

На правах рукописи



Прошина Раиса Дмитриевна

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНО-
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ В ВИРТУАЛЬНО-ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

П Е Н 3 А – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия» на кафедре «Автоматизация и управление».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Слесарев Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Львов Алексей Арленович
доктор технических наук, профессор
Данилов Александр Максимович

Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное предприятие «Рубин»», г. Пенза

Защита состоится 22 декабря 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 при Пензенской государственной технологической академии по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а / 11, ПГТА, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия».

Автореферат разослан 22 ноября 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



В.А. Чулков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проведение научных исследований в вузе с использованием современных информационных технологий автоматизации обуславливает необходимость создания комплексных систем на базе компьютерного и физического моделирования, объединяющих все виды научной и учебной деятельности в единый интегрированный комплекс сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ), одна из основных компонент которого – система компьютерно-имитационного моделирования систем управления (СУ).

Значительный вклад в развитие математических методов исследования систем управления внесли В.А. Бесекерский, А.А. Воронов, П. Деруссо, Н.Д. Егупов, В.А. Иванов, Р. Калман, Х. Квакернаак, Ч. Клоуз, А.Н. Колмогоров, А.А. Красовский, Е.П. Попов, К.А. Пупков, Г. Розенброк, Р. Рой, Р. Сиван, В.В. Солодовников, В. Стрейц, М. Уонэм, Я.З. Цыпкин, Ф.Л. Черноусько, А.С. Шаталов и другие учёные.

Ключевой вопрос, определяющий решение всех задач теории и практики математического моделирования в ИКСАЛ, – это вопрос разрешения противоречия между методами моделирования, необходимостью отражения при моделировании особенностей топологии и структуры системы управления и универсальностью применяемых при моделировании методов.

Разрешение перечисленных противоречий лежит на пути поиска новых методов математического моделирования, решения на базе принципов системного анализа порождённой этими противоречиями проблемы развития и совершенствования теории и практики математического моделирования систем управления, построения программных комплексов, обеспечивающих решение широкого круга технических задач.

Цель работы – разработка методов, алгоритмов и комплекса программ математического моделирования в интегрированном комплексе компьютерно-имитационного моделирования, обеспечивающих повышение эффективности комплексных исследований систем управления в виртуально-физической среде.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ, обобщение и систематизация методов математического моделирования систем управления.
2. Разработка методов, вычислительных алгоритмов и комплексов программ по исследованию систем управления на основе математических моделей “Вход – выход” и в пространстве состояний (ПС).
3. Математическое моделирование непрерывных и дискретных систем управления в пространстве состояний.
4. Применение разработанных методов, алгоритмов и методик при комплексных исследованиях математических моделей вентильно-электромеханических систем и технологических процессов теплоэнергетики и машиностроения.
5. Разработка практических рекомендаций по применению разработанных методов математического моделирования и программных комплексов.

Объект исследований – технические системы управления на примерах управляемых вентильно-электромеханических систем, технологических объектов энергетики и машиностроения.

Предмет исследований – теория и практика математического моделирования систем управления с использованием технологий компьютерного моделирования.

Методы исследований – принципы системного анализа и прямой причинно-следственной взаимосвязи, теория управления, теория математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Научная новизна диссертационной работы состоит в создании интегрированного комплекса компьютерно-имитационного моделирования, включающего совокупность методов, алгоритмов, методик и комплекс программ, обеспечивающих проведение исследований систем управления в виртуально-физической среде и объединяющих следующие положения.

1. Предложена и обоснована совокупность методов математического моделирования систем управления в пространстве состояний с прямой причинно-следственной связью, отличающаяся тем, что каждая последующая координата состояния модели формируется по предыдущей координате, обеспечивающая повышение эффективности комплексных исследований технических объектов.

2. Разработаны вычислительные алгоритмы, включающие процедуры введения переменных состояния, вычисления параметров модели, формирования матриц системы, управления и выхода, обеспечивающие синтез математических моделей систем управления в пространстве состояний формы простых множителей, нормальной, канонической и комбинированных форм.

3. Разработана методика математического моделирования систем управления, включающая процедуры анализа моделей объектов исследования как элементов систем и системы элементов, как преобразователей энергии, количества вещества, количества движения и информации, как объектов управления и обеспечивающая моделирование разнородных объектов в интегрированной системе компьютерно-имитационного моделирования с использованием виртуальной и физической среды.

4. Разработан численный алгоритм исследования, состоящий во взаимном преобразовании и исследовании математических моделей “Вход – выход” и в пространстве состояний непрерывных и дискретных систем формы простых множителей, нормальной, канонической и комбинированной форм посредством нахождения сопряжённых систем и реверсирования порядка следования координат состояния, что обеспечивает расширение возможностей моделирования и повышение эффективности анализа и синтеза систем управления.

5. Разработан алгоритм численного формирования массивов экспериментальных данных при проведении натуральных экспериментов группами исследователей в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий, состоящий в последовательном выборе текущих значений измеряемых переменных с группы многофункциональных объектов с периодом, пропорциональным количеству исследователей.

Практическая значимость работы

1. Разработан комплекс программ, алгоритмов и методик, решающий задачи математического моделирования непрерывных и дискретных систем управления в пространстве состояний и формирование массивов данных натурального

эксперимента, обеспечивающий проведение математического и физического моделирования технических объектов в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий.

2. Практическое использование полученных научных результатов при проведении комплексных исследований математических моделей и многофункциональных объектов, технических объектов теплоэнергетики и машиностроения подтверждает адекватность разработанных методов и математических моделей, а также свидетельствует о высокой эффективности разработанной системы компьютерно-имитационного моделирования систем управления в виртуально-физической среде.

3. Разработаны практические рекомендации по применению созданных методов, математических моделей, алгоритмов, методик и комплекса программ.

Внедрение результатов работы

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены при анализе и синтезе систем управления для АСУТП ОАО НПФ “КРУГ”, а также при выполнении НИР по АВЦП № 2.1.2/5688 и 2.1.2/11488, ФЦП ГК № 14.740.11.1066.

Комплекс программ и методики моделирования внедрены при обучении студентов по направлению “Автоматизация технологических процессов и производств” в рамках интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий.

Достоверность результатов работы. Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, внедрением на промышленных предприятиях, апробацией на всероссийских и международных научных конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Интегрированный комплекс компьютерно-имитационного моделирования систем управления, обеспечивающий повышение эффективности комплексных исследований технических объектов в виртуально-физической среде.

2. Совокупность методов математического моделирования в пространстве состояний с прямой причинно-следственной связью, отличающихся тем, что каждая последующая координата состояний модели формируется по предыдущей координате, обеспечивающих единство методологических принципов моделирования непрерывных и дискретных систем управления с использованием математических моделей “Вход – выход” и в пространстве состояний.

3. Вычислительные алгоритмы, позволяющие проводить синтез математических моделей систем управления в пространстве состояний формы простых множителей, нормальной, канонической и комбинированных форм.

4. Методика математического моделирования систем управления, включающая процедуры анализа моделей объектов исследования как элементов систем, системы элементов как преобразователей энергии, количества вещества, количества движения, информации как объектов управления и обеспечивающая моделирование разнородных объектов в интегрированной системе компьютерно-имитационного моделирования с использованием виртуальной и физической среды.

5. Численный алгоритм моделирования непрерывных и дискретных систем с использованием математических моделей “Вход – выход” и пространства состояний формы простых множителей, нормальной, канонической и комбинированных форм, расширяющий возможности моделирования и повышающий эффективность анализа и синтеза технических систем.

6. Алгоритм численного формирования массивов экспериментальных данных при проведении натуральных экспериментов группами исследователей в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий, состоящий в последовательном выборе текущих значений измеряемых переменных с группы многофункциональных объектов с периодом, пропорциональным количеству исследователей.

7. Комплекс программ, методик и алгоритмов, обеспечивающий проведение математического и физического моделирования систем в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на международной научно-практической конференции “Инновационная экономика и промышленная политика региона (Экопром – 2009)” (С.-Петербург, 2009), на международной научно-технической конференции “Современные информационные технологии” (Пенза, 2009), на Всероссийской научно-практической конференции “Современные наукоемкие инновационные технологии” (Самара, 2009), на XXIII Международной научно-технической конференции “Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании” (Пенза, 2009), на XI Международной научно-технической конференции “Кибернетика и высокие технологии XXI века”, (Воронеж, 2010), на II Международной заочной научно-методической конференции “Современные образовательные технологии” (Пермь, 2010), на II Всероссийской научной конференции с международным участием “Научное творчество XXI века” (Красноярск, 2010), на XI Международной научно-технической конференции “Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике” (Пенза, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ, включая 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК, два отчёта по НИР.

Объём и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованных источников и приложения. Содержит 209 страниц машинописного текста, в том числе 77 рисунков и 10 таблиц. Библиография включает 158 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность рассматриваемой проблемы, формулируются цель, представлены задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе дан анализ объектов и задач моделирования в ИКСАЛ, проведено обобщение методов моделирования технических объектов управления. Выделены методы моделирования систем управления в пространстве “Вход –

выход” и “Вход – состояние – выход”, проведена систематизация математических моделей в виде дифференциальных уравнений и передаточных функций. Введены модели “Вход – выход” в канонической и стандартно-факторизованной форме, исключая ошибки, упрощающие анализ и построение математических моделей в ПС на основе дифференциальных уравнений и передаточных функций n -го порядка.

Разработанная структура интегрированного комплекса компьютерно-имитационного моделирования систем управления в виртуально-физической среде включает в себя методы и алгоритмы математического моделирования СУ в пространстве “Вход – выход” и в пространстве состояний, алгоритмы и комплекс программ исследования математических моделей систем, методики и алгоритмы численного формирования массивов экспериментальных данных при проведении натуральных экспериментов, обеспечивающих исследования систем управления в виртуально-физической среде.

Анализ и систематизация методов математического моделирования в ПС (рисунок 1) показывает, что в практике исследования систем управления наибольшее распространение нашли методы моделирования в форме простых множителей (ПМ), в нормальной (НФ) и канонической (КФ) формах.

Для моделирования сложных систем в данной работе предлагаются комбинированные методы моделирования в ПС. Однако известные модели ПС противоречивы и не образуют единую систему, что ограничивает возможности формирования моделей САУ в комбинированных формах ПС.

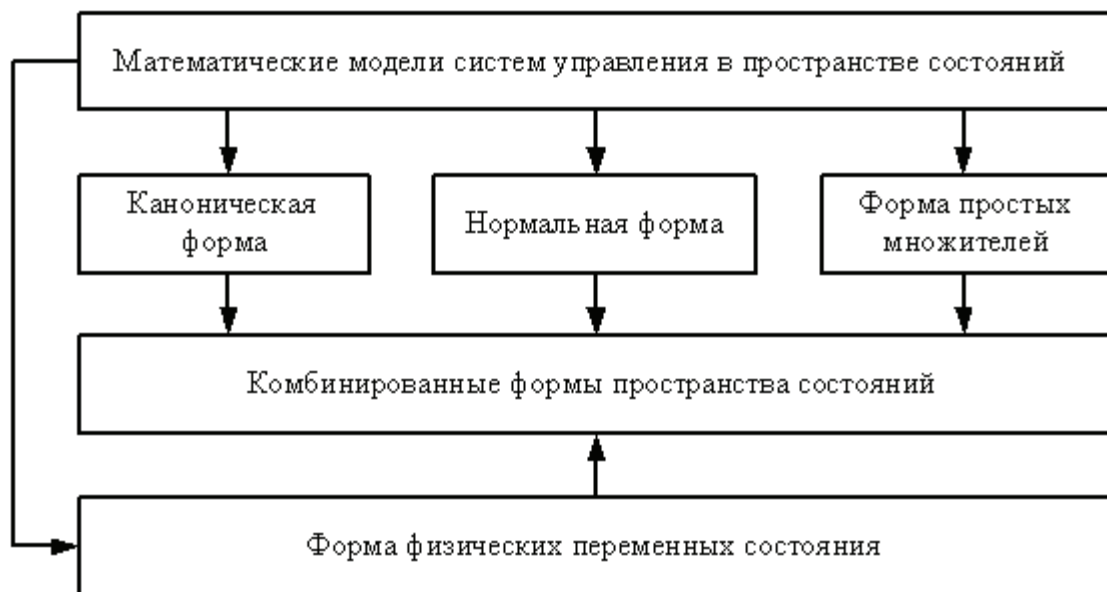


Рисунок 1 – Методы математического моделирования систем в пространстве состояний

Разработанные методы формирования математических моделей в пространстве состояний (рисунок 2) образуют целостную систему, объединяющую методы формирования уравнений состояния и выхода математических моделей нормальной, канонической и комбинированных форм, а также в форме простых множителей пространства состояний. С целью повышения эффективности анализа разнородных систем математические модели предлагается задавать

как в естественной, так и в нормированной форме пространства состояний с нормированием времени, входа, выхода, входа и выхода.

Разработанная комплексная методика исследования технических объектов в условиях ИКСАЛ основана на системном, энергетическом и информационно-алгоритмическом причинно-следственном подходах. Методика объединяет проведение комплексных исследований в виртуальной и физической среде на основе анализа разнородных объектов исследования как элементов систем, системы элементов как преобразователей энергии, количества вещества, количества движения, информации как объектов управления.

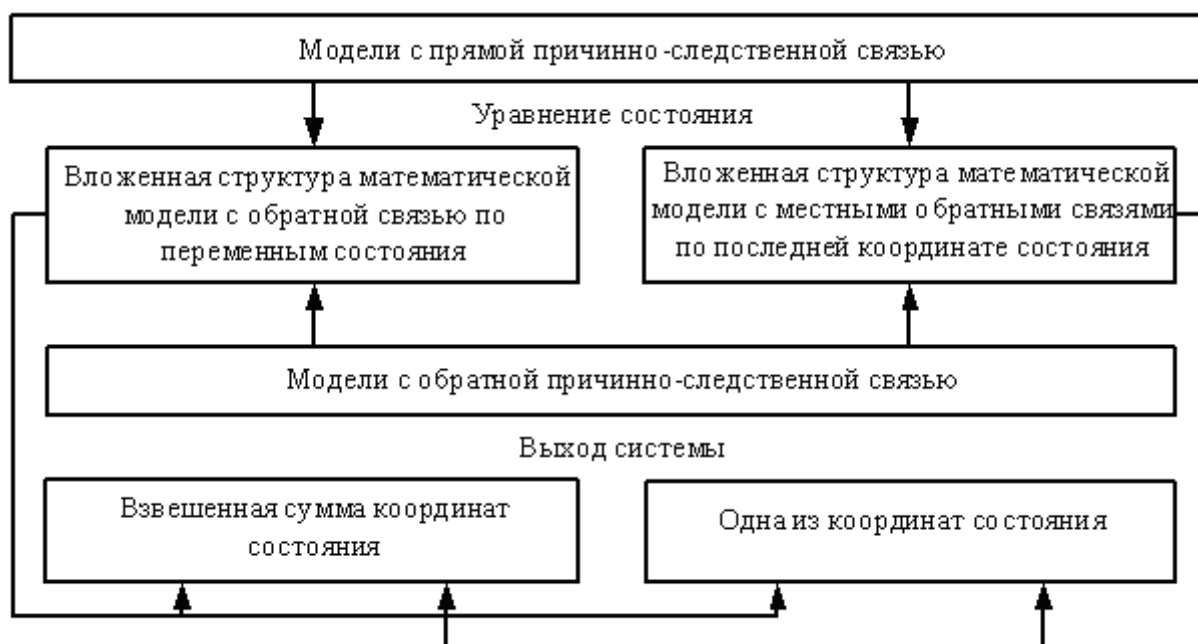


Рисунок 2 – Методы формирования математических моделей систем в пространстве состояний

Главный результат первого раздела – разработанные структура интегрированного комплекса компьютерно-имитационного моделирования, систематизация математических моделей в группе дифференциальных уравнений и передаточных функций n -го порядка, совокупность методов формирования математических моделей в пространстве состояний, комплексная методика исследования технических объектов в условиях ИКСАЛ.

Второй раздел направлен на разработку методов математического моделирования и алгоритмов синтеза математических моделей в нормальной и канонической форме ПС. В соответствии с введенными в первом разделе методами как для прямой (рисунок 2), так и для обратной причинно-следственной связи предлагаемые алгоритмы включают построение двух групп моделей вложенной структуры:

- с обратными связями по переменным состояния и с суммированием на входе,
- с местными обратными связями по выходу.

В первой группе на вход системы поступает взвешенная сумма переменных состояния. Во второй группе каждая переменная состояния формируется с учётом последней координаты состояния системы для моделей с прямой причин-

но-следственной связью и по первой координате состояния для моделей с обратной причинно-следственной связью.

Для первой группы моделей НФ с прямой и обратной причинно-следственной связью матрицы системы A формируются соответственно в виде

$$A = \begin{bmatrix} -a_{n-1}^* & -a_{n-2}^* & \dots & -a_1^* & -a_0^* \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_0^* & -a_1^* & -a_2^* & \dots & -a_{n-2}^* & -a_{n-1}^* \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Для второй группы соответственно в моделях с прямой и обратной причинно-следственной связью задаются так:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_0^* \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_1^* \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -a_2^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_{n-1}^* \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} -a_{n-1}^* & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -a_{n-2}^* & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_1^* & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_0^* & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матрицы управления B и наблюдения C для первой группы моделей первой модификации (1)

$$B = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_{n-1} \end{bmatrix}; C = [0 \ 0 \ \dots \ 1] \quad B = \begin{bmatrix} \lambda_{n-1} \\ \lambda_{n-2} \\ \dots \\ \lambda_0 \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (3)$$

формируются с использованием коэффициентов λ

$$\lambda_i = b_i - \sum_{j=i+1}^m \lambda_j a_{n+i-j}, \quad i = \overline{m, 0},$$

а для (2) посредством коэффициентов C ($C_n = b_n^*$; $C_i = b_i^* - b_n^* a_i^*$)

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}; C = [C_{n-1} \ C_{n-2} \ \dots \ C_0], \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}; C = [C_0 \ C_1 \ \dots \ C_{n-1}]. \quad (4)$$

Формирование матриц управления и наблюдения второй модификации, наоборот, обеспечивается для первой группы применением коэффициентов C

$$B = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_{n-1} \end{bmatrix}; C = [0 \ 0 \ \dots \ 1] \quad B = \begin{bmatrix} C_{n-1} \\ C_{n-2} \\ \dots \\ C_0 \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ \dots \ 0], \quad (5)$$

а для второй группы

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}; C = [\lambda_{n-1} \ \lambda_{n-2} \ \dots \ \lambda_0], \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}; C = [\lambda_0 \ \lambda_1 \ \dots \ \lambda_{n-1}] \quad (6)$$

– коэффициентов λ .

Здесь коэффициенты a_i^*, n и b_i^*, m – параметры и порядок собственного оператора системы и оператора входного воздействия, соответственно.

Порядок следования коэффициентов в матрицах управления и наблюдения (3) – (6) для моделей с прямой и обратной причинно-следственной связью взаимно противоположен. Модели с прямой и обратной причинно-следственной связью образуют функционально-полную систему из восьми попарно двойственных (сопряжённых) моделей.

Для моделей с обратной причинно-следственной связью

$$\bar{V}_*^{(1)} = A_* \bar{V}_* + B_* y; \quad x = C_* \bar{V}_* + dy$$

соответствующая система с прямой причинно-следственной связью

$$\bar{V}^{(1)} = A \bar{V} + B y; \quad x = C \bar{V} + dy$$

является сопряжённой

$$\bar{V}_*^{(1)} = A^T \bar{V}_* + C^T y; \quad x = B^T \bar{V}_* + dy.$$

Следовательно, матрицы в этих моделях задаются формулами:

$$A_* = A^T, \quad B_* = C^T, \quad C_* = B^T.$$

С учётом установленных свойств моделей предлагается в качестве базовых принять модели первой НФ1 и второй НФ2 модификации, а за основу алгоритма формирования оставшихся шести математических моделей принять процедуры реверсирования (р) порядка следования переменных состояния и нахождения сопряжённых (с) систем (рисунок 3).

Например, формирование математической модели четвёртой модификации включает в себя переход посредством реверсирования к модели пятой модифи-

кации НФ5, а затем построение к ней сопряжённой модели четвёртой модификации НФ4.

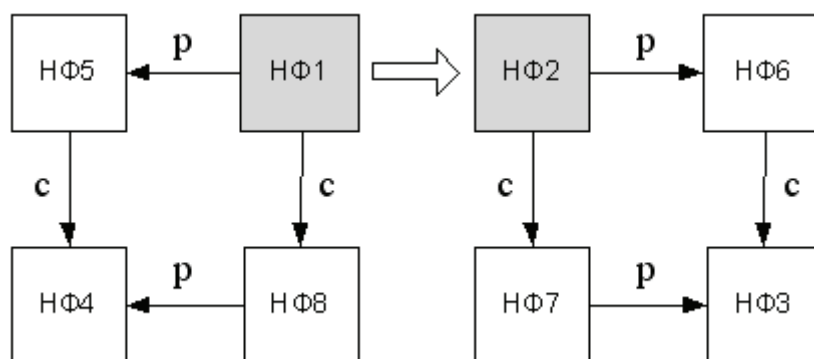


Рисунок 3 – Алгоритм формирования системы математических моделей нормальной формы пространства состояний

Разработанный метод математического описания системы n -го порядка в канонической форме пространства состояний с прямой причинно-следственной связью состоит в том, что в матрице Жордана для систем управления, передаточ-

ные функции которых содержат r кратных полюсов s_i кратности μ_i ($\sum_{i=1}^r \mu_i = n$), элементу, предшествующему в строках клеток Жордана диагональному, задают значение, равное 1, остальным – равное 0.

На основе разработанных методов построены математические модели и структурные схемы непрерывных и дискретных систем в ПС.

Таким образом, основным результатом второго раздела – комплекс методов и алгоритмов построения математических моделей в нормальной и канонической формах пространства состояний, обеспечивающий синтез восьми модификаций моделей нормальной формы и позволяющий повысить эффективность математического моделирования непрерывных и дискретных систем управления с различной структурой. Установлена взаимосвязь методов математического моделирования в нормальной форме пространства состояний. Показано, что базовыми при построении функционально-полной системы методов математического моделирования технических объектов в пространстве состояний являются математические модели первой и второй модификации. На основе процедур реверсирования (р) порядка следования переменных состояния и нахождения сопряжённых (с) систем построен алгоритм преобразования базовых моделей первой и второй модификаций к моделям соответственно четвёртой, пятой, восьмой и третьей, шестой и седьмой модификаций.

В третьем разделе разрабатываются методы и алгоритмы синтеза математических моделей непрерывных и дискретных систем в форме простых множителей и комбинированных формах ПС. Формирование на основе предложенных в первом разделе (рисунок 2) методов математического моделирования моделей в форме простых множителей пространства состояний приводит к системе математических моделей из восьми модификаций. Алгоритм формирования сис-

темы математических моделей в форме простых множителей пространства состояний на основе базовых моделей аналогичен алгоритму построения моделей нормальной формы ПС (рисунок 3). На основе принципа прямой причинно-следственной связи формируются первые четыре модификации моделей.

$$1. \begin{bmatrix} v_1^{(1)} \\ v_2^{(1)} \\ \dots \\ v_n^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ (s_2 - \gamma_2) & s_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (s_n - \gamma_n) & (s_n - \gamma_n) & \dots & s_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (s_1 - \gamma_1) \\ (s_2 - \gamma_2) \\ \dots \\ (s_n - \gamma_n) \end{bmatrix} y; \quad x = [k \quad k \quad \dots \quad k] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} + ky. \quad (7)$$

$$2. \begin{bmatrix} v_1^{(1)} \\ v_2^{(1)} \\ v_3^{(1)} \\ \dots \\ v_{n-1}^{(1)} \\ v_n^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & s_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & s_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & s_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \dots \\ v_{n-1} \\ v_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} y; \quad x = [C_{n-1} \quad C_{n-2} \quad \dots \quad C_0] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} + C_n y. \quad (8)$$

$$3. \begin{bmatrix} v_1^{(1)} \\ v_2^{(1)} \\ v_3^{(1)} \\ \dots \\ v_{n-1}^{(1)} \\ v_n^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_n & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & s_{n-1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & s_{n-2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & s_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \dots \\ v_{n-1} \\ v_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_{n-2} \\ C_{n-1} \end{bmatrix} y; \quad x = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} + C_n y. \quad (9)$$

$$4. \begin{bmatrix} v_1^{(1)} \\ v_2^{(1)} \\ v_3^{(1)} \\ \dots \\ v_n^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_n & 0 & 0 & \dots & 0 \\ (s_n - \gamma_n) & s_{n-1} & 0 & \dots & 0 \\ (s_n - \gamma_n) & (s_{n-1} - \gamma_{n-1}) & s_{n-2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (s_n - \gamma_n) & (s_{n-1} - \gamma_{n-1}) & (s_{n-2} - \gamma_{n-2}) & \dots & s_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k \\ k \\ k \\ \dots \\ k \end{bmatrix} y;$$

$$x = [(s_n - \gamma_n) \quad (s_{n-1} - \gamma_{n-1}) \quad \dots \quad (s_1 - \gamma_1)] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} + ky. \quad (10)$$

Получены выражения для определения параметров моделей (7) – (10) в абсолютных значениях и нормированном пространстве состояний (таблица 1).

Таблица 1 – Нормирование в моделях простых множителей пространства состояний второй модификации

№	Модель в ПС	Матрица системы A	Матрица управления B	Матрица наблюдения C
3.2	Вторая модификация	$\begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$[C_3 \ C_2 \ C_1 \ C_0]$
3.3	Нормирование переменных состояния	$\begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ -s_2 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & -s_3 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & -s_4 & s_4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -s_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\left[\begin{array}{cccc} -\frac{C_3}{s_1} & -\frac{C_2}{s_1 s_2} & -\frac{C_1}{s_1 s_2 s_3} & -\frac{C_0}{s_1 s_2 s_3 s_4} \end{array} \right]$
3.4	Нормирование выхода	$\begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\left[\begin{array}{cccc} \frac{C_3}{K} & \frac{C_2}{K} & \frac{C_1}{K} & \frac{C_0}{K} \end{array} \right]$
3.5	Нормирование переменных состояния и выхода	$\begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ -s_2 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & -s_3 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & -s_4 & s_4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -s_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\left[\begin{array}{cccc} -\frac{C_3}{Ks_1} & -\frac{C_2}{Ks_1 s_2} & -\frac{C_1}{Ks_1 s_2 s_3} & -\frac{C_0}{Ks_1 s_2 s_3 s_4} \end{array} \right]$

Построены структурные схемы синтезированных математических моделей. В качестве примера на рисунке 4 приведена структурная схема математической модели в форме простых множителей пространства состояний второй модификации.

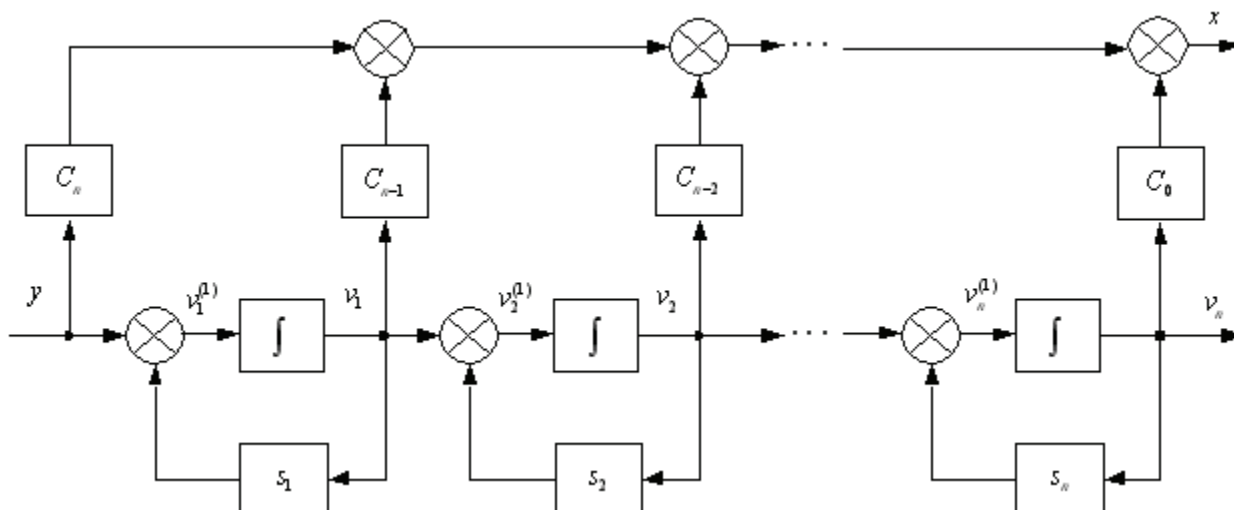


Рисунок 4 – Структурная схема математической модели системы в форме простых множителей пространства состояний второй модификации

Методы математического моделирования в комбинированных формах пространства состояний объединяют методы моделирования на основе модифика-

ций как отдельных форм ПС, так и сочетания нормальной (Н) и канонической (К) форм, формы простых множителей (М) (рисунок 5). Последовательность символов указывает на последовательность применения методов математического моделирования к отдельным частям системы управления. На втором уровне это методы, объединяющие два символа, на третьем – три и т.д.

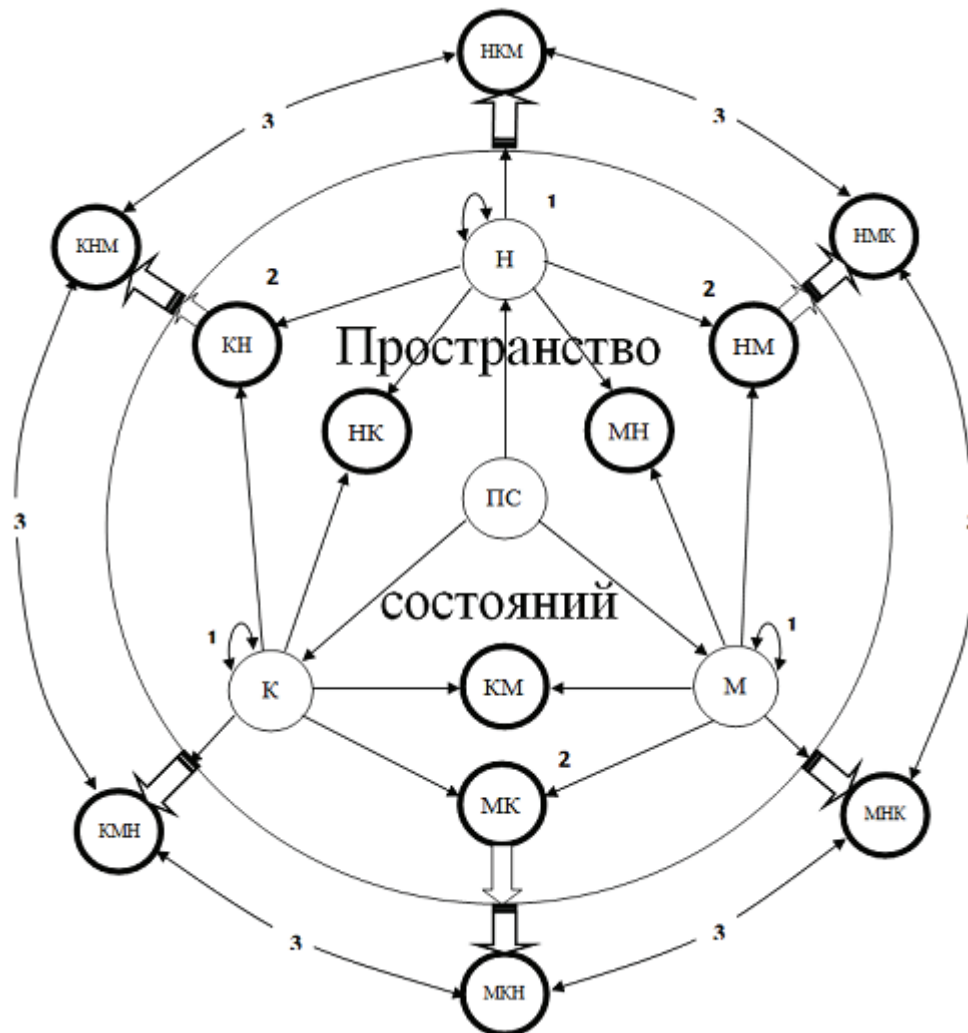


Рисунок 5 – Методы математического моделирования в комбинированных формах пространства состояний

Наиболее важный результат третьего раздела – единый комплекс методов и алгоритмов построения математических моделей в комбинированных формах и форме простых множителей ПС, обеспечивающий повышение эффективности математического моделирования непрерывных и дискретных систем управления с различной структурой при использовании всевозможных сочетаний методов, отражающих особенности отдельных звеньев системы.

Четвёртый раздел посвящён разработке алгоритмов моделирования и исследованию математических моделей СУ. Разработанный алгоритм включает в себя модули моделирования непрерывных и дискретных систем.

В первой части алгоритма задаются параметры передаточной функции в полиномиальной форме и производится расчёт параметров передаточной функции в канонической форме. Затем для всей совокупности методов (рисунок 1,

рисунок 2) рассчитывают коэффициенты и формируют матрицы системы, управления, наблюдения. Задают входное воздействие и начальные условия. Рассчитывается переходная характеристика системы $x_3(t)$. Для сравнения проводится расчёт переходной характеристики $h_3(t)$ по аналитическому выражению. По результатам расчёта строятся переходные характеристики выходной координаты $x_3(t)$, $h_3(t)$ и переменных состояния (v_1, v_2, v_3).

При моделировании дискретных систем (рисунок 6) по передаточной функции непрерывной системы строятся передаточные функции дискретной системы аналогового эквивалента с экстраполятором заданного порядка в Z – форме, на базе которых формируются математические модели дискретных систем в пространстве состояний.

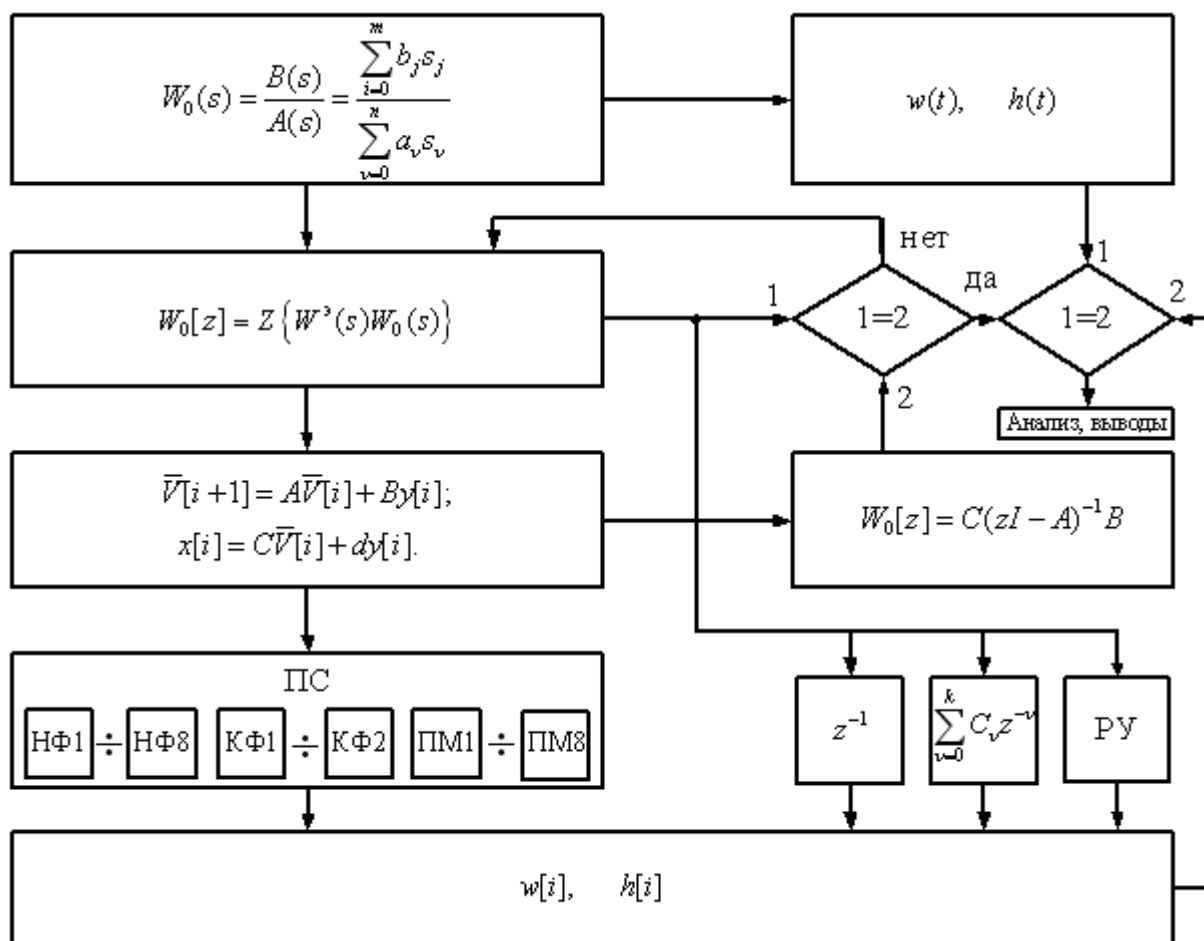


Рисунок 6 – Алгоритм исследования математических моделей дискретных систем управления

По моделям в пространстве состояний и “Вход – выход” вычисляются временные характеристики, сравниваются и анализируются результаты вычислений как непрерывных ($w(t), h(t)$), так и дискретных ($w[i], h[i]$) весовых и переходных характеристик, рассчитанных как по непрерывным, так и по дискретным моделям “Вход – выход” и “Вход – состояние – выход”. Исследования

проводились для системы управления с четырьмя входами

$$\begin{aligned}
 a_3 \frac{d^3x}{dt^3} + a_2 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x &= b_{13} \frac{d^3y_1}{dt^3} + b_{12} \frac{d^2y_1}{dt^2} + b_{11} \frac{dy_1}{dt} + b_{10}y_1 + \\
 &+ b_{22} \frac{d^2y_2}{dt^2} + b_{21} \frac{dy_2}{dt} + b_{20}y_2 + b_{31} \frac{dy_3}{dt} + b_{30}y_3 + b_{40}y_4
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

для различных вариантов параметров модели.

Ниже, на рисунке 7, приведены переходные характеристики для непрерывной системы третьего порядка с тремя нулями (первый вход) с параметрами входного оператора: $b_{13} = 2$, $b_{12} = 34$, $b_{11} = 188$, $b_{10} = 336$. В качестве параметров собственного оператора системы приняты: $a_3 = 3$, $a_2 = 30$, $a_1 = 93$, $a_0 = 90$. Первый график отражает переходные характеристики $x_3(t)$ и $h_3(t)$, второй переходные характеристики переменных состояния. На третьем графике приведена траектория движения системы в пространстве состояний. Четвёртый график отражает отличия переходных характеристик $x_3(t)$ и $h_3(t)$.

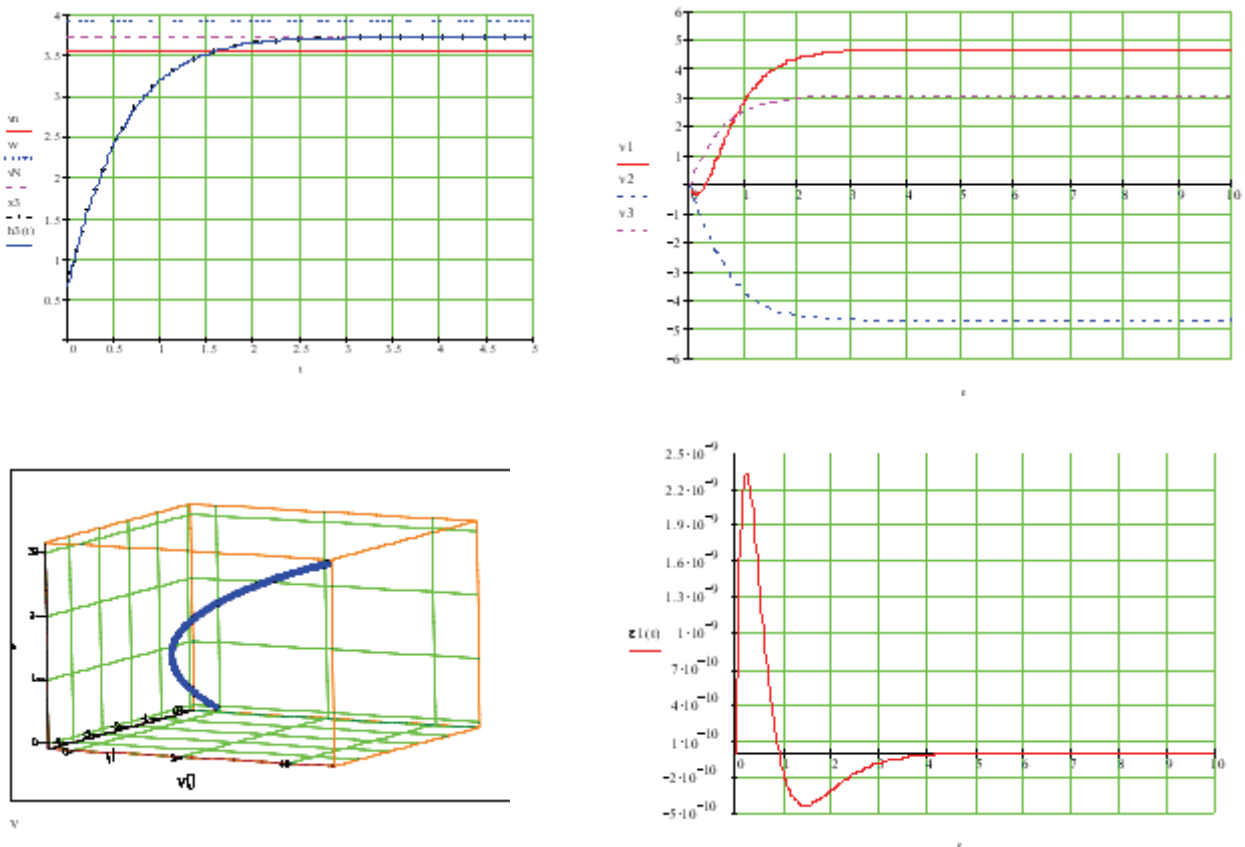


Рисунок 7 – Результаты исследования непрерывной системы третьего порядка с тремя нулями

Аналогичные исследования проведены для всех входов системы, задаваемых непрерывными и дискретными моделями без нулей, с двумя и одним нулём. Результаты исследования СУ (11) в классе дискретных моделей ПС по второму входу ($b_{22} = 4$, $b_{21} = 40$, $b_{20} = 96$) приведены на рисунке 8. На первом гра-

фике построены переходные характеристики, вычисленные по аналитическому выражению и дискретным моделям нормальной формы восьми модификаций. Второй график отражает переходные характеристики переменных состояния модели нормальной формы первой модификации. Переходные характеристики отклонений дискретных моделей НФ от аналитической модели воспроизводят оставшиеся четыре графика.

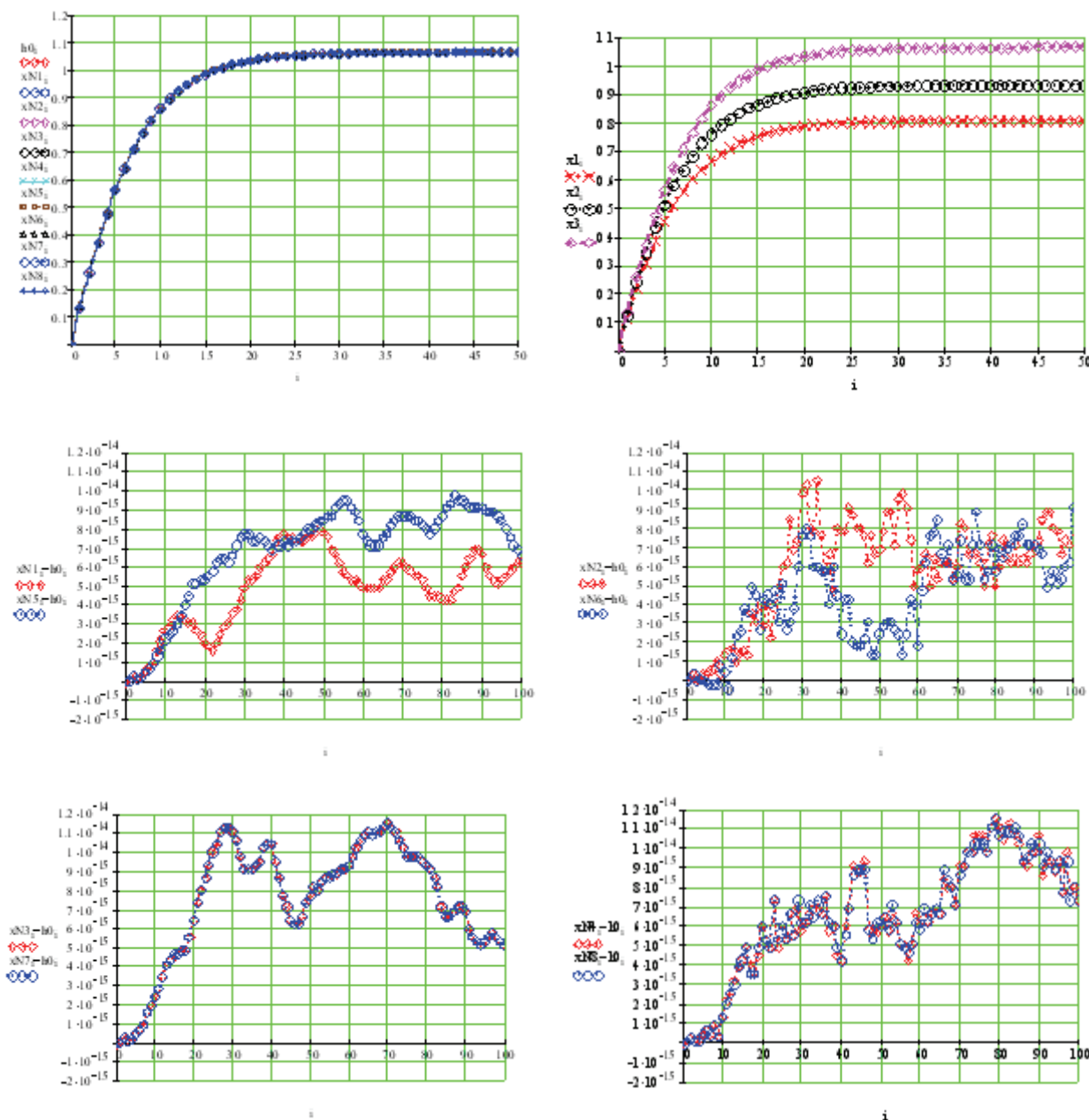


Рисунок 8 – Результаты исследования дискретной модели третьего порядка с двумя нулями

Анализ полученных характеристик показывает, что они совпадают с большей точностью. Отличия для непрерывных моделей составляют величины, не превышающие $\varepsilon_1(t) = x_3(t) - h_3(t) < 2,5 \cdot 10^{-9}$, для дискретных – не превышающие значений 10^{-13} , и обусловлены особенностями вычислений на компьютерах. Сравнительный анализ результатов исследования всех моделей показывает,

что отличия вычисленных по моделям в пространстве состояний переходных характеристик от характеристик, построенных по аналитическим выражениям, пренебрежимо малы и обусловлены погрешностями численных методов. Наличие нулевых полюсов в передаточной функции САУ ускоряет процессы. Так, если для модели без нулей время переходного процесса t_p составило 2,25 с, то при $m=1$ это время равно $t_p=1,92$, при $m=2$ – уменьшилось до величины $t_p=1,73$, а при $m=3$ – имеет минимальное значение $t_p=1,56$.

В работе проведены исследования математических моделей вентильно-электромеханических систем, гидропривода, электродинамического стенда, парового котла, гидродинамических процессов. В качестве примера приведём математическую модель замкнутой системы следящего электропривода постоянного тока, матрицы которой имеют следующую структуру:

$$A = \begin{bmatrix} -a_2^k - a_1^k - a_0^k & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_0 & -a_2 & -a_1 & -a_0 - C_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ C_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Первые три строчки матрицы системы задают структуру и параметры регулятора, а последние три строчки – структуру и параметры объекта управления (машины постоянного тока с вентильным преобразователем). При этом первая часть матрицы A представлена в форме модели второй, а вторая – первой модификации ПС, что позволяет, с одной стороны, эффективно исследовать структуру формирования управляющего сигнала, а с другой – определить характер изменения угла поворота, скорости и ускорения в системе (рисунок 9).

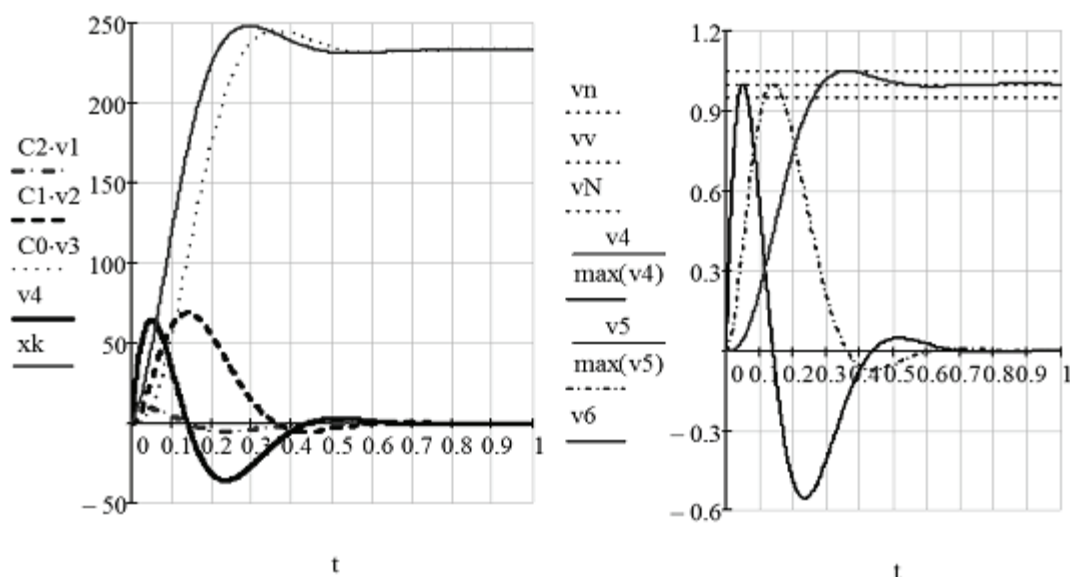


Рисунок 9 – Характер изменения переменных состояния в модели электропривода

Результаты исследования следящего электропривода постоянного тока мощностью 0,17 кВт отражают соотношения между составляющими управляющего сигнала, пропорциональными ошибке и её производным. Наименьшее значение имеют составляющие, пропорциональные третьей и второй производным. При $C3 = 0$ перерегулирование увеличивается незначительно, с $\sigma = 4,981\%$ до $\sigma = 5,223\%$, при $C2 = 0$ возрастает до $\sigma = 6,839\%$, при $C2 = C3 = 0$ повышается до значения $\sigma = 7,128\%$. Изменение настроек регулятора по первой производной и по ошибке системы существенно изменяет характер переходных процессов, увеличивая колебательность и более чем в пять раз перерегулирование следящего электропривода.

Основной итог четвёртого раздела состоит в том, что на основе предложенных в предыдущих разделах методов разработан численный алгоритм моделирования и на базе математических моделей «Вход – выход» и в пространстве состояний формы простых множителей, нормальной, канонической и комбинированной форм проведены исследования непрерывных и дискретных систем, а также технических объектов, подтверждающие высокую эффективность разработанных методов.

В пятом разделе решаются задачи разработки комплекса программ, алгоритмов численного формирования массивов результатов натурального эксперимента. Интегрированный комплекс компьютерно-имитационного моделирования технических систем в виртуально-физической среде является компонентой интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий. Поэтому разрабатываемый комплекс программ является составной частью программного обеспечения ИКСАЛ. Архитектура ИКСАЛ показана на рисунке 10.

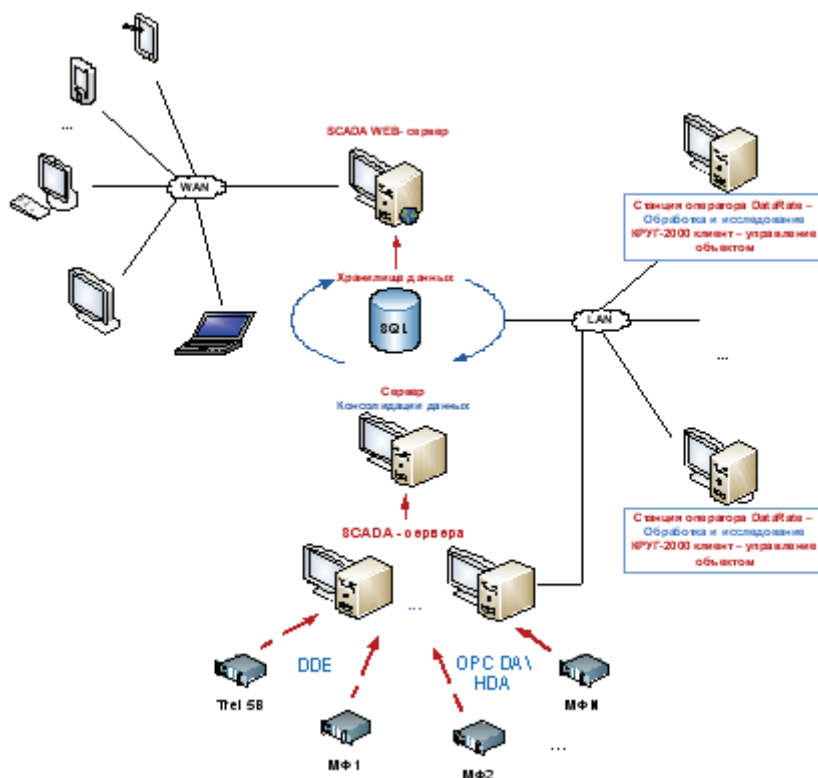


Рисунок 10 – Архитектура ИКСАЛ

Для обеспечения проведения экспериментальных исследований и предварительной обработки результатов натурального эксперимента разработана система алгоритмов и методик комплексного исследования технических объектов в виртуально-физической среде, включающая в себя методики параллельного исследования единственного объекта со смещением моментов получения информации для каждого исследователя; последовательного исследования одного и того же объекта; комплексного проведения исследований с использованием физических и математических моделей; комплексного проведения исследований нескольких объектов с использованием физических и математических моделей; комплексного проведения исследований с использованием накопленных и синтезированных экспериментальных данных, а также трендов, снятых с реальных промышленных установок. Комплекс программ объединяет процедуры и обеспечивает решение задач как математического, так и физического моделирования технических объектов на базе многофункциональных объектов исследования. Основная экранная форма моделирования многофункционального объекта исследования “Синхронный генератор – распределённая электрическая сеть” показана на рисунке 11.

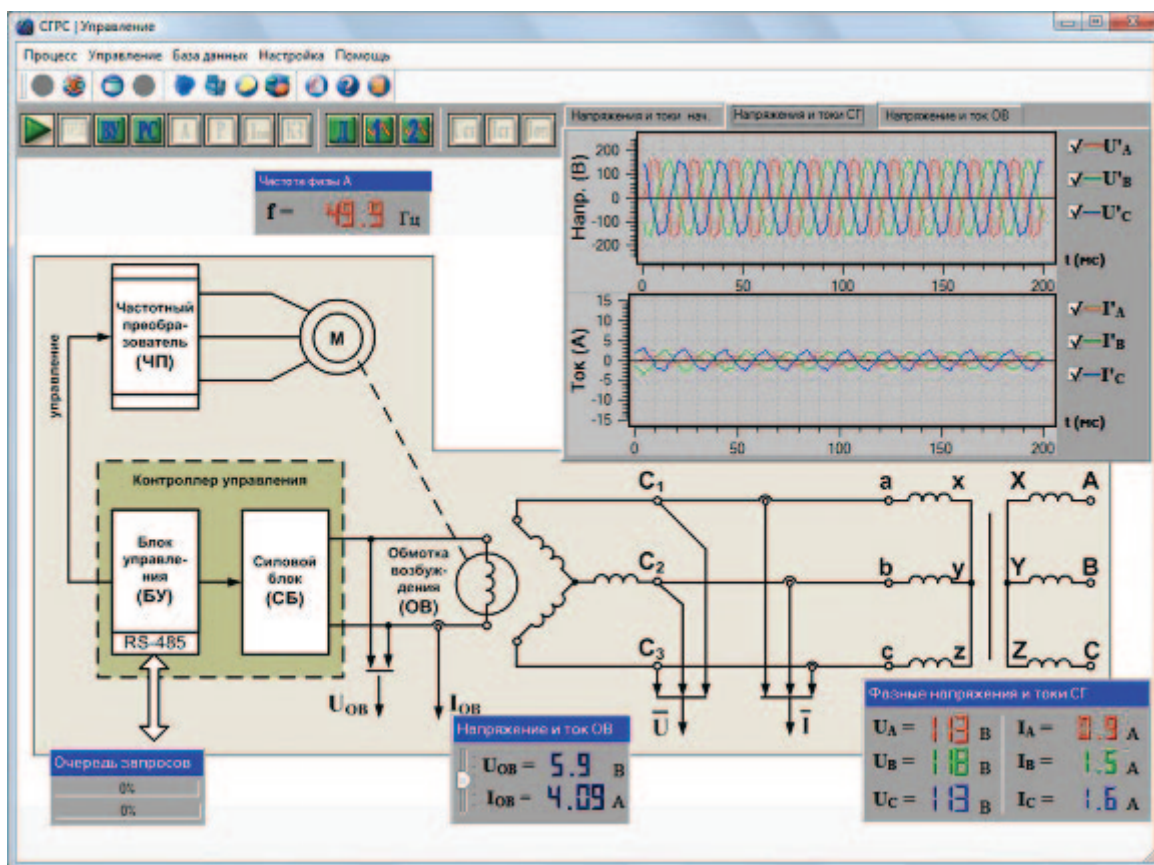


Рисунок 11 – Основная экранная форма многофункционального объекта исследования “Синхронный генератор – распределённая электрическая сеть”

Проведены экспериментальные исследования электропривода постоянного тока, асинхронного привода и системы “Синхронный генератор – распределённая электрическая сеть” (рисунок 12), подтверждающие высокую точность моделирования физических объектов. Погрешность математического моделиро-

вания систем управления на основе разработанных методов в динамических режимах не превышает 10 %, в статических режимах ограничивается 2–5 %.

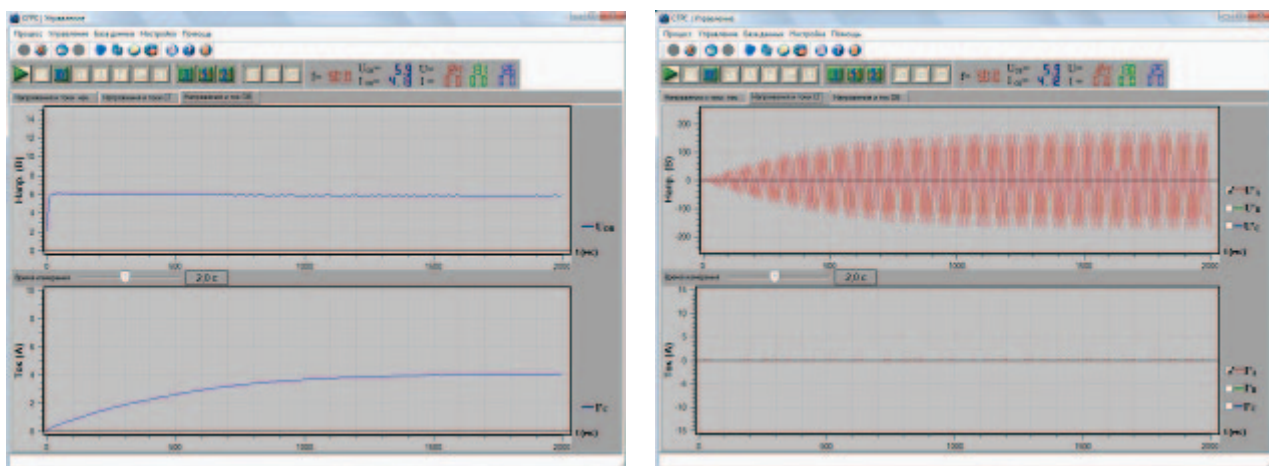


Рисунок 12 – Результаты экспериментальных исследований синхронного генератора

Основной результат пятого раздела – разработанный комплекс программ, алгоритмов и методик, решающий задачи математического моделирования непрерывных и дискретных систем управления в пространстве состояний и формирование массивов данных натурального эксперимента, обеспечивающий проведение математического и физического моделирования технических объектов в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий. Проведены комплексные исследования методов математического моделирования, математических моделей и многофункциональных объектов, технических объектов теплоэнергетики и машиностроения, подтверждающие адекватность разработанных методов и математических моделей, а также свидетельствующие о высокой эффективности разработанной системы компьютерно-имитационного моделирования. Даны практические рекомендации по применению разработанных методов, математических моделей, алгоритмов, методик и комплекса программ.

В приложении приведены акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Общий итог работы состоит в создании интегрированного комплекса компьютерно-имитационного моделирования систем управления, обеспечивающего повышение эффективности комплексных исследований систем управления в виртуально-физической среде.

При решении поставленных задач получены следующие результаты.

1. Создана система методов математического моделирования технических объектов в пространстве состояний с прямой причинно-следственной связью, обеспечивающих единство методологических принципов моделирования и повышение эффективности комплексных исследований непрерывных и дискретных систем управления с использованием математических моделей систем “Вход – выход” и в пространстве состояний.

2. Разработаны вычислительные алгоритмы, обеспечивающие синтез функционально-полной системы математических моделей систем управления в пространстве состояний формы простых множителей, нормальной, канонической и комбинированных форм.

3. Разработана и обоснована методика математического моделирования систем управления, включающая процедуры анализа моделей объектов исследования как элементов систем, системы элементов как преобразователей энергии, количества вещества, количества движения, информации как объектов управления и обеспечивающая моделирование разнородных объектов в интегрированном комплексе компьютерно-имитационного моделирования с использованием виртуальной и физической среды.

4. Построен численный алгоритм исследования, объединяющий в замкнутый цикл процедуры взаимного преобразования и исследования математических моделей “Вход – выход” и в пространстве состояний непрерывных и дискретных систем формы простых множителей, нормальной, канонической и комбинированной форм, позволяющий расширить возможности моделирования и повысить эффективность анализа и синтеза систем управления.

5. Разработан алгоритм численного формирования массивов экспериментальных данных при проведении натуральных экспериментов группами исследователей в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий, состоящий в последовательном выборе текущих значений измеряемых переменных с группы многофункциональных объектов с периодом, пропорциональным количеству исследователей.

6. Создана система компьютерно-имитационного моделирования технических объектов, включающая комплекс программ, методов и методик, обеспечивающих исследования систем управления в виртуально-физической среде.

7. Разработан комплекс программ, алгоритмов и методик, решающий задачи математического моделирования непрерывных и дискретных систем управления в пространстве состояний и формирования массивов данных натурального эксперимента, обеспечивающий проведение математического и физического моделирования технических объектов в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий.

8. Проведены комплексные исследования методов математического моделирования, математических моделей и многофункциональных объектов, технических объектов теплоэнергетики и машиностроения, подтверждающие адекватность разработанных методов и математических моделей, а также свидетельствующие о высокой эффективности разработанной системы компьютерно-имитационного моделирования.

9. Интегрированная система компьютерно-имитационного моделирования, разработанные методы, алгоритмы и комплексы программ моделирования систем управления в виртуально-физической среде внедрены в учебном процессе и на промышленных предприятиях. Математическое моделирование, экспериментальные исследования, промышленная апробация и эксплуатация создан-

ных методов, методик и программных средств подтверждают высокую эффективность разработанной системы моделирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Прошина, Р.Д. Интегрированный электромеханический комплекс / Р.Д. Прошина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 1(3). – С. 609 – 612.

2. Прошина, Р.Д. Математическое моделирование технических систем в нормальной форме пространства состояний / Р.Д. Прошина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 1(3). – С. 613 – 616.

3. Прошина, Р.Д. Математическое моделирование систем управления в нормальной форме пространства состояний / Р.Д. Прошина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 197 – 202.

4. Прошина, Р.Д. Структурно-параметрический синтез математических моделей объектов исследования по экспериментальным данным / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: “Морская техника и технология”. – 2009. – № 1. – С. 110 – 115.

5. Прошина, Р.Д. Моделирование судовой валогенераторной установки с униполярными вставками, передающими вращающий момент посредством магнитной связи / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: “Морская техника и технология”. – 2009. – № 2. – С. 92 – 97.

6. Прошина, Р.Д. Концепция построения интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 527 – 530.

7. Прошина, Р.Д. Программная платформа для построения интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 531 – 536.

Публикации в других изданиях:

8. Прошина, Р.Д. Методы построения математических моделей в пространстве состояний / Р.Д. Прошина, Ю.Н. Слесарев // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сборник трудов XI Международной научно-технической конференции. – Пенза: ПГПУ. – 2011. – С. 56 – 59.

9. Прошина, Р.Д. Математическое моделирование асинхронного электропривода с вентильным преобразователем в цепях статора / Р.Д. Прошина, Ю.Н. Слесарев // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : Сборник трудов XI Международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГПУ, 2011. – С. 59 – 62.

10. Прошина, Р.Д. Интегрированный комплекс научных исследований и профессиональной подготовки в вузе / Р.Д. Прошина // В мире научных открытий. – Красноярск, 2010. – С. 65 – 67.

11. Прошина, Р.Д. Интегрированный комплекс сетевых автоматизированных лабораторий / Р.Д. Прошина // Современные образовательные технологии : Материалы II Международной заочной научно-методической конференции. – Пермь : ОТ и ДО, 2010. – С. 306 – 309.

12. Прошина, Р.Д. Математическое моделирование технологических процессов в условиях интегрированного комплекса научных исследований / Р.Д. Прошина // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании : Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГТА, 2009. – С. 93 – 95.

13. Прошина, Р.Д. Систематизация передаточных функций систем управления / Р.Д. Прошина // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании : Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГТА, 2009. – С. 169 – 172.

14. Прошина, Р.Д. Математические модели систем управления “Вход – выход” в классе дифференциальных уравнений / Р.Д. Прошина // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании : Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГТА, 2009. – С. 172 – 175.

15. Прошина, Р.Д. Математические модели электромеханических преобразователей энергии / Р.Д. Прошина // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании : Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГТА, 2009. – С. 176 – 179.

16. Прошина, Р.Д. Идентификация математических моделей как процесс повышения ранга неопределённости модели / Р.Д. Прошина // Современные информационные технологии : Сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГТА, 2009. – Выпуск 9. – С. 83 – 87.

17. Прошина, Р.Д. Автоматизированная система научных и учебных исследований / Р.Д. Прошина // Современные информационные технологии : Сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГТА, 2009. – Выпуск 9. – С. 121 – 125.

18. Прошина, Р.Д. Обработка информации в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий / Р.Д. Прошина // Современные информационные технологии : Сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза : ПГТА, 2009. – Выпуск 9. – С. 125 – 130.

19. Прошина, Р.Д. Математическое описание систем управления в канонической форме пространства состояний / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2009. – № 4. – С. 139 – 140.

20. Прошина, Р.Д. Математическое описание систем управления в нормальной форме пространства состояний / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Проши-

на // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2009. – № 4. – С. 141 – 143.

21. Прошина, Р.Д. Построение математических моделей объектов исследования в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2009. – № 5. – С. 167 – 171.

22. Прошина, Р.Д. Принцип причинности в математических моделях пространства состояний / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Академия профессионального образования. – Санкт-Петербург, 2008. – № 5. – С. 25 – 29.

23. Прошина, Р.Д. Концепция построения лабораторной базы в вузе / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Академия профессионального образования. – Санкт-Петербург, 2006. – № 5. – С. 20 – 25.

24. Прошина, Р.Д. Компьютеризированный учебно-методический комплекс специальности “Автоматизация технологических процессов и производств” / Р.Д. Прошина // Проблемы технического управления в энергетике : Материалы международной конференции. – Пенза, 2005. – С. 42 – 44.

Отчеты по НИР:

25. Математическое моделирование и многокритериальный синтез строительных материалов специального назначения : заключительные отчёты по НИР № 2.1.2/5688, № 2.1.2/11488 “Математическое моделирование и многокритериальный синтез строительных материалов специального назначения” / АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы (2011 г.)”; исп. Прошина Р.Д., рук. Бормотов А.Н. – Пенза : ПГТА, 2010 – 2011. – 278 с. – № ГР 01200951000.

26. Математическое моделирование и многокритериальный синтез наномодифицированных композиционных материалов : отчет по НИР (промежут.) ГК № 14.740.11.1066 от 24.05.2011 г. “Математическое моделирование и многокритериальный синтез наномодифицированных композиционных материалов” / ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 гг.; исп. Прошина Р.Д., рук. Бормотов А.Н. – Пенза : ПГТА, 2011. – 138 с. – № ГР 01202173144.

Прошина Раиса Дмитриевна

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНО-
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ В ВИРТУАЛЬНО-ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

Автореферат

Редактор Л.Ю. Горюнова
Компьютерная верстка Д.Б. Фатеева, Е.В. Рязановой

Сдано в производство 18.11.2011. Формат 60x84 ¹/₁₆
Бумага типогр. №1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Сур.
Усл. печ. л. 1,24. Уч.-изд. л. 1,25. Заказ № 2091. Тираж 100.

Пензенская государственная технологическая академия.
440605, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1^а/11.