $\mathbf{V}_n, \mathbf{V}_b, \mathbf{V}_{bh}$ – векторы потенциальных, потоковых и внутренних переменных КЦ. Система МАРС реализует метод КЦ и технологию визуального вычислительного эксперимента. Основой formalизованного цепного представления исследуемых объектов в виде КЦ являются профессиональные языки схем.

Моделирование исполнительных устройств. Существует два подхода к моделированию технических устройств: физический, предполагающий построение модели с использованием физических законов сохранения и равновесия, и информационный, связанный с исследованием процессов на уровне преобразования сигналов. Физический подход реализуется в методах схемотехнического моделирования, информационный – в методах функционального и структурного. В первом случае используется профессиональный язык принципиальных схем, во втором – структурных и функциональных схем. Построение адекватных моделей процессов функционирования САУ базируется на системном подходе, а упрощение моделей их подсистем – на методе многоуровневого моделирования. Обычно при исследовании электромеханических и электромагнитных процессов моделирование силовой части осуществляется с использованием физического подхода, а блока управления (БУ) – с применением информационного. Следует отметить, что программно-алгоритмический аппарат метода КЦ позволяет реализовать оба подхода и многоуровневое моделирование.

Формализованное представление в методе КЦ электрических машин, магнитных элементов, силовых преобразователей и схемотехническое и функциональное моделирование в системе МАРС полупроводниковых систем электропривода и электропитания подробно изложены в работах [5–8]. Пример, иллюстрирующий схемотехническое моделирование пуска электрического двигателя, представлен на рис. 1.

Формализованное цепное представление исполнительных устройств при функциональном моделировании осуществляется с использованием компонентов звеньев САУ и компонентов математических блоков. В качестве примера на рис. 2 представлены разделы библиотеки моделей компонентов математических операций и нелинейных элементов САУ. Условные графические обозначения (УГО) компонентов (рис. 2, б и г) приводятся согласно их последовательности в списке компонентов (рис. 2, а и в) в порядке слева направо и сверху вниз. Компоненты, предназначенные для выполнения элементарных и тригонометрических функций, операций округления, отношения, логические операции предусматривают выбор типа модели; умножители и сумматоры допускают произвольное число входных связей.

Взаимодействие информационной и физической подцепей осуществляется посредством специальных согласующих компонентов, выполняющих преобразование типов переменных связей.

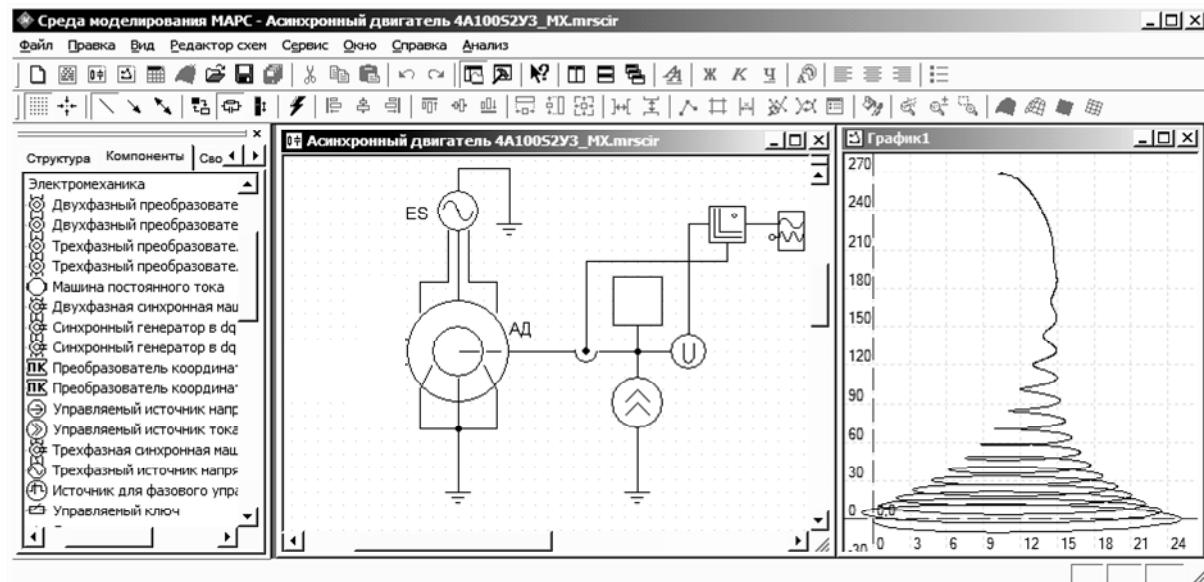
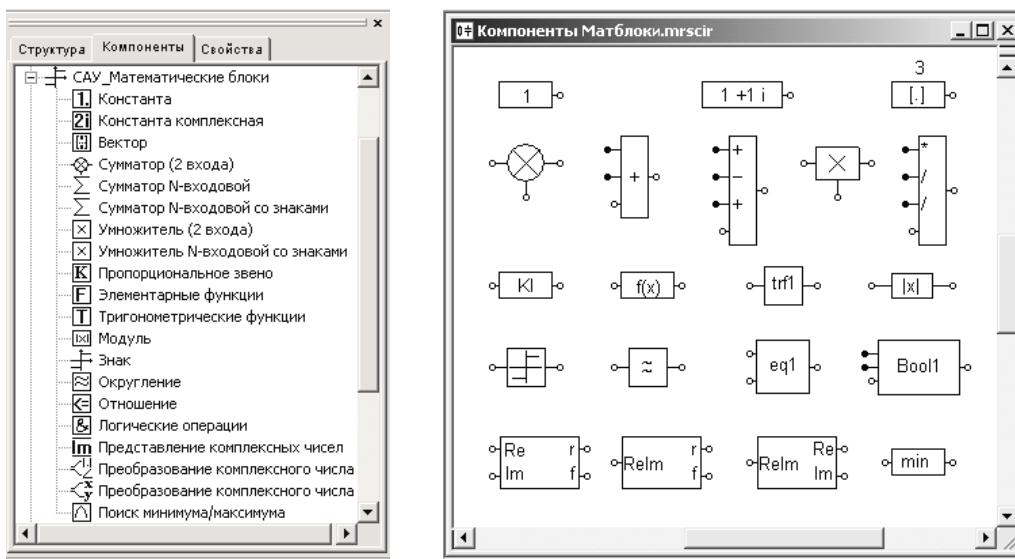
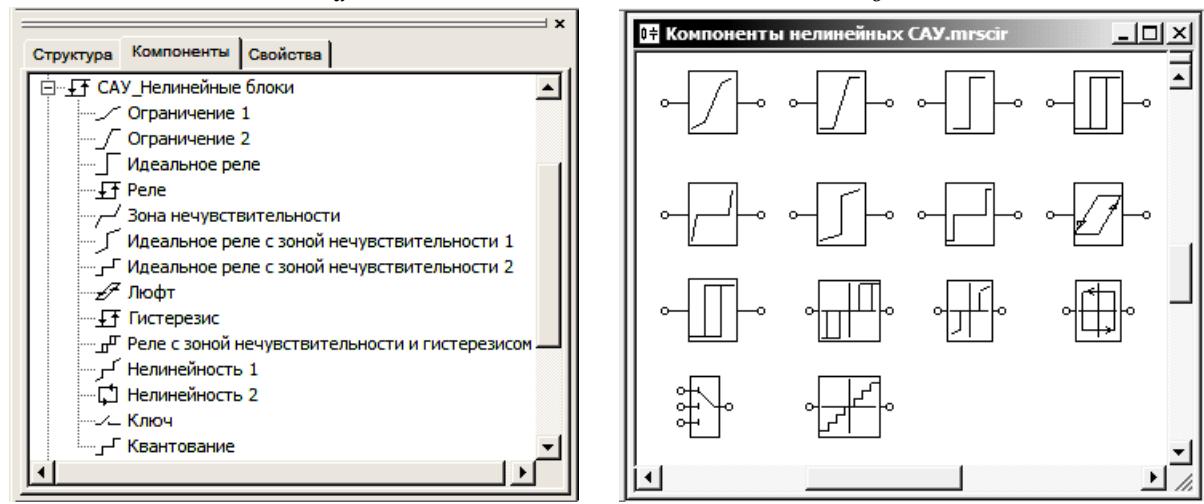


Рис. 1. Пример схемотехнического моделирования пуска асинхронного двигателя

*a**б**в**г*Рис. 2. Разделы библиотеки моделей компонентов системы MAPS: раздел компонентов математических операций (*а*) и УГО компонентов (*б*); раздел компонентов нелинейных элементов САУ (*в*) и УГО компонентов (*г*)

При моделировании управляемых силовых преобразователей исполнительных устройств САУ таким компонентом является трехсвязный компонент «управляемый ключ», реализующий модель управляемого ключевого полупроводникового прибора. Он имеет две связи энергетического типа, которыми включается в КЦ силового преобразователя согласно схеме электрической принципиальной, и связь информационного типа для подключения к КЦ блока управления (БУ); переменная связь информационного типа имеет смысл сигнала управления.

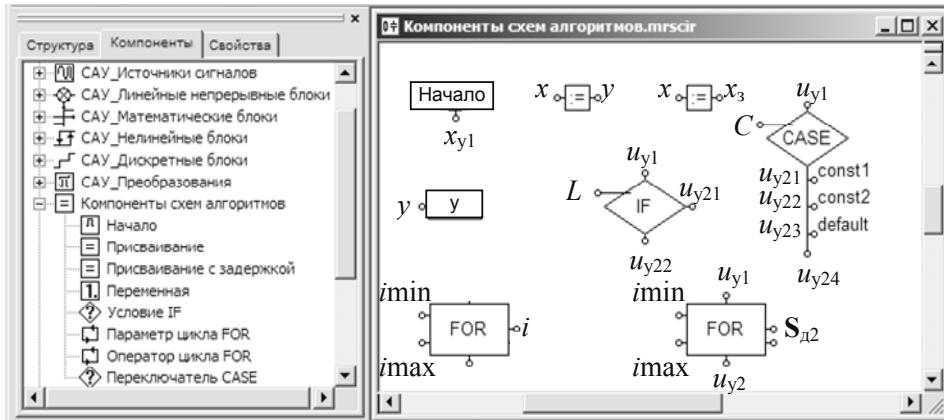


Рис. 3. Компоненты схем алгоритмов

Далее остановимся на вопросах моделирования элементов БУ исполнительными устройствами.

Функциональное моделирование блоков управления. Базовыми компонентами, использующимися для цепного представления БУ при функциональном моделировании, являются: компоненты математические блоки (см. рис. 2, а, б), линейные и нелинейные компоненты структурных схем и компоненты цифровых устройств. Генераторы сигналов моделируются компонентами источником сигналов. Аналого-цифровое преобразование реализуется нелинейным компонентом «квантование» (см. рис. 2, в, г).

Основой моделирования цифровых элементов БУ и логических операций в методе КЦ является модель двоичного логического моделирования цифровых устройств и аналогия для переменных связей информационного типа вида: $S_k^i \rightarrow n_k \rightarrow V_{nk} \rightarrow x$, где $x = 1$ – уровень логической единицы; $x = 0$ – уровень логического нуля. Модели логических элементов приводятся к стандартному типу математической модели компонента, т.е. к форме алгебраических уравнений. Реализован базовый набор логических компонентов: НЕ, И, ИЛИ, ИЛИ-НЕ, 2И-ИЛИ-НЕ. В работе [9] были исследованы способы моделирования цифровых устройств более высокой степени функциональной и структурной сложности на примере триггеров. Рассматривались два способа построения моделей: на базе таблиц состояний и на основе эквивалентных схем замещения. С точки зрения практической реализации второй способ является предпочтительным.

Моделирование функционирования структурно и функционально сложных устройств вычислительной техники осуществляется на алгоритмическом уровне, который также может быть реализован в методе КЦ. Методика моделирования схем алгоритмов, базирующаяся на формализме автономно моделируемых подцепей, была предложена в работе [10]. Базовые компоненты схем алгоритмов представлены на рис. 3. Следует отметить, что графическая форма представления алгоритма не является единственной и не всегда удобна, поэтому дальнейшие работы должны быть связаны с реализацией в системе МАРС способов описания алгоритмов работы БУ на алгоритмических языках и языках программирования.

Функциональное моделирование БУ используется в тех случаях, когда постоянными времени и энергетическими показателями БУ можно пренебречь. Исследование электрических процессов в БУ требует реализации физического подхода к моделированию.

Схемотехническое моделирование блоков управления. В связи с высокой степенью интеграции элементов электроники (анalogовых, цифровых, аналого-цифровых) их схемотехническое моделирование невозможно без упрощения моделей и использования макромоделей. В данных моделях должны быть в упрощенном виде реализованы основные функции элемента и учтены вход-выходные цепи микросхем. Макромоделирование электронных компонентов в методе КЦ обеспечи-

вается использованием компонентов функциональных схем при моделировании основных функций элемента и компонентов принципиальных схем при моделировании вход-выходных цепей.

На базе статических макромоделей, представленных в [11], в системе МАРС было реализовано моделирование цифровых элементов на электрическом уровне с помощью компонентов зависимых источников с нелинейными вольт-амперными характеристиками и формирователей управляющего напряжения данных источников, выполняющих логические операции определения уровня входных сигналов [12].

Например, эквивалентные модели линейной входной и нелинейной выходной цепей цифровых элементов в методе КЦ представлены на рис. 4. Одна из связей компонентов является связью энергетического типа $S^e \rightarrow (u, i)$, другая – связью информационного типа $S^i \rightarrow x$, где u, i – напряжение, ток, сигнал-переменная, $x \in \{0, 1\}$. Аналого-цифровой преобразователь АЦП со связями информационного типа обеспечивает согласование аналоговой и цифровой частей КЦ. Входная цепь характеризуется сопротивлением R_{bx} и емкостью C_{bx} ; выходная – сопротивлениями и емкостями для нижнего $R_{vыхL}, C_{vыхL}$ и верхнего $R_{vыхH}, C_{vыхH}$ уровней сигналов. Сопротивления $R_{vыхH}$ и $R_{vыхL}$ нелинейные, их значения зависят от величины логического уровня выходного цифрового сигнала x .

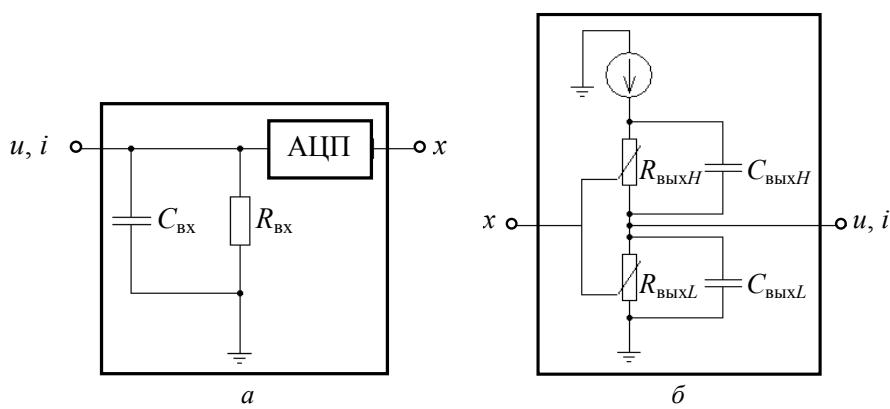


Рис. 4. Эквивалентные модели входной (a) и выходной (б) цепей цифровых микросхем

Заключение. Оригинальный метод компонентных цепей, технология моделирования в форме визуального вычислительного эксперимента и система моделирования МАРС, реализующая данный метод и технологию, являются составляющими новой эффективной методологии анализа процессов функционирования СУ. Данная методология обеспечивает системный подход к выполнению исследований СУ и позволяет реализовать в рамках единых методических основ как физический, так и информационный подходы к моделированию, не требуя комплексирования программных средств различного функционального назначения.

Литература

- Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – СПб.: КОРОНАпринт, 2001. – 320 с.
- Технологическая платформа «Национальная программная платформа» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tp-npp.ru>, свободный (дата обращения: 20.01.2012).
- Меморандум об образовании технологической платформы «Национальная программная платформа» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tp-npp.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=112:memorandum&catid=67:2011-07-04-19-07-53&Itemid=145, свободный (дата обращения: 20.01.2012).
- Арайс Е.А., Дмитриев В.М. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.
- Программная система «Среда моделирования МАРС» / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, Т.Н. Зайченко, А.Н. Кураколов. М.: ВНИИЦ, 2007. – № 50200701733.
- Зайченко Т.Н. Физико-информационное моделирование полупроводниковых преобразователей в системе МАРС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 9. – С. 5–13.

7. Зайченко Т.Н. Схемотехническое моделирование электротехнических устройств в задачах исследования и обучения // Изв. вузов. Физика. Приложение. – 2006. – Т. 49, № 9. – С. 196–201.
 8. Зайченко Т.Н. Структурное моделирование электротехнических устройств в системе МАРС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 10. – С. 1–9.
 9. Зайченко Т.Н. Информационное моделирование цифровых устройств в системе МАРС // Вестник Томского государственного педагогического университета. Сер. Естественные и точные науки (Информационные технологии). – 2005. – № 7 (51). – С. 84–90.
 10. Зайченко Т.Н. Исследование способов моделирования систем с дискретным временем и программных средств в системе МАРС // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2007. – Т. 311, № 5. – С. 59–65.
 11. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: в 4 вып. – Вып. 2: Модели компонентов аналоговых устройств. – М.: Радио и связь, 1992. – 64 с.
 12. Зайченко Т.Н. Моделирование аналого-цифровых устройств в системе МАРС / Т.Н. Зайченко, Н.П. Фикс // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: сб. ст. – Вып. 3 / под ред. Ю.А. Шурыгина. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2000. – С. 45–50.
-

Зайченко Татьяна Николаевна

Д-р техн. наук, профессор каф. моделирования и основ теории цепей ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-15

Эл. почта: zntomsk@rambler.ru

Zaitchenko T.N.

Development of new methodology of control systems operation analysis

Methodical and technological bases of control systems elements and devices of semi-conductor systems operation research by means of computing experiment on the basis of a method of components circuits are considered. Approaches to the decision of problems functional and schemotechnical simulation of control systems on the basis of devices of digital electronics by means of components circuits method are presented.

Keywords: control system, functional simulation, schemotechnical simulation, component, component circuit method.
