

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Предложен метод идентификации нелинейного динамического измерительного преобразователя с помощью нейросетевой модели на базе многослойного персептрона, дополненного линиями задержек входных сигналов. Исследованы свойства предложенной модели путем имитационного моделирования на ЭВМ с использованием различных видов калибровочных сигналов для процедуры обучения искусственной нейронной сети.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, многослойный персептрон, обучение, идентификация.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современных методов обработки сигналов, которое позволяет повысить точность измерений и реализовать достаточно сложные алгоритмы измерительных процедур, является применение искусственных нейронных сетей [1-5]. Разработка динамических моделей измерительных систем на базе искусственных нейронных сетей и алгоритмов обработки данных динамических измерений с использованием нейросетевых технологий является одним из актуальных путей развития процесса интеллектуализации современной измерительной техники. Успешное решение данной задачи позволит значительно улучшить метрологические характеристики и эффективность существующих нелинейных динамических измерительных преобразователей без значительных материальных затрат за счет математической обработки результатов измерений. Внедрение таких динамических моделей и алгоритмов, а также их прикладного программного обеспечения позволит создавать интеллектуальные измерительные преобразователи и системы со способностью к индивидуализации своих динамических параметров под внешние влияющие факторы и условия проведения измерений.

Постановка задачи

В практике измерений довольно часто приходится иметь дело с динамическими измерительными преобразователями, обладающими существенно нелинейными характеристиками. Для исследования поведения и анализа таких объектов необходимо иметь соответствующую математическую модель. Теоретический анализ позволяет получить математическое описание в

виде дифференциальных уравнений. При экспериментальном анализе на основе наблюдений получают параметрическую либо непараметрическую модель. Наиболее широкое распространение получили параметрические модели, требующие решения задач структурной и параметрической идентификации и имеющие ограниченное число параметров.

Рассмотрим задачу идентификации нелинейного динамического измерительного преобразователя, в общем случае описываемого нелинейным авторегрессионным уравнением (NARX-модель)

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-m)) + \xi(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – выходной сигнал, $x(t)$ – входной сигнал, $\xi(t)$ – приведенная к выходу аддитивная случайная помеха, описывающая влияние внутренних и внешних возмущающих факторов, $t = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время.

Суть ее заключается в оценивании функции f по результатам измерений входных $x(t)$ и выходных $y(t)$ переменных. Для решения данной задачи предлагается использовать модель нелинейного измерительного преобразователя в виде динамической искусственной нейронной сети на базе многослойного персептрона с линиями задержек входных сигналов [6,7]. Структурная схема процедуры обучения предлагаемой нейросетевой модели приведена на рис. 1.

В качестве обучающей выборки для настройки синаптических весов искусственной нейронной сети используются временные последовательности входного и выходного сигнала нелинейного динамического измерительного преобразователя.

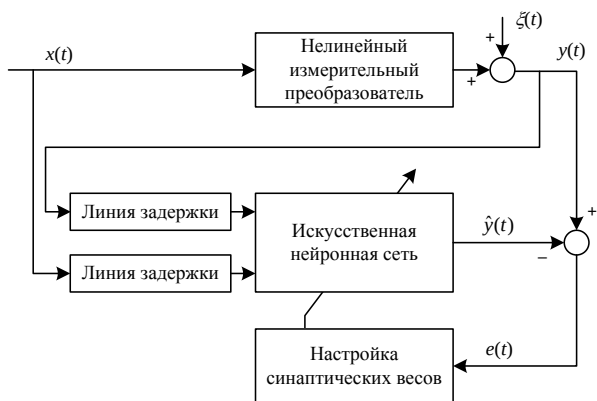


Рисунок 1 – Структурная схема процедуры обучения нейронной сети для идентификации нелинейных динамических объектов

Сигнал ошибки $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$, полученный при сравнении выходных сигналов объекта идентификации и модели, используется для настройки синаптических весовых коэффициентов нейросети таким образом, чтобы выходной сигнал модели $\hat{y}(t)$ являлся наилучшим приближением выходного сигнала объекта $y(t)$. Критери-

ем оптимальности при этом является обеспечение минимума целевой функции

$$J(t) = \frac{1}{2} e^2(t) = \frac{1}{2} (y(t) - \hat{y}(t))^2. \quad (2)$$

Нейросетевая модель нелинейного динамического измерительного преобразователя

Обобщенная структура модели нелинейного динамического объекта, описываемого уравнением (1), представлена на рис. 2.

Уравнение модели имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) &= f^q \left[(w^q)^T f^{q-1} \left[(w^{q-1})^T f^{q-2} \left[\dots \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. f^1 \left[(w^1)^T \tilde{x}(t) \right] \right] \right] \right] \\ \tilde{x}(t) &= (y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), \\ &\quad x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-m)), \end{aligned} \quad (3)$$

где q – количество слоев в сети, w^i – вектор весовых параметров нейронов i -го слоя сети, f^i – функция активации i -го слоя.

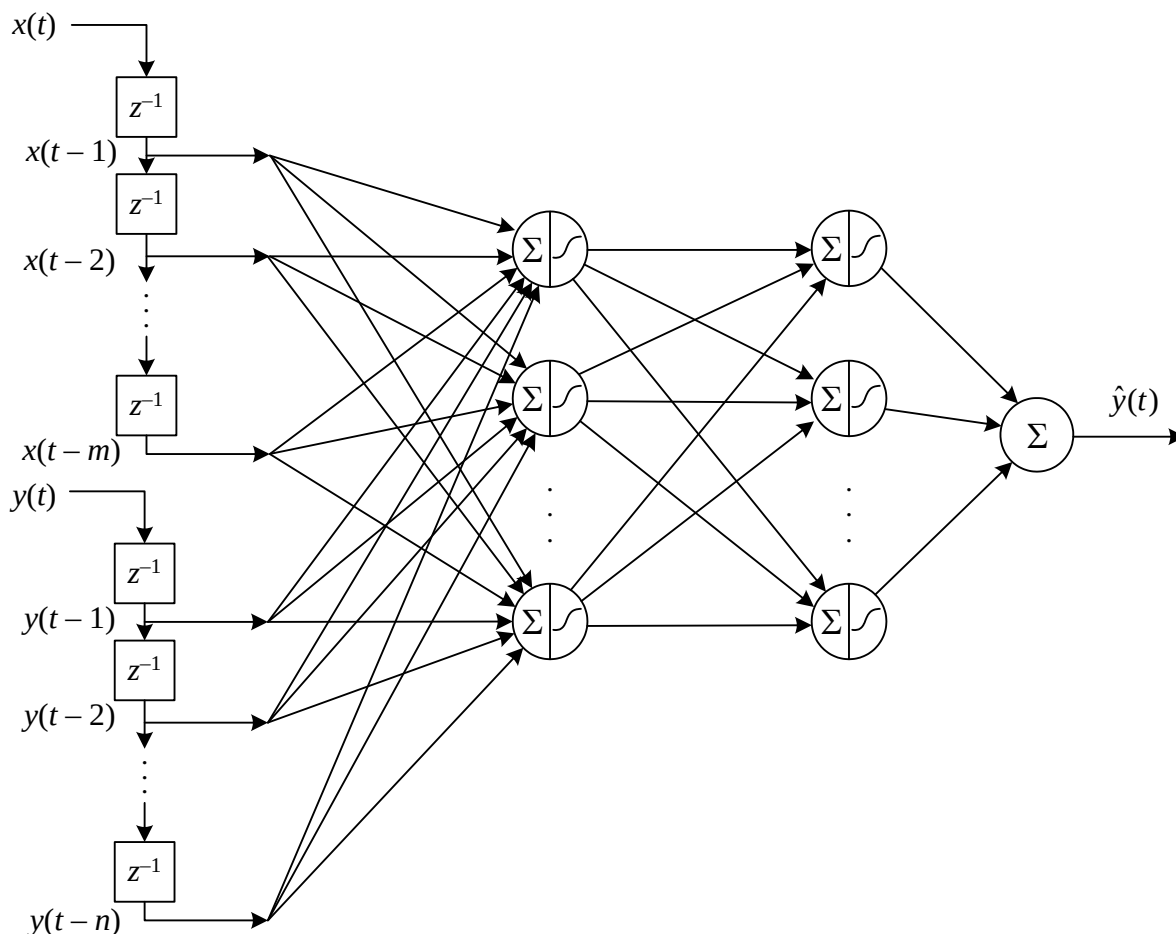


Рисунок 2 – Структура модели нелинейного динамического объекта

Алгоритм обучения нейросети будет состоять из таких шагов:

1) присвоить синаптическим весам нейронов случайные начальные значения;

2) подать на вход нейросети очередной образец обучающей выборки $\langle x(t), y(t) \rangle$;

3) рассчитать выходной сигнал $\hat{y}(t)$ и ошибку $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$;

4) скорректировать синаптические весовые коэффициенты нейронов с помощью процедуры обратного распространения ошибки [7,8];

5) повторить шаги 2–4 до тех пор, пока значение целевой функции (2) не станет достаточно малым. После этого обучение завершается.

Особенностью предлагаемой нейросетевой модели является то, что в процессе обучения используется последовательно-параллельная архитектура (рис. 3, а), которая затем преобразуется в параллельную архитектуру (рис. 3, б).

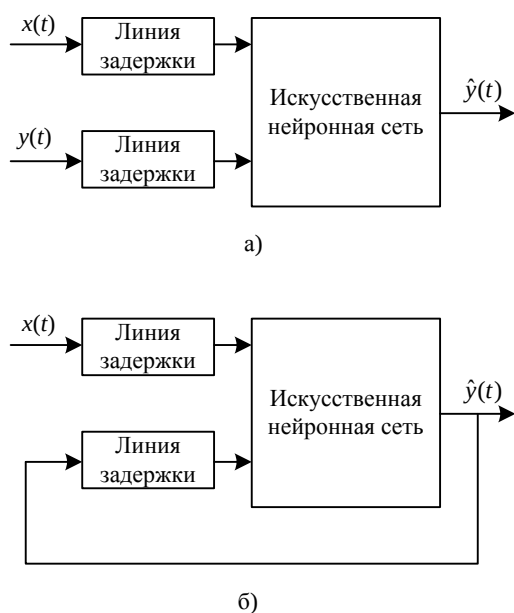


Рисунок 3 – Изменение архитектуры модели

Объясняется это тем, что процедура настройки синаптических весов искусственной нейронной сети происходит быстрее и эффективнее, если в качестве компонентов вектора входных сигналов модели в процессе обучения используются значения выходного сигнала объекта идентификации. После того, как модель обучится и будет достаточно точно отрабатывать поведение объекта, необходимо перейти к архитектуре с обратной связью, чтобы иметь возможность использовать полученную модель в автономном режиме.

Экспериментальные исследования

Для исследования предложенной в работе нейросетевой модели нелинейного динамического измерительного преобразователя осуществлялось имитационное моделирование на ЭВМ. В качестве нейросети использовался трехслойный персептрон, на выходе которого стоял сумматор, а скрытый слой был образован тремя нейронами с сигмоидальными функциями активации (рис. 4). Настройка синаптических весов производилась с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта, обладающего более высоким быстродействием по сравнению с методом градиентного спуска.

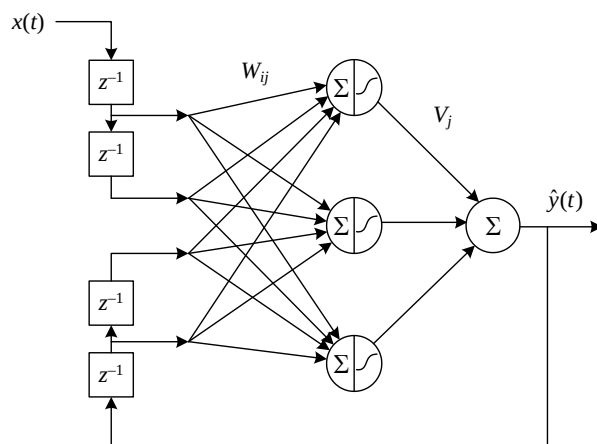


Рисунок 4 – Динамическая нейросетевая модель

Нелинейный преобразователь был образован последовательным соединением нелинейного статического и линейного динамического объектов, описываемых уравнениями

$$\begin{aligned} x_n(t) &= 5e^{-0,5x(t)}, \\ y(t) &= y(t-1) - 0,5y(t-2) + \\ &+ 0,3x_n(t-1) - 0,18x_n(t-2). \end{aligned}$$

Обучающая выборка для тренировки сети формировалась путем подачи на вход объекта идентификации калибровочных сигналов различного вида (случайный белый шум, синусоидальный, сумма двух синусоидальных сигналов с разными частотами, периодические последовательности прямоугольных и треугольных импульсов, частотно-модулированный сигнал с линейным законом изменения частоты) и регистрации соответствующих выходных сигналов. Результаты моделирования представлены в табл. 1 и на рис. 5-7.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Вид входного сигнала	Среднеквадратическое значение ошибки
Случайный сигнал	0,001919
Прямоугольные импульсы	0,008057
Треугольные импульсы	0,0098219
Синусоидальный сигнал	0,0029502
Сумма синусоид	0,011562
Частотно-модулированный сигнал	0,0052372

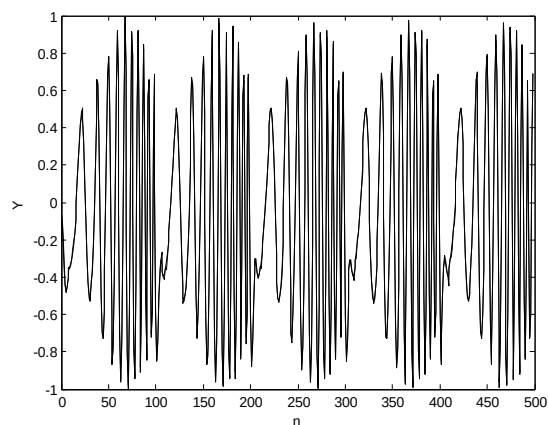


Рисунок 7 – Выходные сигналы объекта и модели при входном ЛЧМ-сигнале

Выводы

Полученные результаты подтверждают работоспособность предлагаемой нейросетевой модели и полностью согласуются с теоретическими выкладками, что открывает широкие возможности использования нейросетевых архитектур для решения задач моделирования нелинейных динамических средств измерений. Преимуществом таких моделей является инвариантность к виду нелинейности объекта моделирования и возможность синтезировать их через обучение, не привлекая сложные методики проектирования.

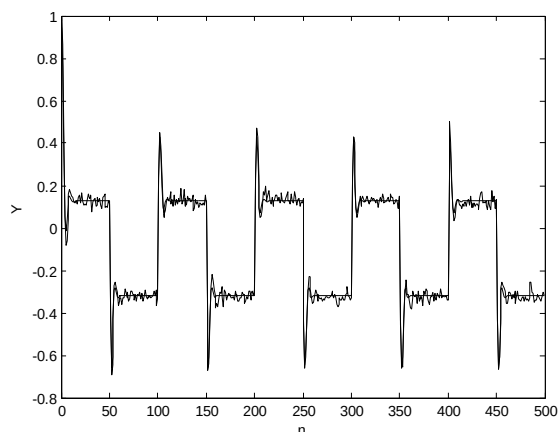


Рисунок 5 – Выходные сигналы объекта и модели при входном сигнале в виде последовательности прямоугольных импульсов

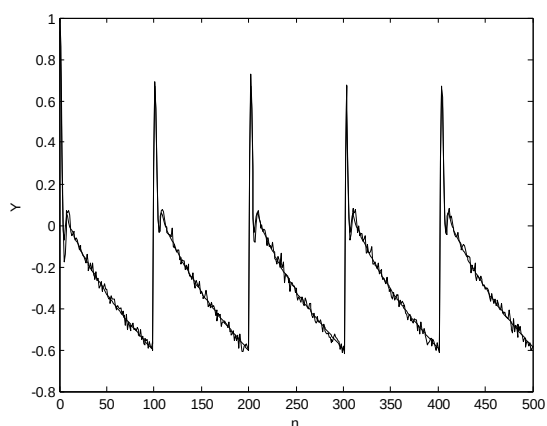


Рисунок 6 – Выходные сигналы объекта и модели при входном сигнале в виде последовательности треугольных импульсов

Список использованных источников

1. Wasserman, P. D. Neural Computing: Theory and Practice [Text] / P. D. Wasserman. – N.Y. : Van Nostrand Reinhold, 1989. – 230 p.
2. Khrobostov, D. A. Sensor Calibration with Artificial Neural Network [Text]/ D. A. Khrobostov, G. F. Filaretov // 45th International Scientific Colloquium. – Ilmenau, 2000. – Additional Issue. P.2-7.
3. Киселев, С. К. Использование искусственных нейронных сетей для автоматизации поверки измерительных приборов [Текст] / С. К. Киселев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 1. – С. 52-55.
4. Голыгин, Н. Х. Возможности повышения точности геодезических измерений на основе искусственных нейросетей [Текст] / Н. Х. Голыгин, О. Б. Хиноева, Х. К. Ямбаев // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – №5. – С. 17-27.
5. Водотыка, С. В. Использование искусственных нейронных сетей при построении калибровочной зависимости средства измерения

[Текст] / С. В. Водотыка // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 1 (91). – С. 24-28.

6. Усков А. А. Гибридные нейросетевые методы моделирования сложных объектов [Текст] : Монография / А. А. Усков, С. А. Котельников, Е. М. Грубник, В. М. Лаврушин. – Смоленск: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ "Российский университет кооперации", 2011. – 132 с.

7. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектура, обучение, приме-

нения [Текст] / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков : ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 369 с.

8. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс [Текст] : 2-е изд., испр., пер. с англ. – М. : ООО «ИД Вильямс», 2006. – 1104 с.

Поступила в редакцию 10.05.2013

Рецензент: д.т.н., проф. Руженцев И.В., Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

О.В. Дегтярьов, к.т.н., О.В. Запорожець, к.т.н., Т.О. Овчарова

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Запропоновано метод ідентифікації нелінійного динамічного вимірювального перетворювача за допомогою нейромережевої моделі на базі багатошарового персептрона, доповненого лініями затримки вхідних сигналів. Досліджено властивості запропонованої моделі шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ з використанням різних видів калібрувальних сигналів для процедури навчання штучної нейронної мережі.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, багатошаровий персептрон, навчання, ідентифікація.

A.V. Degtyarev, PhD, O.V. Zaporozhets, PhD, T.A. Ovcharova

IDENTIFICATION OF NONLINEAR DYNAMIC MEASURING DEVICES WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

The technique for identification of nonlinear dynamic measuring converter with neural network model based on multi-layer perceptron added time-delay input signals is proposed. The properties of the proposed model with various calibration signals for artificial neural network learning is researched by the computer simulation.

Keywords: artificial neural network, multi-layer perceptron, learning, identification.

Сведения о соавторах

Дегтярев Александр Валентинович

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры метрологии и измерительной техники. Раб. телефон (057) 702-13-31, моб. телефон +38 097 26 17 411, e-mail: alya-degtyar@yandex.ru

Запорожец Олег Васильевич

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и измерительной техники. Раб. телефон (057) 702-13-31, моб. телефон +38 068 606 94 81, e-mail: oleg_zaporozhets@rambler.ru

Овчарова Татьяна Александровна

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, аспирант кафедры метрологии и измерительной техники. Раб. телефон (057) 702-13-31, моб. телефон +38 050 708 63 19, e-mail: tanya140488@mail.ru