

УДК 681.5: 004.94

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ МЕТОДА КОМПОНЕНТНЫХ ЦЕПЕЙ

Д. т. н. В. М. Дмитриев, д. т. н. Т. Н. Зайченко, д. т. н. Ю. А. Шурыгин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
(ТУСУР)

Россия, г. Томск  
ztntomsk@rambler.ru

*Представлены теоретические и технологические основы компьютерного моделирования технических средств автоматизации и управления на базе метода компонентных цепей. Рассмотрены вопросы их схемотехнического и функционального моделирования.*

*Ключевые слова: средства автоматизации и управления, функциональное моделирование, схемотехническое моделирование, компонент, метод компонентных цепей.*

Современные технические средства автоматизации и управления (ТСАУ) многочисленны и разнообразны. В их состав входят электрические, пневматические, гидравлические и т.п. приборы. Исследование процессов функционирования ТСАУ 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], поэтому исследования и разработки в области создания программных средств автоматизированного моделирования и проектирования являются актуальными. В ТУСУР ведутся разработки по созданию средств компьютерного моделирования различного назначения. Они выполняются на базе метода компонентных цепей (КЦ) [3]. Целью настоящей работы является создание методологии и программных средств моделирования ТСАУ.

**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  $S_k = \{K, S, N\}$ , 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;  $\eta_k$  — 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  $M_{Цф}$ , описывающая процесс функционирования исследуемого объекта, имеет вид

$$M_{Цф} = \{U_{КЦ}, U_{\phi}, U_T\} \text{ при } S^e \neq \emptyset \text{ либо } M_{Цф} = \{U_{КЦ}\} \text{ при } S^e = \emptyset,$$

где  $U_{\text{КЦ}}$  — совокупность уравнений моделей компонентов, входящих в КЦ;  $U_6$  — уравнения базового узла;  $U_T$  — 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:  $\Phi V = W$ , где  $\Phi$  — квадратная матрица коэффициентов;  $W$  — вектор-столбец правых частей;  $V$  — вектор-столбец решения КЦ;  $V = [V_n, V_b, V_{\text{вн}}]^T$ , где  $V_n, V_b, V_{\text{вн}}$  — векторы потенциальных, потоковых и внутренних переменных КЦ. Система MAPS реализует метод КЦ и технологию визуального вычислительного эксперимента. Основой формализованного цепного представления исследуемых объектов в виде КЦ являются профессиональные языки схем.

В настоящее время на основе метода КЦ в ТУСУР создана система моделирования MAPS (моделирование и автоматический расчет систем) [4, 5]. Метод КЦ, систему моделирования MAPS и технологию формализованного цепного представления САУ для исследования в системе MAPS являются составными частями методологии компьютерного моделирования ТСАУ.

**Моделирование ТСАУ.** 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 (структурного). В первом случае используется профессиональный язык принципиальных схем, во втором — структурных и функциональных схем. Построение адекватных моделей процессов функционирования ТСАУ 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.

Разработка способов формализованного представления исполнительных устройств в методе КЦ предполагает реализацию матрично-топологической интерпретацией моделей компонентов — выбор типа переменных связей и запись модели компонента с учетом способа автоматического формирования модели КЦ и автоматического формирования узловых топологических законов сохранения. Как известно, для моделирования объектов неэлектрической природы используется метод электрических аналогий. Известны две системы аналогий — прямая и обратная. Например, для электромеханических систем каждому уравнению баланса сил в модели, составленной по прямой системе аналогий (аналогия «сила (момент) — напряжение»; «скорость — ток»), соответствует уравнение баланса напряжений замкнутого контура электрической цепи, а в модели по обратной системе аналогий (аналогия «сила (момент) — ток»; «скорость — напряжение») — уравнение баланса токов узла цепи. С учетом того, что в методе КЦ используются топологические законы сохранения для потоковых переменных, при топологической интерпретации компонентов ТСАУ используется система обратных аналогий: вышеназванные электромеханические, электрогидравлические вида {«расход — ток», «давление — напряжение»}, электроакустические вида {«акустическое давление — напряжение», «объемная скорость (расход) — ток»}.

Формализованное представление в методе КЦ электрических ТСАУ — полупроводниковых систем электропривода и электропитания, их схемотехническое и функциональное моделирование в системе MAPS подробно изложены в [5].

Пример цепного представления электромеханической системы с асинхронным двигателем и схмотехнического моделирования его пуска представлен на рис. 1.

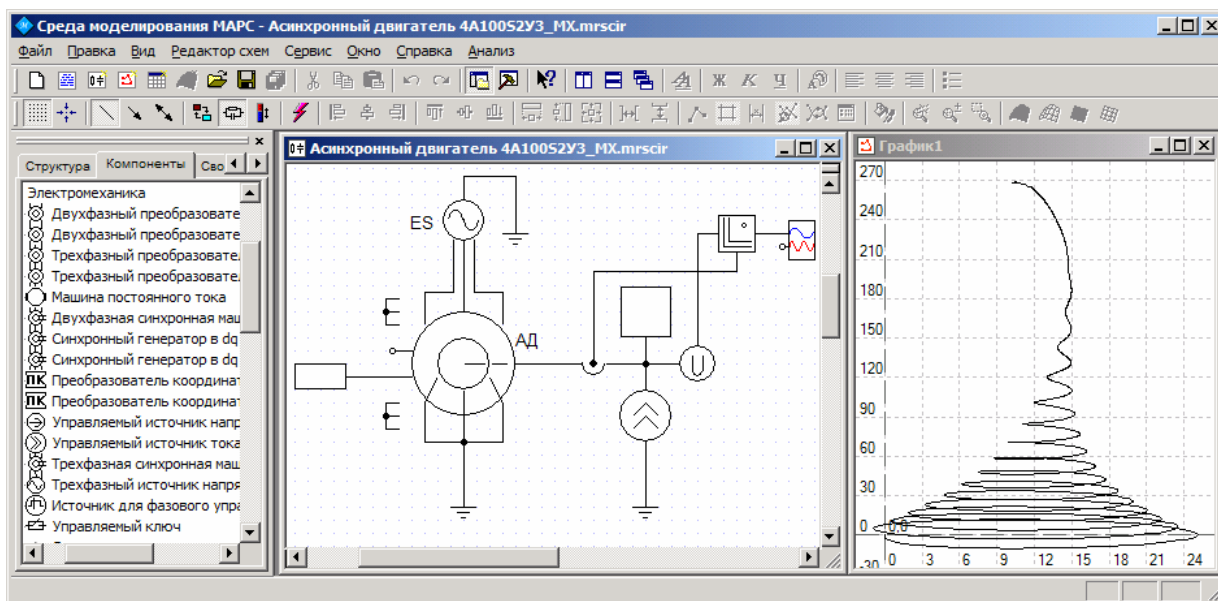


Рис. 1. Пример схмотехнического моделирования пуска асинхронного двигателя

Схмотехническое моделирование БУ ТСАУ невозможно без упрощения моделей и использования метода макромоделирования. В макромоделях элементов электроники в упрощенном виде реализованы основные функции элемента и учтены вход-выходные цепи микросхем. Макромоделирование электронных компонентов в методе КЦ обеспечивается использованием компонентов функциональных схем при моделировании основных функций элемента и компонентов принципиальных схем при моделировании вход-выходных цепей [6].

Функциональное (структурное) моделирование ТСАУ осуществляется с использованием компонентов звеньев структурных схем и компонентов математических блоков. Основой функционального 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 [5, 6]. 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 [7]. 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 математическом языке и языках программирования.

При многоуровневом информационно-физическом моделировании взаимодействие физической подцепи исполнительного механизма и информационной подцепи БУ обеспечивается посредством специальных согласующих компонентов, необходимых для преобразования типов переменных связей. При моделировании управляемых силовых преобразователей функцию такого согласующего компонента выполняет 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 БУ. Переменная связи информационного типа имеет смысл сигнала управления. Такую же согласующую функцию выполняют компоненты датчики и измерители ТСАУ.

На рис. 2 приведен пример формализованного представления гидравлической системы, в состав которой входят компоненты гидравлики («источник» 1, «труба» 2, «резервуар» 3, нагрузка 4), компоненты механики «здвижка» 5, компоненты схем управления «источник ступенчатого воздействия» 6 для управления задвижками, датчики 7 давления  $p$ , расхода  $Q$  и высоты жидкости в резервуаре  $h$ , компонент выдачи результатов расчетов на график 8.

Таким образом, авторами разработана методология моделирования неоднородных ТСАУ на базе метода компонентных цепей и предложены способы цепного формализованного представления и матрично-топологической интерпретации объектов моделирования электромагнитной, электромеханической и гидравлической природы. Оригинальный метод компонентных цепей, технология моделирования в форме визуального вычислительного эксперимента и система моделирования МАРС, реализующая данный метод и технологию, являются составляющими методологии компьютерного моделирования ТСАУ. Данная методология обеспечивает системный подход к выполнению исследований ТСАУ и позволяет реализовать в рамках единых методических основ как физический, так и информационный подходы к моделированию.

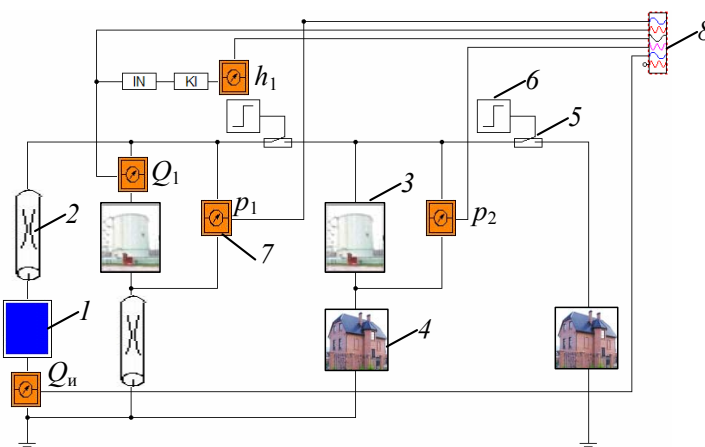


Рис. 2. КЦ гидравлической системы

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. — Санкт Петербург: КОРОНАпринт, 2001.
2. Технологическая платформа «Национальная программная платформа» [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://tp-npp.ru> (дата обращения: 20.01.2012).
3. Арайс Е. А., Дмитриев В. М. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ.— Москва: Радио и связь, 1982.
4. Программная система «Среда моделирования МАРС» / В. М. Дмитриев, Т. В. Ганджа, Т. Н. Зайченко, А. Н. Кураколов. Москва: ВНИИЦ, 2007.— № 50200701733.
5. Дмитриев В. М., Шутенков А. В., Зайченко Т. Н. и др. МАРС — среда моделирования технических устройств и систем.— Томск: В-Спектр, 2011.
6. Зайченко Т. Н. Разработка новой методологии анализа функционирования систем управления// Доклады ТУСУРа, 2012.— № 2 (26).— Ч. 1 — С. 151—156.
7. 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.

V. M. Dmitriev, T. N. Zaitchenko, Y. A. Shurigin

#### Simulation of automation and control devices based on the component circuits method.

Theoretical and technological bases of automation and control devices simulation based on the component circuits method are presented. The problems of their functional and schemotechnical simulation are considered.

Keywords: *Automation and control equipment, functional simulation, schemotechnical simulation, component, components circuits method.*