

## КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕРМОРЕЗИСТОРА С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

*Предложен метод коррекции функции преобразования полупроводникового терморезистора с использованием компенсатора нелинейности на базе трехслойного персептрона. С помощью имитационного моделирования на ЭВМ исследована работоспособность предложенного метода, проведен сравнительный анализ с полиномиальными компенсаторами нелинейности.*

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, персептрон, обучение, компенсация нелинейности.

### 1. Постановка задачи

В практике температурных измерений достаточно часто используются такие первичные измерительные преобразователи, как полупроводниковые терморезисторы или термисторы. Они широко применяются в различных измерительных схемах, температурных реле, системах климат-контроля, тепловых счетчиках. К достоинствам этих датчиков следует отнести большой диапазон измерения температуры, вибропрочность, компактность, малую инерционность и высокую чувствительность. В широком диапазоне температур зависимость сопротивления полупроводника  $R_{\text{пн}}$  от температуры  $t$  имеет сложный нелинейный характер, поэтому невозможно выразить зависимость  $R_{\text{пн}}(t)$  простой формулой, которая бы позволила выполнить градуировку с высокой точностью. Как правило, весь интервал температуры разбивают на отдельные участки, на которых зависимость  $R_{\text{пн}}(t)$  описывается своей интерполяционной формулой.

Для уменьшения погрешности измерения температуры нелинейную функцию преобразования терморезистора приводят к линейному виду путем замены переменных с последующим определением параметров этой функции по методу наименьших квадратов [1]. Но в этом случае необходимо иметь априорную информацию о виде этой нелинейной функции или, другими словами, знать структуру математической модели средства измерения. Обоснованный выбор общего вида нелинейной зависимости является достаточно сложной задачей, которая плохо поддается формализации.

Универсальным методом уменьшения влияния нелинейности функции преобразования на погрешность результата измерения является алгоритмическая коррекция функции преобразования с помощью дополнительного устройства-компенсатора, реализующего обратную по отношению к функции пре-

образования зависимость. Дополнительным условием является инвариантность такого преобразователя к виду нелинейной зависимости, которую ему необходимо скорректировать, то есть возможность адаптации к произвольному виду функции преобразования.

Таким образом, суть рассматриваемой здесь проблемы состоит в том, чтобы с помощью дополнительного адаптивного устройства обработки измерительного сигнала осуществить коррекцию функции преобразования полупроводникового терморезистора и обеспечить ее линейность в рабочем диапазоне температур.

### 2. Коррекция функции преобразования полупроводникового терморезистора с помощью искусственной нейронной сети

В качестве устройства-компенсатора наиболее целесообразно использовать искусственную нейронную сеть. Обоснованием такого выбора служит то, что искусственные нейронные сети по своей природе нелинейны, обладают хорошими аппроксимирующими свойствами и не требуют специально разработанных методов проектирования, их можно синтезировать через обучение.

На рис. 1 представлена структурная схема адаптивной системы компенсации нелинейности функции преобразования полупроводникового терморезистора. Сопротивление терморезистора  $R_{\text{пн}}$  преобразуется измерительным устройством в цифровой код  $R_d$ , который поступает на вход нейросети-компенсатора. В результате процесса адаптации синаптические веса нейросети, являющейся в данном случае обратной моделью полупроводникового терморезистора, настраиваются таким образом, чтобы ее выходной сигнал  $T_N$  являлся наилучшим приближением входного сигнала  $T$ .

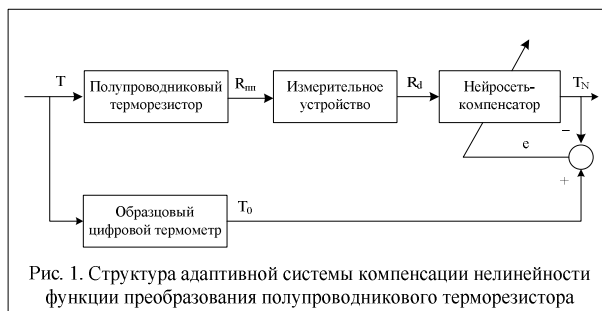


Рис. 1. Структура адаптивной системы компенсации нелинейности функции преобразования полупроводникового терморезистора

Нейросеть-компенсатор представляет собой трехслойный перцептрон, структура которого приведена на рис. 2.

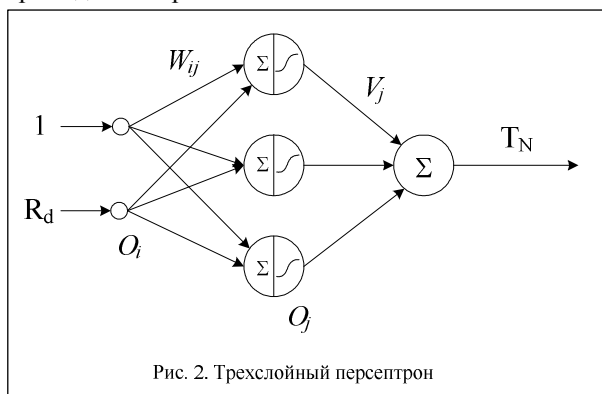


Рис. 2. Трехслойный перцептрон

Выходной слой перцептрона образован одним нейроном, который формирует сигнал  $T_N$  как взвешенную сумму выходных сигналов нейронов скрытого слоя

$$T_N = \sum_{j=1}^n V_j O_j, \quad (1)$$

где  $O_j$  – выходной сигнал  $j$ -го нейрона скрытого слоя;  $V_j$  – синаптический вес  $j$ -го входа нейрона выходного слоя;  $n$  – количество нейронов в скрытом слое.

Скрытый слой образован нейронами с сигмоидальными функциями активации. Каждый нейрон этого слоя описывается следующими уравнениями

$$O_j = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}, \quad (2)$$

где  $O_i$  – выходной сигнал  $i$ -го нейрона входного слоя;  $W_{ij}$  – синаптический вес  $i$ -го входа  $j$ -го нейрона скрытого слоя;  $m$  – количество нейронов во входном слое.

Входной слой нейронов образован самими входными сигналами нейросети, в качестве которых в рамках данной задачи выступают выходной сигнал измерительного устройства  $R_d$  и постоянный сигнал, равный единице, который вводится для описания постоянного смещения.

Настройку синаптических весов перцептрона  $V_j$  и  $W_{ij}$  будем производить с использованием алгоритма обучения Левенберга-Марквардта [4-6], обладающего максимальной скоростью сходимости в классе градиентных процедур. Критерием оптимальности при этом выступает средний квадрат ошибки оценивания

$$E(k) = \frac{1}{2} e^2(k) = \frac{1}{2} (T_0(k) - T_N(k))^2. \quad (3)$$

Обучающая выборка для процедуры обучения нейросети-компенсатора состоит из пар значений  $\langle R_{di}, T_{0i} \rangle$ , получаемых при калибровке измерительной системы.

### 3. Экспериментальные исследования

Для получения экспериментальной градуировочной характеристики терморезистора в диапазоне температур  $20^\circ\text{C} \dots 80^\circ\text{C}$  (рис. 3) использовалась измерительная установка, состоящая из температурной камеры МС-71, полупроводникового и образцового терморезисторов, цифровых вольтметров В7-16А (для измерения  $R_{пт}$ ) и В7-27А/1 (для измерения  $t$ ). Множество точек полученной характеристики использовалось в качестве обучающей последовательности для нейрокомпенсатора.

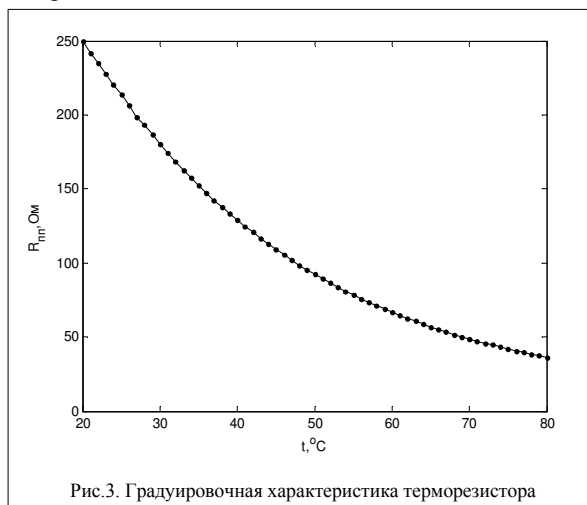


Рис. 3. Градуировочная характеристика терморезистора

Исследование свойств и характеристик предложенной системы коррекции функции преобразования полупроводникового терморезистора осуществлялось с помощью метода имитационного моделирования на ЭВМ. С этой целью была разработана программа на языке MATLAB, использующая функции проектирования и моделирования искусственных нейронных сетей библиотеки Neural Network Toolbox [7].

Компенсация нелинейности производилась с использованием предложенного нейросетевого устройства на базе трехслойного перцептрона, а также с помощью полиномов 3-й, 4-й и 5-й степени, коэффициенты которых рассчитывались

методом наименьших квадратов. Погрешности измерения температуры без компенсации нелинейности, а также с использованием различных типов компенсаторов приведены на рис. 4–8.

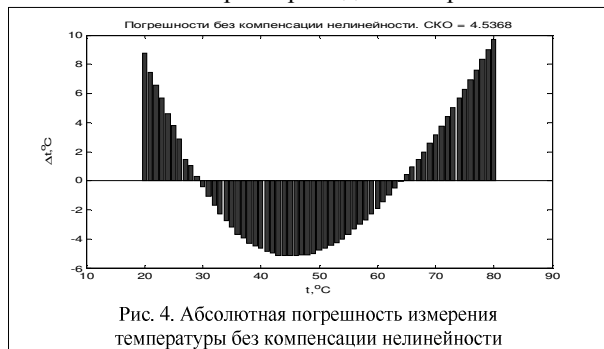


Рис. 4. Абсолютная погрешность измерения температуры без компенсации нелинейности

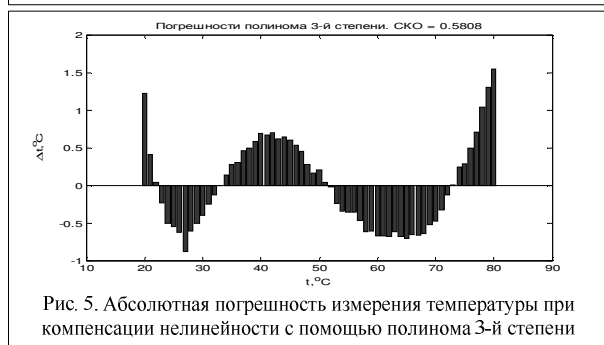


Рис. 5. Абсолютная погрешность измерения температуры при компенсации нелинейности с помощью полинома 3-й степени



Рис. 6. Абсолютная погрешность измерения температуры при компенсации нелинейности с помощью полинома 4-й степени



Рис. 7. Абсолютная погрешность измерения температуры при компенсации нелинейности с помощью полинома 5-й степени

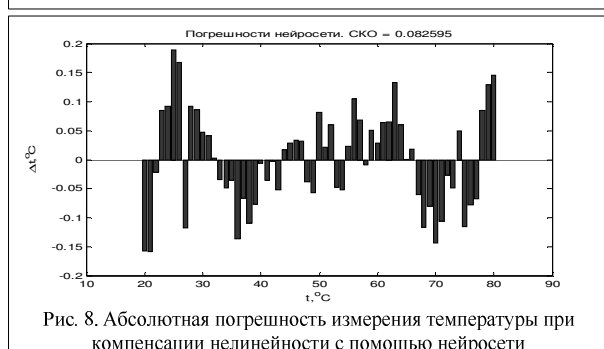


Рис. 8. Абсолютная погрешность измерения температуры при компенсации нелинейности с помощью нейросети

Значения среднеквадратической и максимальной погрешности измерения температуры для каждого типа компенсатора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты исследования для различных типов компенсации нелинейности

№ п/п	Тип компенсатора	Среднеквадратическая погрешность $\sigma_t, ^\circ\text{C}$	Максимальная погрешность $\Delta_t \text{ max}, ^\circ\text{C}$
1	Без компенсации	4,5368	9,7125
2	Полином 3-й степени	0,5808	1,5487
3	Полином 4-й степени	0,2469	0,6752
4	Полином 5-й степени	0,1079	0,2855
5	Трехслойный персептрон	0,0826	0,1915

#### 4. Выводы

В целом результаты имитационного моделирования полностью подтверждают работоспособность рассмотренной системы автоматической коррекции функции преобразования полупроводникового терморезистора и согласуются с теоретическими выкладками. Сравнительный анализ функционирования предложенной системы и аналогичной системы, использующей компенсатор на базе полиномиального аппроксиматора, показал, что среднеквадратическая погрешность коррекции функции преобразования нейросетевым устройством меньше погрешности коррекции полиномом 5-й степени.

Преимуществом предлагаемого подхода является инвариантность нейросетевого компенсатора к виду нелинейной характеристики полупроводникового терморезистора и возможность синтезировать такую систему через обучение, не привлекая сложных методов проектирования. Использование предлагаемого адаптивного корректора позволит существенно уменьшить систематическую погрешность измерений, вызванную несоответствием номинальной и реальной функции преобразования измерительного устройства.

#### Список литературы

1. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В. А. Грановский, Т. Н. Синая. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
2. Запорожец, О. В. Компенсация нелинейности функции преобразования измерительных устройств с помощью искусственной нейронной сети / О. В. Запоро-

жець, В. А. Коротенко, Т. А. Овчарова // Системи управління, навігації та зв'язку.– Вип. 4(16). – 2010. – С. 99–103.

3. Дегтярев, А. В. Адаптивная система компенсации нелинейности функции преобразования измерительных устройств на базе трехслойного перцептрона / А. В. Дегтярев, О. В. Запорожец, Т. А. Овчарова // Электротехнические и компьютерные системы. – № 06(82). – 2012. – С. 235–241.

4. Wasserman, P. D. *Neural Computing: Theory and Practice [Text]* / P. D. Wasserman. – N.Y. : Van Nostrand Reinhold, 1989. – 230 p.

5. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения [Текст] / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков : ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 369 с.

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

7. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB [Текст] : специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Захаров И.П., Харьковский национальный университет радиоэлектроники

**Авторы:**

**ЗАПОРОЖЕЦ Олег Васильевич**

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры метрологии и измерительной техники  
Раб.тел. – 702-13-31, моб.тел. –068-606-94-81  
E-mail: oleg\_zaporozhets@rambler.ru

**ОВЧАРОВА Татьяна Александровна**

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры метрологии и измерительной техники  
Дом.тел. – 738-16-12, моб.тел. – 050-708-63-19  
E-mail: tanya140488@mail.ru

**РУЖЕНЦЕВ Игорь Викторович**

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии и измерительной техники  
Раб.тел. – 702-13-31, моб.тел. –067-57-60-603  
E-mail: mit@kture.kharkov.ua

**Компенсация нелинейности напівпровідникового терморезистора за допомогою штучної нейронної мережі.**

О.В.Запорожець, Т.О. Овчарова, І.В. Руженцев

Запропоновано метод корекції функції перетворення напівпровідникового терморезистора з використанням компенсатора нелинейності на базі тришарового перцептрона. За допомогою імітаційного моделювання на ЕОМ досліджено працездатність запропонованого метода, проведено порівняльний аналіз з поліноміальними компенсаторами нелинейності.

**Ключові слова:** штучна нейронна мережа, перцептрон, навчання, компенсація нелинейності.

**The compensation of the thermistor nonlinearity with artificial neural network.**

O.V. Zaporozhets, T.A. Ovcharova, I.V. Ruzhentsev

The thermistor transfer function correction method with compensator of nonlinearity based on three-layer perceptron is proposed. The operability of the proposed method is researched by the computer simulation, the comparative analysis with polynomial compensators is implemented.

**Keywords:** artificial neural network, perceptron, learning, nonlinearity compensation.