

На правах рукописи



Кравченко Вячеслав Александрович

**ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АППАРАТА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРАММАТИК**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Улан-Удэ – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ВСГУТУ)

Научный руководитель: **Ширапов Дашадондок Шагдарович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Аршинский Леонид Вадимович**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой

Черкашин Евгений Александрович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБУН Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

Защита состоится «26» декабря 2017 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.022.10 при ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет» по адресу: 670000, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, д. 24а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет», расположенной по адресу: г. Улан-Удэ, ул. Ранжурова, 4а, а также на сайте:

<http://bsu.ru/dissers/?did=652>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук, доцент



Т.Г.Дармаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Первоначальные идеи логико-математического моделирования, предназначенного для автоматизированного синтеза программ, были сформулированы в начале 70-х гг. XX века Э.Х. Тыгу в Институте кибернетики АН Эстонской ССР (г. Таллин) и Г.Е. Минцем в Ленинградском отделении Математического института АН СССР. В частности, был выдвинут тезис о том, что автоматический синтез программ по спецификациям задач должен быть основан на конструктивном доказательстве теоремы существования решения задачи. Таким образом, была поставлена задача разработки методов логико-математического моделирования.

С конца 70-х гг. до середины 80-х гг. методы логико-математического моделирования активно разрабатывались С.С. Лавровым в Институте теоретической астрономии АН СССР. Результатом является система СПОРА, построенная на исчислении высказываний.

На основе работ С.С. Лаврова в 80-е гг. было сделано несколько десятков реализаций систем логико-математического моделирования в разных организациях, как в форме систем автоматического синтеза программ общего назначения, так и в форме конкретных предметно-ориентированных пакетов прикладных программ. Но наибольшую известность получили работы Э.Х. Тыгу, в которых логико-математическое моделирование является частью «концептуального программирования». Результатом этих работ является мощная система автоматизированного синтеза программ решения инженерных задач ПРИЗ.

В 90-х гг. имело место некоторое забвение данной темы в связи с развитием объектно-ориентированного программирования. Начиная с 2000-х гг. вновь появляется интерес к концептуальному программированию. Современные работы в этом направлении ведутся в Ядерном университете «МИФИ» [Вольфенгаген В.Э., Исмаилова Л.Ю.], в Московском государственном университете [Корухова Ю.С.], в ФИЦ «Информатика и управление» РАН [Ильин А.В., Ильин В.Д.], в Институте системного программирования РАН [Лаврищева Е.М.], в Томском политехническом университете [Новосельцев В.Б.], в Иркутском государственном университете путей сообщения [Аршинский В.Л., Носков С.И.], в Институте динамики систем и теории управления СО РАН [Опарин Г.А., Черкашин Е.А.]. Зарубежным примером являются результаты француза К. Динчина.

Актуальность логико-математического моделирования в настоящий момент сохраняется, в связи с его важным прикладным значением, которое заключается в возможности трансформации полученной логико-математической модели в предметно-математическую модель в виде

программы для ЭВМ, осуществляющей компьютерное моделирование исследуемой системы. Совершенствование методов логико-математического моделирования способствует развитию автоматизированного построения алгоритмов моделирования.

Целью диссертационной работы является разработка единой методики и программного алгоритма логико-математического моделирования динамических систем из разных предметных областей на основе аппарата функциональных контекстно-свободных грамматик.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. анализ методов логико-математического моделирования динамических систем;

2. определение контекстно-свободных функциональных грамматик.

3. разработка способа логико-математического представления знаний выбранной предметной области, содержащей законы функционирования динамической системы, на основе аппарата функциональных контекстно-свободных грамматик;

4. разработка логико-математической модели решения прямых и обратных задач моделирования динамических систем в терминах функциональных грамматик;

5. разработка алгоритма программного комплекса логико-математического моделирования динамических систем на основе аппарата функциональных контекстно-свободных грамматик;

6. апробация методов логико-математического моделирования динамических систем и алгоритма программного комплекса в теории линейных стационарных радиотехнических систем с применением известных численных методов.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись методы формального описания математических моделей, методы формальных грамматик, λ -исчисление, методы представления знаний, эвристические методы поиска решений, методы концептуального программирования, численные методы, временные и спектральные методы анализа радиотехнических цепей. Для описания алгоритмов программной реализации использован функциональный язык программирования Лисп.

Научная новизна результатов:

1. впервые разработан метод логико-математического моделирования динамических систем на основе применения аппарата функциональных грамматик;

2. при описании законов функционирования линейных стационарных радиотехнических систем использована новая форма представления знаний – продукционная система, описанная неполной функциональной контекстно-свободной грамматикой;

3. созданы новые алгоритмы на основе вывода суперпозиции функций для построения программного комплекса логико-математического

моделирования динамических систем.

Теоретическая и практическая значимость результатов. Полученные в работе результаты могут быть использованы для логико-математического моделирования динамических систем из разных предметных областей. Разработанный алгоритм программного комплекса осуществляет автоматизированный вывод логико-математической модели и построение на её основе программы математического моделирования заданной системы. Используемые приемы логико-математического моделирования позволяют эффективно встраивать численные методы для расчета характеристик динамических систем. Разработанная база знаний по радиотехнике может быть применена для анализа и синтеза пассивных радиотехнических фильтров или усовершенствована для работы с другими видами радиотехнических систем.

Достоверность полученных результатов подтверждается успешным созданием базы знаний по радиотехнике линейных стационарных систем и использованием её для решения прямых и обратных задач логико-математического моделирования в указанной предметной области.

Полученные в работе результаты соответствуют трем областям исследования паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: пунктам 2, 3 и 4.

Апробация результатов. Результаты работы были представлены в виде докладов и обсуждались на научных конференциях:

1. III международная конференция «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы» (ИКВТС-2010), г. Улан-Удэ (оз. Байкал), 6-11 сентября 2010 г.;

2. Конференция РАЕ «Функциональные и прикладные исследования. Образование, экономика и право», Италия (Рим, Флоренция), 12-19 сентября 2011 г.;

3. XI Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий» (ТиПВСИТ-2012), г. Улан-Удэ (оз. Байкал), 13-20 августа 2012 г.;

4. Всероссийская научная конференция «Компьютерные технологии в науке, в технике, в искусстве», г. Таганрог, 15 июня 2013 г.;

5. II Всероссийская научная интернет-конференция с международным участием «Современные системы искусственного интеллекта и их приложения в науке», г. Казань, 14 мая 2014 г.;

6. Международная конференция «Дифференциальные уравнения и математическое моделирование» (ДУММ-2015), г. Улан-Удэ (оз. Байкал), 22-27 июня 2015 г.;

7. XII Международная научно-практическая конференция «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (Инфо-2015), г. Сочи, 1-10 октября 2015 г.;

8. XIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (Инфо-2016), г. Сочи, 1-10 октября 2016 г.;

9. X Международная научно-практическая конференция «Техника и технология: новые перспективы развития», г. Самара, 25 сентября 2017 г.;

10. X Международная научно-практическая конференция «Современные технологии в мировом научном пространстве», г. Уфа, 28 сентября 2017 г.;

11. XIV Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (Инфо-2017), г. Сочи, 1-10 октября 2017 г.;

12. ежегодные Научно-практические конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления в 2010–2017 гг.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, включая статьи в журналах и материалах конференций [1-5, 7-19] и Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [6]. В том числе 5 статей в рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК [1-5].

Личный вклад соискателя в статьях [7, 8], выполненных в соавторстве, составляет от 40 до 60%. В работах [1, 3-5, 10, 11, 14-19], в которых диссертант является первым автором, его вклад – основной и заключается в постановках задач, их решении и получении результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем работы составляет 126 страниц машинописного текста. Количество рисунков – 23, таблиц – 11, наименований списка литературы – 114.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведено формальное описание задачи логико-математического моделирования динамических систем, рассмотрены существующие методы решения данной задачи, показано преимущество функциональных грамматик над атрибутными и разработано математическое описание последовательно-параллельного метода декомпозиции оператора вывода для возможности применения функциональной парадигмы.

В классических работах Э.Х. Тыгу логико-математическое моделирование осуществляется на основе представления знаний в виде атрибутных грамматик. В диссертационной работе указаны слабые места

такого метода. На основе монографии В.А. Тузова приведен сравнительный анализ, показывающий преимущества применения функциональных грамматик перед атрибутными в логико-математическом моделировании.

Логическое описание математической модели динамической системы:

$$M = \{U, T\},$$

где $U = \{u_i\}$, $i = \overline{1, n}$ – множество параметров динамической системы;

$$T = \{T_j\}, j = \overline{1, m} \text{ – базис операторов.}$$

Множество параметров системы состоит из шесть подмножеств:

$$U = \{X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma\},$$

где $X = \{x_i(t)\}$, $i = \overline{1, n_{11}}$ – подмножество входных (внешних) фазовых переменных, образующих вектор входных воздействий;

$Y = \{y_j(t)\}$, $j = \overline{1, n_{12}}$ – подмножество выходных фазовых переменных, образующих вектор реакций системы;

$$Z = \{z_l(t)\}, l = \overline{1, n_{13}} \text{ – подмножество внутренних фазовых переменных;}$$

$$\alpha = \{\alpha_h\}, h = \overline{1, n_2} \text{ – подмножество внешних параметров;}$$

$$\beta = \{\beta_p\}, p = \overline{1, n_3} \text{ – подмножество внутренних параметров;}$$

$$\gamma = \{\gamma_q\}, q = \overline{1, n_4} \text{ – подмножество выходных параметров;}$$

$$n_{11} + n_{12} + n_{13} + n_2 + n_3 + n_4 = n.$$

Базис операторов T определяет закон функционирования системы, однозначно связывающий подмножество X входных фазовых переменных с подмножеством Y выходных фазовых переменных:

$$Y = TX.$$

Значения внешних параметров системы α определяют характеристики входных фазовых переменных. Поэтому вектор входных воздействий можно выразить следующим образом:

$$X = X(\alpha, t).$$

Значения внутренних параметров системы β характеризуют свойства функциональных подсистем, из которых состоит система. Поэтому параметры β связаны с операторами множества T :

$$T = T(\beta).$$

Тогда операторное уравнение динамической системы принимает вид:

$$Y(t) = T(\beta)X(\alpha, t),$$

где α и β также могут быть функциями времени t .

Множество выходных параметров системы γ позволяет оценить функционирование динамической системы:

$$\gamma = F_1[Y(t)] = F_1[T(\beta)X(\alpha, t)] = F_0(T, \alpha, \beta),$$

где F_1 и F_0 – определённые функциональные зависимости.

Задача логико-математического моделирования – это совокупность:

$$W = \{K, D, Q\},$$

состоящая из трех множеств:

1) множество понятий и отношений предметной области, составляющих базу знаний:

$$K = \{k_l\}, \quad l = 1, 2, \dots, p;$$

2) множество входных переменных задачи, характеризующих исходные знания о модели и образующих вектор входных переменных задачи:

$$D = \{d_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, r;$$

3) множество выходных переменных задачи, характеризующих цель моделирования и образующих вектор выходных переменных задачи:

$$Q = \{q_j\}, \quad j = 1, 2, \dots, s.$$

Если задача моделирования разрешима, то её можно представить в виде:

$$(K; d_1, d_2, \dots, d_r \mapsto q_1, q_2, \dots, q_s).$$

При этом решение задачи подчиняется операторному уравнению:

$$Q = BD \quad \text{или}$$

$$\{q_1, q_2, \dots, q_s\} = B[\{d_1, d_2, \dots, d_r\}],$$

где B – оператор логического вывода.

Смысл множеств Q, D, B определяется условиями моделирования. В табл. 1 представлены возможные варианты задач моделирования и выражения, характеризующие их решения на основе исходных данных D и функциональных зависимостей F_1, F_2, F_3 и F_4 .

Таблица 1 – Виды задач моделирования динамических систем

Вид задач моделирования	Цель моделирования Q	Исходные данные моделирования D	Оператор логического вывода B
Прямые задачи	Y	T, X, α, β	$T(\beta)X(\alpha, t)$
	γ	T, X, α, β	$F_1[T(\beta)X(\alpha, t)]$
Обратные задачи	X	T, Y, β	$T^{-1}(\beta)Y(t)$
	α	T, Y, β	$F_2[T^{-1}(\beta)Y(t)]$
	T	X, Y, α	$Y(t)X^{-1}(\alpha, t)$
	β	X, Y, α	$F_3[Y(t)X^{-1}(\alpha, t)]$
	Z	X, Y, α	$F_4[Y(t)X^{-1}(\alpha, t)]$

В качестве основной задачи логико-математического моделирования в диссертационной работе указана декомпозиция оператора \mathbf{B} , т.е. представление его совокупностью элементарных операций, принадлежащих базе знаний \mathbf{K} :

$$B_i \in \mathbf{K}, i=1, 2, \dots, t.$$

В работах Э.Х. Тыгугу для логического вывода решения используется последовательный способ декомпозиции. Если каждая операция B_i оператора \mathbf{B} описана операторным уравнением, то доказательство решения задачи моделирования можно представить последовательным набором таких операций. Общее уравнение при этом будет иметь вид:

$$\mathbf{Q} = B_t B_{t-1} \dots B_2 B_1 \mathbf{D},$$

где $B_t, B_{t-1}, \dots, B_2, B_1$ – операторы элементарных операций.

Каждая элементарная операция B_i описывается своим операторным уравнением, векторы \mathbf{D} и \mathbf{Q} в котором заменены соответствующими векторами промежуточных переменных $C_1, C_2, \dots, C_{t-2}, C_{t-1}$:

$$C_1 = B_1 \mathbf{D}, C_2 = B_2 C_1, C_3 = B_3 C_2, \dots, C_{t-1} = B_{t-1} C_{t-2}, \mathbf{Q} = B_t C_{t-1}.$$

Или в более общем виде:

$$C_i = B_i C_{i-1}, i=1, 2, \dots, t$$

$$\text{при } C_0 = \mathbf{D}, C_t = \mathbf{Q}.$$

Каждый из векторов промежуточных переменных $C_1, C_2, \dots, C_{t-2}, C_{t-1}$ максимально может содержать по g элементов. Так как каждый из выходов q_j может быть связан со всеми входами d_i , то число g равно произведению количества входных переменных r на количество выходных переменных s :

$$g = r \cdot s.$$

При логико-математическом моделировании с применением функциональных грамматик основной базы знаний \mathbf{K} должны быть функции f_j . Каждая функция имеет всего один выходной параметр (результат), поэтому элементарные операции декомпозиции оператора \mathbf{B} также должны иметь один выход. Таким образом, делается вывод, о том, что распространенный в других системах последовательный способ декомпозиции оператора \mathbf{B} при использовании функциональных грамматик применить нельзя. Поэтому в диссертации разработано математическое описание последовательно-параллельного способа декомпозиции, при котором каждая операция B_i заменяется параллельным соединением нескольких более простых операций B_{ij} :

$$C_{ij} = B_{ij} [\{C_{(i-1)1}, C_{(i-1)2}, \dots, C_{(i-1)g}\}].$$

При этом операция B_i разбивается на s операций $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{is}$, а каждая из последовательных операций B_1, B_2, \dots, B_{t-1} – на g блоков $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ig}$, где $i=1, 2, \dots, t-1$.

В результате получаем систему из g уравнений:

$$q_j = \mathbf{B}_j [d_1, d_2, \dots, d_r]; \quad j=1, 2, \dots, g.$$

Общее операторное уравнение последовательно-параллельной декомпозиции имеет вид:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} B_{t1} & B_{(t-1)1} & \dots & B_{21} & B_{11} \\ B_{t2} & B_{(t-1)2} & \dots & B_{22} & B_{12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{t(s-1)} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{ts} & B_{(t-1)(g-1)} & \dots & B_{2(g-1)} & B_{1(g-1)} \\ & B_{(t-1)g} & \dots & B_{2g} & B_{1g} \end{pmatrix} \mathbf{D},$$

где $B_{t1}, B_{(t-1)1}, \dots, B_{2g}, B_{1g}$ – операторы элементарных операций.

Каждая операция B_{ij} описывается операторным уравнением вида:

$$C_{ij} = B_{ij} C_{i-1} \text{ при } C_0 = \mathbf{D}, \quad C_t = \mathbf{Q}, \quad i=1, 2, \dots, t, \quad j=1, 2, \dots, g.$$

Во второй главе приведено описание контекстно-свободных грамматик, введены определения функциональных грамматик, описана и реализована на языке чистого лямбда-исчисления методика представления знаний и вывода логико-математической модели динамических систем на основе функциональных грамматик.

В результате анализа теории формальных грамматик введено понятие неполной контекстно-свободной грамматики:

$$G'_K = \{V_K, P_K\};$$

где $V_K = \{c_i\}, i=1, 2, \dots, n$ – множество (алфавит) символов;

$$P_K = \{P_{Kj}\}, j=1, 2, \dots, m \text{ – множество правил вида } c_i \rightarrow \psi_j.$$

Далее получены определения полной

$$G_F = \{V_T, V_N, P, F, F_0, V_0, S\}$$

и неполной

$$G'_F = \{V, P, F, F_0, V_0\}$$

функциональных грамматик, в которых:

$V_T = \{w_j\}, j=1, 2, \dots, n_{11}$ – множество (алфавит) терминальных символов;

$V_N = \{e_l\}, l=1, 2, \dots, n_{12}$ – множество (алфавит) нетерминальных символов;

$V \equiv V_T \cup V_N$ – объединенное множество (алфавит) символов;

$V_0 = \{b_i\}, i=1, 2, \dots, n_0$ – множество (алфавит) базисных терминальных символов;

$F_0 = \{f_{0i}\}, i=1, 2, \dots, n_0$ – множество базисных функций вида:

$$f_{0i} = f(x_1, x_2) = x_1 b_i x_2, \quad f_{0i} = f(x_1) = b_i x_1 \quad \text{или} \quad f_{0i} = f(x_1) = x_1 b_i;$$

$F = \{f_r\}$, $r = 1, 2, \dots, k$ – множество общих функций вида:

$$f_r = f(x_1, x_2, \dots, x_p) = \sigma(x_1, x_2, \dots, x_p, f_{01}, f_{02}, \dots, f_{0q});$$

$P = \{P_s\}$, $s = 1, 2, \dots, m$ – множество правил вида: $a_j \rightarrow \varphi_s \{f_r\}$, где $\varphi_s \in V^+$ – произвольная последовательность символов объединенного алфавита, являющаяся совокупностью фактических параметров аргументов x_1, x_2, \dots, x_p функции f_r ;

$S \in V_N$ – начальный нетерминальный символ (аксиома).

Вместо используемого в теории формальных грамматик дерева разбора, автором введено дерево перебора. Его корень представляет начальный нетерминальный символ, вершины – возможные варианты реализации логико-математические модели, а ветви – пути их вывода. Дерево перебора является набором возможных реализацией последовательно-параллельной декомпозиции оператора \mathbf{B} .

Далее во второй главе описана разработанная автором методика представления знаний и вывода логико-математической модели на основе функциональных грамматик. Она основывается на предположениях 1, 2, 3 и вытекающем из них следствии.

Предположение 1. Определенная теория динамических систем математически может быть описана в виде неполной контекстно-свободной грамматики $G'_K = \{V_K, P_K\}$. При этом символы грамматики c_i обозначают понятия теории, а правила грамматики P_{Kj} – отношения между понятиями в виде формул.

Предположение 2. Математическое описание теории динамических систем в виде неполной контекстно-свободной грамматики $G'_K = \{V_K, P_K\}$ может быть преобразовано в неполную функциональную контекстно-свободную грамматику $G'_F = \{V, P, F, F_0, V_0\}$ за счет выделения из множества V_K подмножества V_0 , такого, что $V_0 \cup V \equiv V_K$, и его элементам соответствуют базисные функции f_{0i} , через которые выражаются функции f_r , описывающие предметную логику правил P_s .

Предположение 3. Задача математического моделирования динамической системы $W = \{K, D, Q\}$ может быть представлена в виде совокупности полных функциональных контекстно-свободных грамматик $G_j = \{V_{jT}, V_{jN}, P, F, F_0, V_0, S_j\}$, $j = 1, 2, \dots, s$; где s – количество выходных переменных в множестве Q ; за счет выделения из обобщенного алфавита V неполной функциональной контекстно-свободной грамматики $K = G' = \{V, P, F, F_0, V_0\}$ алфавита терминальных символов V_{jT} , обозначающих понятия входных переменных D , и последовательного выбора из оставшегося множества нетерминальных символов V_{jN} ($V_{jT} \cup V_{jN} \equiv V$) аксиом S_j , обозначающих понятия выходных переменных q_j .

Следствие. Если задача математического моделирования динамической системы $W = \{K, D, Q\}$ представлена в виде совокупности полных функциональных контекстно-свободных грамматик $G_j = \{V_j, V_{jN}, P, F, F_0, V_0, S_j\}$, и для указанной задачи существует решение, то логико-математическая модель может быть построена в виде совокупности суперпозиций функций $\sigma_j = \sigma_j(x_1, x_2, \dots, x_p, f_{(1j)}, f_{(2j)}, \dots, f_{(sj)})$, где $x_1, x_2, \dots, x_p \in V_T$; $f_{(1j)}, f_{(2j)}, \dots, f_{(sj)} \in F, j=1, 2, \dots, s$; s – количество выходных переменных в множестве Q ; t – количество последовательных блоков декомпозиции оператора вывода.

При этом функции $f_{(1j)}, f_{(2j)}, \dots, f_{(sj)}$ выступают в качестве элементарных операторов последовательно-параллельной декомпозиции B_{ij} , а суперпозиция функций σ_j имеет смысл оператора вывода решения B .

На примере задач кинематики показано построение базы знаний и вывод логико-математической модели на основе дерева перебора.

При использовании функциональных грамматик для вывода логико-математической модели целесообразно использовать чистое лямбда-исчисление. При этом результатом моделирования является суперпозиция функций, связывающая исходные данные с результатом.

Для осуществления моделирования динамических систем в соответствие с методикой, представленной предположениями 1, 2, 3 и следствием, на языке чистого лямбда-исчисления была разработана логико-математическая модель, состоящая из трёх суперпозиций функций:

- 1) функция K создания базы знаний в рамках определенной предметной области (с учетом предположений 1 и 2);
- 2) функция G формулирования задачи моделирования динамической системы (реализация предположения 3);
- 3) функция M вывода логико-математической модели динамической системы (реализация следствия 1).

Показан вывод перечисленных функций на основе δ - и β -редукций из введенных логических комбинаторов:

$$\begin{aligned} Tr &= \lambda x. \lambda y. x; \\ Fl &= \lambda x. \lambda y. y; \\ If &= \lambda p. \lambda x. \lambda y. p \ x \ y; \end{aligned}$$

комбинаторов работы со списками:

$$\begin{aligned} Nu &= \lambda t. t (\lambda x. \lambda y. Fl); & Cdr &= \lambda t. t \ Cr \ (Cd \ (Cr \ t)); \\ Nl &= \lambda x. Tr; & & \dots \\ Cs &= \lambda x. \lambda y. \lambda s. s \ x \ y; & Crddd &= \lambda t. t \ Cr \ (Cd \ (Cd \ (Cd \ (Cd \ (Cr \ t))))); \\ Cr &= \lambda t. t \ Tr; & Crd &= \lambda t. t \ Cr \ (Cd \ t); \\ Cd &= \lambda t. t \ Fl; & & \dots \\ Crr &= \lambda t. t \ Cr \ (Cr \ t); & Crdddd &= \lambda t. t \ Cr \ (Cd \ (Cd \ (Cd \ (Cd \ (Cd \ t)))); \end{aligned}$$

комбинатора неподвижной точки для записи рекурсии:

$$Y = \lambda h.(\lambda x.h (x x)) (\lambda x.h (x x)).$$

В результате вывода функция K имеет форму:

$$K = \lambda s.s V_{T0} (\lambda s.s V (\lambda s.s F_0 (\lambda s.s F (\lambda s.s P (\lambda s.s Nl))))).$$

Функция G приведена к форме:

$$G = (Y (\lambda f.\lambda x.\lambda y.If (Nu y) Nl (Cn (Cn (Cr x) (Cn (Crd x) (Cn (Crdd x) (Cn (Crddd x) (Cn (Crdddd x) (Cn (Crddddd x) (Cn (Cr y) Nl))))))) (f x (Cd y)))))(Cn (Cr K) (Cn D (Cn ((Y (\lambda f.\lambda p.\lambda q.If (Nu p) Nl (If ((Y (\lambda f.\lambda r.\lambda t.If (Nu r) Fl (If (= (Cr r) t) Tr (f (Cd r) t)))) q (Cr p)) (f (Cd p) q)) (Cn (Cr p) (f (Cd p) q)))) (Crd K) D) (Cn (Crdd K) (Cn (Crddd K) (Cn (Crdddd K) Nl)))))) Q.$$

Она описывает задачу моделирования динамической системы и содержит три рекурсии, обозначенные Y -комбинатором. Подобный, но более громоздкий вид имеет функция M вывода логико-математической модели динамической системы.

При выводе функции M используются специальные правила, для ограничения разрастания дерева перебора, что необходимо для исключения комбинаторного взрыва и выбора самого оптимального решения:

1) правило роста в ширину – подразумевает изучение всех цепочек текущего уровня перед переходом на более глубокий уровень;

2) правило тупиковых ветвей – подразумевает отсекаание ветвей дерева, содержащих аксиомы или ранее заменённые в её ветви нетерминалы.

В третьей главе на основе методики, описанной во второй главе, построена база знаний для логико-математического моделирования линейных стационарных радиотехнических систем. Произведена апробация полученной базы знаний на примерах прямой и обратной задач моделирования из теории радиотехнических фильтров.

Построение базы знаний состоит из четырех этапов:

1) определение границ рассматриваемой теории;

2) выявление всех понятий теории в рамках выбранных границ и составление алфавита символов V , а также определение синтаксической структуры каждого символа;

3) выявление всех законов, связывающие выбранные понятия предметной области, и составление набора правил P ;

4) описание всех функциональных зависимостей между понятиями теории, согласно правилам P , т.е. определение множества функций F и базисных функций F_0 , а также базисных символов V_0 .

В ходе первого этапа радиотехническая система была ограничена линейной стационарной пассивной радиотехнической цепью в виде Γ -образного четырёхполюсника из R , L и C элементов, на входе и выходе которой действуют условные дискретные сигналы (рис. 1).

В ходе второго этапа был выявлен набор основных понятий, которыми можно охарактеризовать радиотехническую систему (табл. 2).

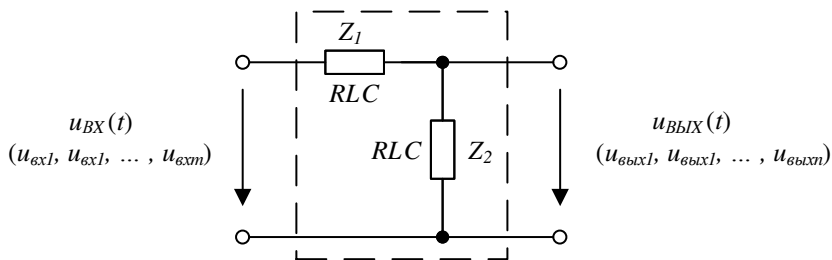


Рис. 1 – Моделируемая радиотехническая динамическая система

Таблица 2 – Характеристики радиотехнической системы

Характеристики входного сигнала $X(\alpha, t)$	Характеристики цепи $T(\beta)$	Характеристики выходного сигнала $Y(t)$
Зависимость во временной области $u_{BX}(t)$	Принципиальная схема $\Gamma(p)$	Зависимость во временной области $u_{BYX}(t)$
	Входное операторное сопротивление $Z_{BX}(p)$	
	Выходное операторное сопротивление $Z_{BYX}(p)$	
Спектральная плотность $U_{BX}(j\omega)$	Переходная характеристика $g(t)$	Спектральная плотность $U_{BYX}(j\omega)$
	Импульсная характеристика $h(t)$	
Амплитудный спектр $U_{BX}(\omega)$	Передаточная характеристика $K(p)$	Амплитудный спектр $U_{BYX}(\omega)$
	Частотный коэффициент передачи $K(j\omega)$	
Фазовый спектр $\varphi_{UBX}(\omega)$	Амплитудно-частотная характеристика $K(\omega)$	Фазовый спектр $\varphi_{UBYX}(\omega)$
	Фазочастотная характеристика $\varphi_K(\omega)$	

Каждой из характеристик был сопоставлен один символ алфавита. В итоге, алфавит грамматики получил вид:

$$V_{PT} = \left\{ \begin{array}{l} \langle \text{Схема} \rangle, \langle \text{Сопр1} \rangle, \langle \text{Сопр2} \rangle, \langle \text{Перех} \rangle, \langle \text{Импул} \rangle, \\ \langle \text{Перед} \rangle, \langle \text{Кэфф} \rangle, \langle \text{АмпЧХ} \rangle, \langle \text{ФазЧХ} \rangle, \langle \text{Сигн1} \rangle, \\ \langle \text{Спек1} \rangle, \langle \text{АмпС1} \rangle, \langle \text{ФазС1} \rangle, \langle \text{Сигн2} \rangle, \langle \text{Спек2} \rangle, \\ \langle \text{АмпС2} \rangle, \langle \text{ФазС2} \rangle \end{array} \right\}.$$

В ходе третьего этапа между 17 характеристиками системы были выявлены закономерности, которые представлены в табл. 3 (сокращенный вид).

Таблица 3 – Законы связи характеристик радиотехнической системы

	<Схема>	<Сопр1>	<Сопр2>	<Перех>	<Импул>	<Перед>	<ФазС2>
<Схема>		$f1$	$f1$				
<Сопр1>	$f2$		$f3 / f4$	$f3$		$f4$	
<Сопр2>	$f5$	$f6 / f7$		$f6$		$f7$	
<Перех>		$f8$	$f8$		$f9$		
<Импул>				$f10$			
<Перед>		$f4$	$f4$				
....
<ФазС2>							

На основе табл. 3, записан набор правил:

$P_{PT} = \{$
 <Схема> \rightarrow <Сопр1> <Сопр2> $\{f1\}$; <Перех> \rightarrow <Импул> $\{f9\}$;
 <Сопр1> \rightarrow <Схема> $\{f2\}$; <Импул> \rightarrow <Перех> $\{f10\}$;
 <Сопр1> \rightarrow <Сопр2> <Перех> $\{f3\}$; <Импул> \rightarrow <Коэфф> $\{f11\}$;
 <Сопр1> \rightarrow <Сопр2> <Перед> $\{f4\}$; <Перед> \rightarrow <Сопр1> <Сопр2> $\{f4\}$;
 <Сопр2> \rightarrow <Схема> $\{f5\}$; <Перед> \rightarrow <Коэфф> $\{f12\}$;
 <Сопр2> \rightarrow <Сопр1> <Перех> $\{f6\}$;
 <Сопр2> \rightarrow <Сопр1> <Перед> $\{f7\}$; <ФазС2> \rightarrow <ФазСХ> <ФазС1> $\{f33\}$;
 <Перех> \rightarrow <Сопр1> <Сопр2> $\{f8\}$; <ФазС2> \rightarrow <Спек2> $\{f28\}$ } .

В ходе четвертого этапа получен набор F функциональных зависимостей, возникающих между объектами теории, согласно правилам P . В табл. 4 приведены примеры функций, составляющих F_{PT} .

Таблица 4 – Набор функций для реализации законов радиотехники

Функция	Суть преобразования	Описываемые взаимосвязи
$f1$	Построение схемы цепи по операторным входному и выходному сопротивлениям	$Z_{BX}(p), Z_{ВЫХ}(p) \Rightarrow$ Схема
$f4$	Деление операторных дробно-рациональных функций (ДРФ)	$Z_{BX}(p) = \frac{Z_{ВЫХ}(p)}{K(p)}$
$f9$	Интегрирование функции	$g(t) = \int h(t) dt$
$f10$	Дифференцирование функции	$h(t) = \frac{dg}{dt}$
$f11$	Обратное преобразование Фурье	$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} dt$

Продолжение таблицы 4

Функция	Суть преобразования	Описываемые взаимосвязи
<i>f15</i>	Расчет комплексной ДРФ по функциям модуля и аргумента	$K(j\omega) = K(\omega) \cdot e^{j\varphi_K(\omega)}$
<i>f29</i>	Интеграл Дюамеля	$u_{ВЫХ}(t) = u_{ВХ}(0)g(t) + \int_0^t \frac{du_{ВХ}}{dt} g(t-\tau) d\tau$

В четвертой главе описана реализация программного комплекса логико-математического моделирования динамических систем на функциональном языке программирования Лисп, а также реализация базы знаний по радиотехнике линейных стационарных систем с использованием численных методов.

Используемые в логико-математическом моделировании динамических систем знания являются концептуальными, согласно классификации С.С. Лаврова. Поэтому программный комплекс представляет собой прикладную систему с элементами искусственного интеллекта (ПСИИ) и использует принципы концептуального программирования. Обязательными модулями ПСИИ является база знаний и механизм вывода решения.

Показаны преимущества функциональных грамматик над атрибутивными при реализации базы знаний и механизма вывода. Сделан вывод о универсальности получаемого результата.

В качестве языка программирования выбран Лисп, так как он является хорошо изученным функциональным языком, оперирует списками и имеет строгую теоретическую основу в виде лямбда-исчисления.

Далее показаны принципы реализации программного комплекса, которые заключаются в трансляции логико-математической модели с языка чистого лямбда-исчисления на язык программирования Лисп. При этом база знаний основана на реализации функции *K*, а механизм вывода – на реализации функций *G* и *M*.

Основой базы знаний является список «Продукции», который состоит из двух подсписков: «Функции» и «Правила», которые, в свою очередь, содержат конечное число списков «Функция» и «Правило» соответственно. Списки «Функция» являются двухатомными и содержат наименование функции, через которую выражено конкретное правило, а также количество аргументов этой функции. Через списки «Функция» устанавливается связь между множествами правил *P* и функций *F*. Каждый список «Правило» начинается с символа левой части продукции и содержит в своем составе один или несколько списков «Альтернатива». Первый элемент списка «Альтернатива» обозначает функцию, через которую выражается правило

грамматики; остальные символы представляют собой цепочку левой части этого правила. Для создания описанного списка «Продукции» и ввода функций грамматики используется трехаргументная функция «база». Первый аргумент – атом, представляющий название базы знаний и соответственно наименование глобальной переменной в виде списка «Продукции», второй аргумент – список функций грамматики, третий – список правил грамматики.

Механизм вывода решения основывается на построении дерева перебора. Оно, в свою очередь, осуществляется изменением специального списка «Дерево». Данный список является динамическим, т.е. изменяется в ходе построения дерева за счет применения продукций и отсекаания тупиковых ветвей. Списки «Узлы» содержат информацию о каждом узле дерева в виде подсписков «Цепочка», «Нетерминалы» и «Путь». Список «Цепочка» содержит цепочку символов конкретного узла. Список «Нетерминалы» необходим для реализации правила тупиковых ветвей, он содержит перечисление всех нетерминалов, которые были подвержены замене в ветви, соединяющей начальный нетерминальный символ с текущим узлом. Список «Путь» несет информацию о суперпозиции функций для рассматриваемого узла. Данный список состоит из двухатомных подсписков «Вызов». Первый атом списка «Вызов» содержит наименование вызываемой функции, а второй – позицию вызова для следующей функции. После определения цепочки, не содержащей нетерминальных символов, происходит формирование итоговой суперпозиции в префиксной лисповской нотации. Для запуска механизма вывода используется двухаргументная функция «решение». Первый аргумент представляет собой список «Символы», а второй – атом, обозначающий название базы знаний, в рамках которой необходимо произвести поиск решения. Список «Символы» состоит из начального нетерминального символа (первый атом) и терминальных символов (последующие атомы).

Кроме этого, в четвертой главе приведен список методов, применяемых для программной реализации функций множества F_{PT} . Часть функций представляют собой символьные операции, работающие с текстовыми списками аргументов. Остальные функции работают со списками дискретных числовых рядов и реализуются численными методами. К ним относятся: численное дифференцирование, численное интегрирование методом Симпсона, быстрое преобразование Фурье, решение нелинейных операторных уравнений методом Лобачевского.

В заключении представлены основные научные результаты работы.

В приложениях приведены листинги программного комплекса логико-математического моделирования динамических систем (Приложение А) и фрагмент программного кода базы знаний по радиотехнике линейных стационарных систем (Приложение Б).

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан последовательно-параллельный способ декомпозиции оператора логического вывода для решения задачи моделирования динамической системы, позволяющий использовать функциональную парадигму и параллельные вычисления в логико-математическом моделировании.

2. Впервые разработан логико-математический метод решения прямых и обратных задач моделирования динамических систем на основе аппарата функциональных контекстно-свободных грамматик.

3. Построена база знаний в виде неполной функциональной контекстно-свободной грамматики, предназначенная для логико-математического моделирования линейных стационарных радиотехнических систем.

4. Получены результаты решения прямой и обратной задач моделирования радиотехнических динамических систем, представляющих собой линейные стационарные пассивные электрические цепи в виде G -образных четырехполюсников, преобразующих входной дискретный радиотехнический сигнал в выходной дискретный сигнал.

5. Разработан алгоритм для построения программного комплекса логико-математического моделирования динамических систем на основе функциональных грамматик.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из списка рекомендованных ВАК:

1. Кравченко, В.А. Представление знаний в функциональных грамматиках [Текст] / В.А. Кравченко, П.Б. Могнонов, Д.Н. Чимитов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – №5 (38). – С. 55-61.

2. Кравченко, В.А. Моделирование поиска решения с помощью функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко // Вестник Бурятского государственного университета. – 2012. – Вып. 9. Математика, информатика. – С. 33-41.

3. Кравченко, В.А. Программная реализация решателя задач на основе метода функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко, П.Б. Могнонов, Д.Н. Чимитов // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2013. – №6. – С. 36-42.

4. Кравченко, В.А. Построение баз знаний для решения задач методом функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов // Вестник Бурятского государственного университета. – 2015. – Вып. 9. Математика, информатика. – С. 96-102.

5. Кравченко, В.А. Использование функциональных грамматик в концептуальном программировании [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов, С.И. Олзоева // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. – 2016. – №4. – С. 3-12.

Свидетельство о государственной регистрации программы:

6. Свидетельство № 2013613951 Российская Федерация. Решатель задач на основе метода использования функциональных грамматик : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / В. А. Кравченко ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «ВСГУТУ». – № 2013612012 ; заявл. 12.03.2013 ; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 19.04.2013.

Публикации в других изданиях:

7. Чимитов, Д.Н. Принцип активизации в программировании [Текст] / Д.Н. Чимитов, Б.Б. Бадмаев, В.А. Кравченко // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы (ИКВТС-2010): материалы III международной конференции (г. Улан-Удэ, 6-11 сентября 2010 г.). – Улан-Удэ : Изд-во Бурятского госуниверситета, 2010. – С. 285-288.

8. Бадмаев, Б.Б. Функциональное моделирование работы систем знаний [Текст] / Б.Б. Бадмаев, В.А. Кравченко, Д.Д. Чимитова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – №11. – С. 41-42.

9. Кравченко, В.А. Решение задач посредством функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: материалы XI Всероссийской научно-технической конференции (г. Улан-Удэ, 13-20 августа 2012). – Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ, 2012. – С. 399-402.

10. Кравченко, В.А. Решатель задач на основе аппарата функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко, П.Б. Могнонов // Компьютерные технологии в науке, в технике, в искусстве: материалы Всероссийской научной конференции, часть 2 (Таганрог, 15 июня 2013 г.). – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. – С. 11-17.

11. Кравченко, В.А. Применение решателя задач на основе аппарата функциональных грамматик в радиотехнике [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Н. Чимитов // Компьютерные технологии в науке, в технике, в искусстве: материалы Всероссийской научной конференции, часть 2 (Таганрог, 15 июня 2013 г.). – Таганрог, : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. – С. 17-23.

12. Кравченко, В.А. Автоматизированный поиск решения задач методом функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко // Современные системы искусственного интеллекта и их приложения в науке: материалы II Всероссийской научной Интернет-конференции с международным участием (г. Казань, 14 мая 2014 г.). – Казань : ИП Синяев Д.Н., 2014. – С. 48-50.

13. Кравченко, В.А. Моделирование решения технических задач аппаратом функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко //

Дифференциальные уравнения и математическое моделирование: материалы конференции (г. Улан-Удэ, 22-27 июня 2015 г.). – Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ, 2015. – С. 165-167.

14. Кравченко, В.А. Системы знаний на основе функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы XII Международной научно-практической конференции (г. Сочи, 1-10 октября 2015 г.). – М. :НИУ ВШЭ, 2015. – С.178-179.

15. Кравченко, В.А. Автоматизированный синтез программ в интеллектуальных системах на основе функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Н. Чимитов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции (г. Сочи, 1-10 октября 2016 г.). – М. : Ассоциация вып. и сотр. ВВИА им. проф. Жуковского, 2016. – С. 275-277.

16. Кравченко, В.А. Функциональное логико-математическое моделирование динамических систем [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов, Д.Н. Чимитов // Техника и технологии: новые перспективы развития: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Самара, 25 сентября 2017 г.). – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 31-37.

17. Кравченко, В.А. Логико-математическое моделирование на основе функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов, Д.Н. Чимитов // Техника и технологии: новые перспективы развития: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Самара, 25 сентября 2017 г.). – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 37-42.

18. Кравченко, В.А. Способ последовательно-параллельной декомпозиции при логико-математическом моделировании динамических систем [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов, Д.Н. Чимитов // Современные технологии в мировом научном пространстве: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Уфа, 28 сентября 2017 г.): В 3 ч. Ч.2 – Уфа : АЭТЕРНА, 2017. – С. 48-56.

19. Кравченко, В.А. Метод логико-математического моделирования на основе функциональных грамматик [Текст] / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов, Д.Н. Чимитов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции (г. Сочи, 1-10 октября 2017 г.). – М. : Ассоциация вып. и сотр. ВВИА им. проф. Жуковского, 2017. – С. 389-392.