

ББК 32.965.5я73

Б 95

Бычков Ю. А., Соловьева Е. Б., Щербаков С. В.

Б 95 Непрерывные и дискретные нелинейные модели динамических систем: Монография. — СПб.: Издательство «Лань», 2021. — 420 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-3348-3

Научно-практическое пособие по расчёту динамики нелинейных непрерывных и дискретных математических моделей динамических систем. Книга состоит из двух частей. В первой части описан аналитически-численный метод анализа нелинейных непрерывных детерминированных математических моделей динамических систем любой природы. Во второй части рассмотрены математические модели, выступающие в роли аппроксиматоров нелинейных операторов динамических систем: многомерные полиномы, регрессионные модели, различные структуры нейронных сетей. Приведены примеры синтеза моделей частотных детекторов, нелинейных фильтров и компенсаторов.

Монография предназначена для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки магистров «Информатика и вычислительная техника», «Информационные системы и технологии», «Радиотехника», «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Приборостроение», «Биотехнические системы и технологии», «Системный анализ и управление», «Управление в технических системах» и аспирантов «Электроника, радиотехника и системы связи», «Управление в технических системах».

ББК 32.965.5я73

Книга издаётся в авторской редакции

Обложка
Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2021
© Коллектив авторов, 2021
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2021

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 искомого решения 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

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 перцептронная 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 перцептронная 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 предсказанием	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. Замечая реальные объекты и явления их математическими моделями, мы приобретаем возможность получения подробной и наглядной информации о существе 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-