

к.т.н. доцент Запорожец О. В.,
аспирант Овчарова Т. А.,
д.т.н. профессор Руженцев И.В.

Харьковский национальный университет радиотехники
E-mail: oleg_zaporozhets@gambler.ru

КОРРЕКЦИЯ ФУНКЦИИ ПРЕБРАЗОВАНИЯ 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.

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 $R_{nn}(t)$ от температуры t имеет сложный нелинейный характер, поэтому невозможно выразить зависимость $R_{nn}(t)$ простой формулой, которая бы позволила выполнить градуировку с высокой точностью. Как правило, весь интервал температуры разбивают на отдельные участки, на которых зависимость $R_{nn}(t)$ 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 преобразования 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.

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_{nn} 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 .

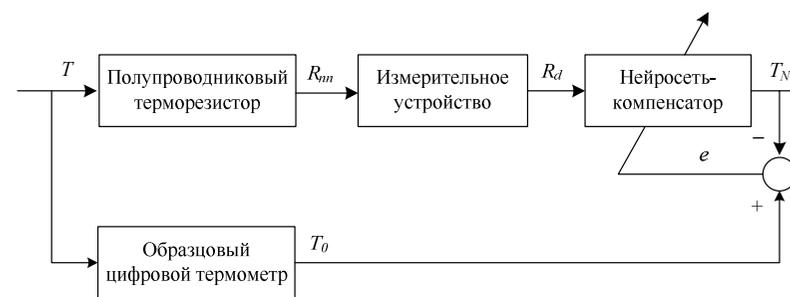


Рисунок 1 – Структура адаптивной системы компенсации нелинейности функции преобразования полупроводникового терморезистора

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

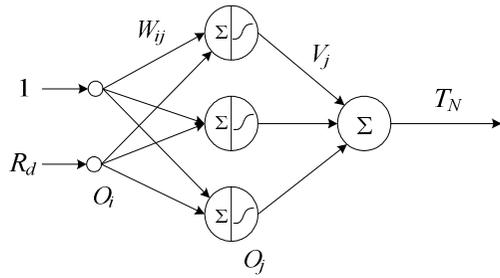


Рисунок 2 – Трехслойный персептрон

Выходной слой персептрона 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

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

$$S_j = \sum_{i=1}^m W_{ij} O_i,$$

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 персептрона V_j и W_{ij} будем производить с использованием алгоритма обучения Левенберга-Марквардта [3], 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 (рис. 3) состоит из пар значений $\langle R_{di}, T_{0i} \rangle$, получаемых при калибровке измерительной системы.

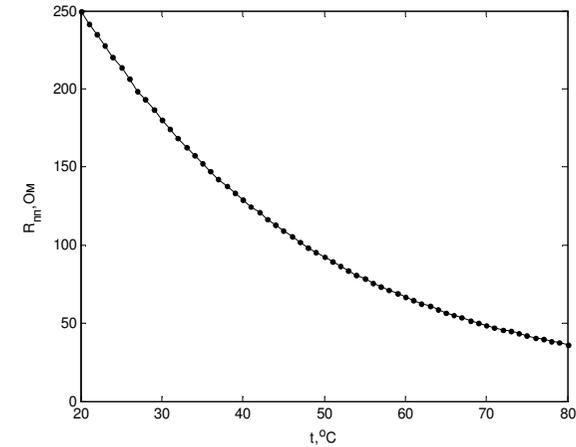


Рисунок 3 – Градуировочная характеристика терморезистора

Исследование свойств и характеристик предложенной системы коррекции функции преобразования полупроводникового терморезистора осуществлялось с помощью метода имитационного моделирования на ЭВМ. Компенсация нелинейности производилась с использованием предложенного нейросетевого устройства на базе трехслойного персептрона, а также с помощью полиномов 3-й, 4-й и 5-й степени, коэффициенты которых рассчитывались методом наименьших квадратов. Значения среднеквадратической и максимальной погрешности измерения температуры для каждого типа компенсатора приведены в таблице 1. Погрешности измерения температуры с использованием различных типов компенсаторов приведены на рис. 4.

Таблица 1 – Результаты моделирования 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

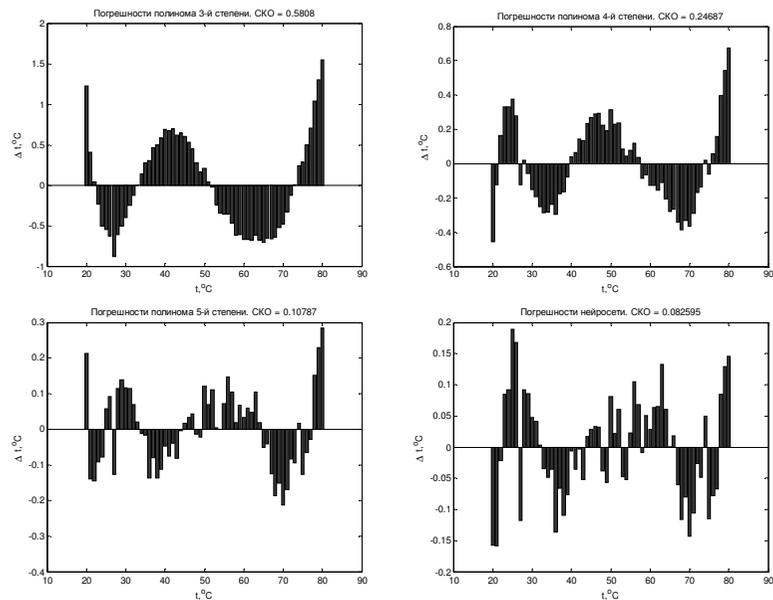


Рисунок 4 – Абсолютные погрешности измерения температуры

В целом результаты имитационного моделирования полностью подтверждают работоспособность предложенной системы автоматической коррекции функции преобразования полупроводникового терморезистора и согласуются с теоретическими выкладками и демонстрируют преимущество нейросетевой модели перед полиномиальными.

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.

1. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л. : Энергоатомиздат, 1990.
2. Дегтярев А. В., Запорожец О. В., Овчарова Т. А. Адаптивная система компенсации нелинейности функции преобразования измерительных устройств на базе трехслойного персептрона // Электротехнические и компьютерные системы. № 06(82), 2012.
3. Бодянский Е. В., Руденко О. Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004.