

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Список сокращений.....	12
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ НЕПРЕРЫВНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	17
Глава первая. Математические основы расчёта детерминированных, с сосредоточенными параметрами, нелинейных неавтономных моделей динамических систем. Аналитический расчёт выделенного класса математических моделей.....	19
1.1. Детерминированные, с сосредоточенными параметрами, нелинейные неавтономные модели динамических систем. Математический аппарат и процедура расчёта таких моделей.....	19
1.2. Процедура аналитической части аналитически-численного метода. Аналитический расчёт детерминированных, с сосредоточенными параметрами, нелинейных неавтономных математических моделей динамических систем.....	30
1.3. Формулировка условий существования и единственности регулярных составляющих искомых решений уравнений динамики нелинейных неавтономных математических моделей. Формирование верхней оценки абсолютной локальной погрешности расчёта аналитически-численным методом.....	40
1.4. Формирование верхней оценки абсолютной полной погрешности расчёта нелинейных неавтономных математических моделей аналитически-численным методом.....	63
Глава вторая. Проблемно-ориентированные алгоритмы расчёта детерминированных, с сосредоточенными параметрами, нелинейных неавтономных математических моделей динамических систем аналитически-численным методом.....	82
2.1. Алгоритмы расчёта нелинейных неавтономных моделей динамических систем при различных оценочных показателях вычислительных погрешностей.....	82

2.2. Процедуры выбора величины шага расчёта и управления ею как основы выделения и исследования собственных свойств и особенностей динамики нелинейных неавтономных моделей	99
2.3. Алгоритм расчёта нелинейных неавтономных математических моделей при наличии в искомым решениях их уравнений динамики особых точек.....	122
2.4. Алгоритм расчёта стационарных установившихся режимов в нелинейных неавтономных математических моделях	142

Глава третья. Качественный анализ и аналитически-численный расчёт хаотических режимов в детерминированных, с сосредоточенными параметрами, нелинейных неавтономных моделях динамических систем. Новая форма коэффициентов ряда Тейлора.....	158
3.1. Расчёт нерегулярных режимов в нелинейных неавтономных моделях при локальной неустойчивости решений их уравнений динамики.....	158
3.2. Новая форма коэффициентов ряда Тейлора для регулярной составляющей решения уравнения динамики детерминированной, с сосредоточенными параметрами, нелинейной неавтономной модели.....	181
3.3. Анализ нерегулярной динамики нелинейных неавтономных математических моделей с использованием новой формы коэффициентов рядов Тейлора и собственных чисел функциональной матрицы Якоби.....	193

ЧАСТЬ ВТОРАЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО СООТНОШЕНИЮ ВХОД/ВЫХОД	219
---	------------

Глава четвертая. Полиномиальные и регрессионные модели	221
4.1. Аппроксимация нелинейного оператора по соотношению вход/выход динамической системы	221
4.2. Функциональный ряд и полином Вольтерры	224
4.2.1. Описание нелинейной системы во временной области	225
4.2.2. Описание нелинейной системы в p - и z -областях	227
4.2.3. Описание нелинейной системы в частотной области ...	235

4.2.4. Построение полинома Вольтерры во временной области. Моделирование частотного детектора	246
4.2.5. Построение полинома Вольтерры в частотной области. Моделирование фильтра импульсных помех	252
4.3. Многочлен расщепленных сигналов	257
4.3.1. Формы многочлена расщепленных сигналов	258
4.3.2. Моделирование нелинейного компенсатора для цифрового спутникового канала связи	261
4.4. Регрессионные модели	276
4.5. Сравнительный анализ полиномиальных и регрессионных моделей	281

Глава пятая. Нейронные сети как модели нелинейных

динамических систем	284
5.1. Многослойная персептронная сеть	285
5.2. Рекуррентные нейронные сети	289
5.2.1. Глобально рекуррентные сети	290
5.2.1.1. Полносвязная рекуррентная сеть	290
5.2.1.2. Частично рекуррентные сети	292
5.2.1.3. Рекуррентные сети в пространстве состояний	297
5.2.1.4. Клеточные нейронные сети	299
5.2.2. Локально рекуррентные сети	304
5.2.2.1. Сети с динамическими нейронами	305
5.2.2.2. Блочнo-ориентированные сети	310
5.3. Радиально-базисная сеть	313
5.4. Вейвлет-нейронная сеть	317
5.5. Функционально связанная искусственная нейронная сеть	319
5.6. Полиномиальная персептронная сеть	321
5.7. Сплайновая нейронная сеть	323
5.7.1. Сплайновая интерполяционная структура	323
5.7.2. Синтез нейронной сети на базе Катмул–Ром-сплайна	329
5.8. Каноническая кусочно-линейная нейронная сеть	332
5.9. Адаптивная сеть с системой нечеткого вывода.....	335

5.9.1. Иерархические системы нечеткого логического вывода	335
5.9.2. ANFIS-сеть с моделью Такаги – Сугено	338
5.9.3. Модель Мамдани как простейшая форма модели Такаги – Сугено	343
5.10. Сравнительный анализ нейронных моделей	344
Глава шестая. Нелинейные модели компенсаторов	350
6.1. Подавление нелинейных искажений сигналов в усилителях мощности	351
6.1.1. Методы линеаризации характеристик усилителей мощности	351
6.1.1.1. Система усиления с отрицательной обратной связью	352
6.1.1.2. Система усиления с прямой связью	356
6.1.1.3. Система усиления с предыскажением	357
6.1.1.4. Выделение огибающей и ее восстановление ..	359
6.1.1.5. Усилитель Догерти	360
6.1.1.6. Линейное усиление с использованием нелинейных компонент	361
6.1.1.7. Комбинированный аналоговый универсальный модулятор с замкнутой обратной связью	362
6.1.1.8. Сравнительный анализ систем усиления	363
6.1.2. Полиномиальные модели предкомпенсаторов	364
6.1.3. Синтез адаптивных предкомпенсаторов для линеаризации модели Винера – Гаммерштейна усилителя мощности	376
6.2. Подавление низкочастотных помех, проникающих во внутренний объем электронных устройств	384
6.2.1. Нелинейная модель в форме ряда Вольтерры – Пикара	384
6.2.2. Синтез нелинейных компенсаторов на основе ВП-ряда	386
6.2.3. Синтез нелинейных компенсаторов на основе полинома Вольтерры	401
Список литературы	407

Есть много в небесах и на земле такого,
Что нашей мудрости, Гораций, и не снилось.

В. Шекспир (перевод К. Р.)

ВВЕДЕНИЕ

Метод математического моделирования – наиболее мощный из современных методов исследования окружающего нас мира. Замещая реальные объекты и явления их математическими моделями, мы приобретаем возможность получения подробной и наглядной информации о существовании внутренних и внешних взаимосвязей моделируемого объекта, его качественных характеристиках и количественных показателях. Работа с математической моделью снижает материальные и трудовые затраты, позволяет оперативно и безопасно исследовать критические и аварийные режимы функционирования моделируемой системы, а также её гипотетические состояния, недоступные для реального воспроизведения и наблюдения. Вследствие этого «математическое моделирование – это не частный технократический рецепт, касающийся узкого круга специалистов, а универсальная методология, основной инструмент математизации научно-технического прогресса» [1.48]. Добавим, что сейчас это определение распространяется на весь окружающий нас мир.

Задача построения хорошей модели исследуемого объекта или явления чрезвычайно сложна и многогранна, ибо «создание удачной новой модели – всегда крупное достижение соответствующей науки, а иногда и целый этап в её развитии» [1.48]. Построение достаточно точной математической модели связано с необходимостью учёта и правильного описания всех существенных свойств и особенностей моделируемой системы. Заметим, однако, что любая, сколь угодно тщательно сформированная модель заведомо неадекватна реальной системе в силу ограниченности наших знаний о моделируемой системе и способах её описания. Кроме того, учитывая в полном объёме доступную информацию о процессах, протекающих в системе, и о её внутренних и внешних взаимосвязях, исследователь может построить хорошую, информационно ёмкую модель, но имеющую сложное ма-

тематическое описание. Излишняя сложность этого описания, быть может, приведёт к тому, что, несмотря на высокую степень адекватности реальной системе, построенная модель окажется ненужной, так как её последующее использование невозможно из-за отсутствия подходящих математических методов. По этой причине, формируя модель, исследователь всегда сталкивается с необходимостью разрешения противоречия между бесконечной сложностью реальной системы и желаемой относительной простотой её математического описания, диктуемой возможностью последующего расчёта полученной модели с помощью существующих вычислительных алгоритмов. Вследствие этого модель – всегда компромисс, результатом которого является ограничение многообразия собственных свойств и особенностей моделируемой системы и упрощение их до уровня, определяемого возможностью существующих методов исследования моделей выделенного класса. Такое ограничение и упрощение не должно быть, конечно, ниже некоторого предельно допустимого уровня, обеспечивающего построение модели, удовлетворяющей решению поставленной задачи.

Следует отметить, что о собственных свойствах многих объектов и систем накоплены значительные знания, и сейчас несовершенство известных вычислительных алгоритмов стало основным «фактором, сдерживающим широкое использование математических моделей в науке» [1.48].

Разработанные авторами и описанные далее методы математического моделирования и расчёта динамических систем существенно увеличили наши возможности, позволив расширить их с использованием значительно более сложных моделей.

В первой части книги описан разработанный авторами метод расчёта непрерывных, нелинейных, детерминированных, с сосредоточенными параметрами неавтономных моделей динамических систем, названный ими аналитически-численным [1.12–1.16].

Характеристика метода такова: самостартующий; непрерывный; одношаговый; переменного порядка; с адаптивной процедурой выбора шага; с процедурой оценки и контроля в заданном интервале времени модулей предельных локальной и полной погрешностей расчёта для моделей выделенного класса с сосредоточенными параметрами.

Метод предназначен для анализа и параметрического синтеза непрерывных, нелинейных, детерминированных неавтономных, с сосредоточенными или распределёнными параметрами моделей динамических систем. Метод даёт ответы на следующие основные вопросы:

- какую необходимую и достаточную сложность математического описания модели динамической системы требует специфика выполняемых исследований и допускает выбранный для этих исследований математический аппарат;
- в каком классе функций нужно искать решения уравнений динамики сформированной модели;
- какая форма математического описания искомых решений целесообразна и предпочтительна;
- каким образом в заданном временном интервале исследовать существование и единственность искомого решения уравнения динамики модели, а также выяснить возможность его получения с помощью выбранного математического аппарата;
- как в заданном интервале исследования выявить все разрывы первого и второго рода в искомых решениях;
- каким образом при единожды заданных предначальных условиях организовать прохождение всех выявленных разрывов второго рода;
- как для моделей с сосредоточенными параметрами оценить локальные и полные погрешности расчёта приближённых значений искомых решений и построить границы областей, содержащих их неизвестные точные значения;
- каким образом сформировать процедуру выбора и изменения длины шага расчёта, учитывающую качественные особенности и характерные свойства динамики модели;
- как установить необходимое соответствие между условиями согласованности, сходимости и численной устойчивости метода;
- каким образом в рамках одного математического аппарата организовать процедуру решения прямой (анализ) и обратной (синтез) задач динамики сформированной модели;
- как оценить асимптотические свойства моделей выделенного класса;

- каким образом найти параметры колебательных режимов в таких моделях, а также исследовать регулярность и устойчивость этих режимов;
- как сформировать процедуру исследования нерегулярной динамики моделей.

В процессе разработки и совершенствования аналитическо-численного метода найдено, что математические модели имеют собственное внутреннее содержание, неразрывно связанное с параметрами и внешними условиями моделируемой динамической модели. Примером может служить обнаруженное при исследовании математических моделей ранее неизвестное построение коэффициентов ряда Тейлора, т. е. производных в точке разложения, в виде конечной суммы членов. Каждый член этой суммы является одновременно причиной и следствием объективно существующей взаимосвязи всех её частей, определяющей нелинейную динамику. Это позволяет ввести понятие «нестационарного расщепления производных». Расщепление выполняется определенным образом и составляющие его члены явно зависят от параметров и внешних условий моделируемой динамической системы.

Во второй части книги рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с математическим описанием динамических систем по соотношению вход/выход. Предполагается, что отображение множества входных во множество выходных сигналов системы выполняет нелинейный оператор. Задача моделирования динамической системы формулируется как задача аппроксимации нелинейного оператора с заданной точностью, в результате решения которой находятя параметры математической модели. При таком подходе объект исследования представляется как «чёрный» или «серый ящик». Применение данного подхода обусловлено ситуациями, когда математическую модель на компонентном уровне создать невозможно из-за отсутствия или неполноты информации о физических принципах работы системы, а также когда система столь сложна, что работа с моделью на компонентном уровне затруднительна.

Рассмотрены следующие математические модели нелинейных операторов динамических систем:

- функциональный ряд и полином Вольтерры;
- многочлены расщепленных сигналов;
- регрессионные модели;

– разные структуры нейронных сетей, выступающие в роли аппроксиматоров.

Отмечены достоинства и недостатки указанных моделей, представлены результаты их сравнительного анализа.

Сферы применения упомянутых форм моделей обширны: идентификация, синтез, фильтрация, компенсация, сжатие информации, распознавание образов, предсказание и т. д.

В монографии изложены примеры моделирования частотных детекторов, фильтров импульсного шума, нелинейных компенсаторов для цифровых спутниковых каналов связи. Кроме того, рассмотрен синтез полиномиальных моделей нелинейных компенсаторов для решения следующих задач:

– линейаризации характеристик усилителей мощности с высоким коэффициентом полезного действия, входящих в состав электрических, радиотехнических, телекоммуникационных систем;

– защиты электронных устройств от низкочастотных помех, порождаемых демодуляцией высокочастотного колебания внешнего электромагнитного поля. Источник демодуляции – нелинейные эффекты в сложных электронных системах.

Первая часть написана Ю.А. Бычковым и С.В. Щербаковым.

Вторая часть написана Е.Б. Соловьевой.

Обе части книги объединяет задача математического моделирования динамических систем. Каждая из частей книги отражает специфику решения данной задачи с использованием нелинейных, непрерывных и дискретных моделей.

Взаимных ссылок из одной части книги в другую нет. Нумерация глав сквозная; формул, рисунков, таблиц, примеров и литературы по частям; параграфов по главам.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АМ/АМ – амплитудная модуляция / амплитудная модуляция

АМ/ФМ – амплитудная модуляция / фазовая модуляция

БКС – блок комплексного сопряжения

ВП-ряд – ряд Вольтерры – Пикара

ДПФ – дискретное преобразование Фурье

КИХ-фильтр – фильтр с конечной импульсной характеристикой

КПД – коэффициент полезного действия

КС – канал связи

НБП – нелинейный безынерционный преобразователь

НДС – нелинейная динамическая система

НК – нелинейный компенсатор

ОДПФ – обратное дискретное преобразование Фурье

ОС – обратная связь

Р – расщепитель

СБИС – сверхбольшая интегральная схема

ANFIS – Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System (система нечеткого вывода, основанная на адаптивной сети)

AR-структура – AutoRegressive structure (авторегрессионная структура)

ARMA-структура – AutoRegressive Moving Average structure (авторегрессионная структура со скользящим средним)

ARMAX-структура – AutoRegressive Moving Average with eXogenous input structure (авторегрессионная структура со скользящим средним при внешнем воздействии)

ARX-структура – AutoRegressive with eXogenous input structure (авторегрессионная структура при внешнем воздействии)

В-сплайн – базисный сплайн

BJ-структура – Box-Jenkins structure (структура Бокса – Дженкинса)

CALLUM – Combined Analogue Locked Loop Universal Modulator (комбинированный аналоговый универсальный модулятор с замкнутой обратной связью)

CFLANN – Chebyshev Functional Link Artificial Neural Network (функционально связанная искусственная нейронная сеть Чебышева)

CNN – Cellular Neural Network (клеточная нейронная сеть)

CPWLN – Canonical PieceWise-Linear Network (каноническая кусочно-линейная сеть)

CR-сплайн – Catmul–Rom spline (Катмул–Ром-сплайн)

DDRBVS – Dynamic Deviation Reduction-Based Volterra Series (усеченный ряд Вольтерры с многомерной динамикой)

DDVM – Dynamic Deviation Volterra Model (многочлен с многомерной девиацией динамики)

DPD – Digital PreDistorter (цифровой предкомпенсатор, предыскажитель)

DTCNN – Discrete-Time Cellular Neural Network (дискретная клеточная сеть)

EER – Envelope Elimination and Restoration (выделение огибающей и ее восстановление)

FIR-структура – Finite Impulse Response structure (структура с конечной импульсной характеристикой)

FLANN – Functional Link Artificial Neural Network (функционально связанная искусственная нейронная сеть)

GSM-сигнал – сигнал глобальной системы для мобильной связи (Global System for Mobile communications)

GMP – Generalized Memory Polynomial (обобщенный полином с памятью)

LINC – LInear amplification using Nonlinear Components (линейное усиление с использованием нелинейных компонент)

MA-структура – Moving Average structure (структура со скользящим средним)

MLPN – MultiLayer Perceptron Network (многослойная перцептронная сеть)

MP – Memory Polynomial (полином с памятью)

NAR-структура – Nonlinear AutoRegressive structure (нелинейная авторегрессионная структура)

NARMA-структура – Nonlinear AutoRegressive Moving Average structure (нелинейная авторегрессионная структура со скользящим средним)

NARMAX-структура – Nonlinear AutoRegressive Moving Average with eXogenous input structure (нелинейная авторегрессионная структура со скользящим средним при внешнем воздействии)

NARX-структура – Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input structure (нелинейная авторегрессионная структура при внешнем воздействии)

NBJ-структура – Nonlinear Box–Jenkins structure (нелинейная структура Бокса – Дженкинса)

NFIR-структура – Nonlinear Finite Impulse Response structure (нелинейная структура с конечной импульсной характеристикой)

NMA-структура – Nonlinear Moving Average structure (нелинейная структура со скользящим средним)

NMSE – Normalized Mean-Square Error (нормированная средне-квадратичная погрешность)

NOE-структура – Nonlinear Output Error structure (нелинейная структура с выходной ошибкой)

NRBFN – Normalized Radial-Basis Function Network (нормированная радиально-базисная сеть)

OE-структура – Output Error structure (структура с выходной ошибкой)

PA – Power Amplifier (усилитель мощности)

PPN – Polynomial Perceptron Network (полиномиальная перцептронная сеть)

PSD – Power Spectral Density (спектральная плотность мощности)

QAM – Quadrature Amplitude Modulation (квадратурная амплитудная модуляция)

RBFN – Radial-Basis Function Network (радиально-базисная сеть)

RCPWLN – Recurrent Canonical PieceWise-Linear Network (рекуррентная каноническая кусочно-линейная сеть)

RMLPN – Recurrent MultiLayer Perceptron Network (рекуррентная многослойная перцептронная сеть)

RPVM – Radially Pruned Volterra Model (радиально ограниченная модель Вольтерры)

RNN – Recurrent Neural Network (рекуррентная нейронная сеть)

RTRN – Real Time Recurrent Network (рекуррентная сеть реально-го времени)

Spline NN – Spline Neural Network (сплайновая нейронная сеть)

SRPVM – Simplified Radially Pruned Volterra Model (упрощенная радиально ограниченная модель Вольтерры)

Wavelet NN – Wavelet Neural Network (вейвлет-нейронная сеть)

1-D_DDVM – One-Dimensional Dynamic Deviation Volterra Model (DDVM с нулевой и одномерной девиациями динамики)

1-D_SDDVM – One-Dimensional Simplified Dynamic Deviation Volterra Model (упрощенная модель Вольтерры с одномерной девиацией динамики).

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru