

УДК 536.531:004.855.5

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ АПРОКСИМАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ПОБУДОВІ ГРАДУЮВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВТ

Асп. І.С. Зубрецька<sup>1</sup>

Науковий керівник проф. С.С. Федін<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

<sup>2</sup>Національний транспортний університет

**Мета роботи** – класифікація методів апроксимації експериментальних даних та дослідження точності моделей для побудови градуювальних характеристик (ГХ) засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).

**Об'єкт дослідження** – процес апроксимації ГХ ЗВТ.

**Предмет дослідження** – параметричні та непараметричні методи апроксимації експериментальних даних при побудові градуювальних характеристик ЗВТ.

**Методи та засоби дослідження.** Теоретичні дослідження засновані на основних положеннях теоретичної метрології, термометрії, математичної статистики та системного аналізу, експериментальні дослідження проводились з використанням математичного моделювання в системі MathCAD та статистичної обробки експериментальних даних в системі STATISTICA.

**Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.** Запропоновано класифікацію параметричних та непараметричних методів апроксимації експериментальних даних при побудові ГХ ЗВТ для їх обґрунтованого вибору та застосування в процесі градуювання напівпровідникових терморезистивних перетворювачів температури з негативним температурним коефіцієнтом. Запропоновано формалізацію задачі апроксимації  $R/T$ -характеристики НТС-термісторів на основі методів інтелектуального аналізу експериментальних даних – штучних нейронних мереж і нечітких множин.

**Результати дослідження.** Аналіз класифікаційних ознак ГХ контактних датчиків температури, до яких, зокрема належать термометри опору, термопари і напівпровідникові НТС-термістори, свідчить, що актуальним завданням сучасної теоретичної та прикладної метрології є підвищення точності апроксимації експериментальних даних при градуюванні нелінійних первинних вимірювальних перетворювачів і зменшення систематичної складової похибки вимірювання фізичної величини [1, 2]. Виконано дослідження методів апроксимації експериментальних даних при побудові ГХ ЗВТ та на прикладі напівпровідникових терморезистивних перетворювачів температури з негативним температурним коефіцієнтом опору встановлено, що для параметричної компенсації нелінійності їх статичної  $R/T$ -характеристики достатнім є використання поліноміальної моделі 4-го порядку [3].

Сформульовано та науково підтверджено припущення про те, що підвищення точності побудови ГХ НТС-термісторів в робочому діапазоні температур можна здійснити на основі використання методів інтелектуального аналізу експериментальних даних, зокрема непараметричних методів нейромережного і нечіткого моделювання. Розроблено нейромережні моделі типу перцептрон та моделі на основі кусково-лінійних нечітких функцій належності для апроксимації нелінійної функції перетворення НТС-термісторів та показано, що їх використання дозволяє забезпечити більш високу точність апроксимації  $R/T$ -характеристики НТС-термісторів у робочому діапазоні температур у порівнянні з поліноміальною моделлю Стейнхарта-Харта [4, 5].

У результаті експериментальних досліджень розроблено методику проведення випробувань і автоматичного збору вимірювальної інформації по величинам електричного опору NTC-термісторів і температури. Практичне застосування розробленої методики дозволило створити базу даних вимірювальної інформації для побудови індивідуальних ГХ NTC-термісторів Agilent T10 До і TDK B57861S в робочих діапазонах температур  $-70 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $-55 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно [6].

Результати оцінювання точності нейромережної апроксимації експериментальних даних на основі статистичних критеріїв MAD (Mean Absolute Derivation), MSE (Mean Squared Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error) і MPE (Mean Percentage Error) дозволили підтвердити висунуте припущення щодо підвищення точності побудови ГХ NTC-термісторів у робочому діапазоні температур із застосуванням адаптивних моделей RBF-мереж, розроблених в модулі нейромережного моделювання Neural Networks системи STATISTICA 6.1 [7].

**Висновки.** Запропоновано класифікацію методів апроксимації експериментальних даних при побудові ГХ ЗВТ. Досліджено властивості поліноміальних моделей різних ступенів та моделей на основі нейронних мереж і нечіткої логіки для побудови ГХ напівпровідникових терморезистивних перетворювачів з негативним температурним коефіцієнтом. Встановлено, що похибка апроксимації ГХ термісторів на основі RBF-мереж не менш ніж в півтора рази менша ніж допустима похибка полиноміальної моделі 3-го порядку, яка використовується в програмному забезпеченні сучасних систем збору і обробки вимірювальної інформації.

**Ключові слова.** градувальна характеристика, NTC-термістор, робочий діапазон температур, функція перетворення, нейромережна апроксимація, RBF-мережа.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерения. М.: Изд-во стандартов, 1986. 128 с.
2. Беляев А.О. Разработка и исследование моделей элементов и устройств сбора и обработки сигналов терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Беляев А.О. Таганрог, 2012. 20 с.
3. Федін С. С., Салівон О. В., Зубрецька І. С. Параметрична компенсація нелінійності температурної залежності NTC-термісторів // Метрологія та прилади. 2016. №2(58). С.41–46.
4. Федін С. С., Зубрецька І. С. Обеспечение точности аппроксимации R/T-характеристики NTC-термистора на основе нейросетевого моделирования // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2015. №4. С.28–35.
5. Федін С. С., Зубрецька Н. А., Зубрецька І. С. Моделирование статических характеристик датчиков температуры на основе нечеткой логики // Системи обробки інформації. 2015. №4(129). С.75–79.
6. Кошелева О. Б., Зубрецька І. С., Федін С. С. Разработка методики сбора измерительной информации для градуировки полупроводниковых терморезистивных преобразователей температуры // Системи обробки інформації. 2015. №10(135). С.44–47.
7. Федін С. С., Зубрецька І. С., Поликарпов А. А. Обеспечение точности построения градуировочных характеристик NTC-термисторов на основе нейронных сетей с радиальными базисными функциями // Метрологія та прилади. 2017. №1(63). С.37–46.