

УДК 536.5:004.89

ЗУБРЕЦКАЯ И.С., ФЕДИН С.С., ЛАГОДА О.А.  
Киевский национальный университет технологий и дизайна

### ГРАДУИРОВКА NTC-ТЕРМИСТОРА МЕТОДОМ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ R/T- ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Цель.** Разработка аппроксимационной модели R/T-характеристики на основе нечетких функций принадлежности для обеспечения точности градуировки NTC-термистора в рабочем диапазоне температуры.

**Методика.** Создание аппроксимационной модели R/T-характеристики NTC-термистора осуществляли на основе теории нечеткой логики с использованием модуля Rule Maker системы моделирования CubiCalc 2.0. По критериям среднеквадратической и относительной погрешности сравнивали точность аппроксимации разработанной модели с полиномиальной моделью Стейнхарта-Харта.

**Результаты.** Показано, что использование моделей на основе нечетких функций принадлежности позволяет по критерию среднеквадратической погрешности получить более точную аппроксимацию R/T-характеристики NTC-термистора по сравнению с моделью Стейнхарта-Харта.

**Научная новизна.** Научно обосновано использование нечетких функций принадлежности для повышения точности аппроксимации R/T-характеристики NTC-термистора.

**Практическая значимость.** Разработанная модель позволяет получить градуировочную таблицу термисторов типа NTC в рабочем диапазоне температуры.

**Ключевые слова:** градуировочная характеристика, NTC-термистор, точность аппроксимации, R/T-характеристика, полиномиальная модель, нечеткие функции принадлежности, нечеткое моделирование.

**Введение.** Выбор метода построения градуировочных характеристик (ГХ) первичных преобразователей является актуальной задачей обеспечения точности измерения физической величины. Существующие методы моделирования ГХ первичных преобразователей можно разделить на параметрические и непараметрические [1]. Использование параметрических методов предполагает аппроксимацию ГХ в рамках выбранного класса функций, адекватно описывающих искомую зависимость. Непараметрические методы обладают значительными преимуществами в случае построения ГХ в условиях априорной неопределенности о виде параметрической функций или ее неадекватности экспериментальным данным [2].

В [3] показано, что в условиях промышленного производства примерно половина контролируемых параметров связана с измерениями температуры. При этом широкое применение получили полупроводниковые терморезистивные преобразователи температуры с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления – термисторы типа NTC [4]. Несмотря на ряд преимуществ, существенным недостатком NTC-термисторов является нелинейность функции преобразования температуры  $T$  в электрическое сопротивление  $R$ , что требует обеспечения точности аппроксимации R/T-характеристики NTC-термисторов при выполнении индивидуальной градуировки.

В работах [5 – 7] показано, что обеспечение точности аппроксимации R/T-характеристики NTC-термистора является актуальной задачей, решение которой

зависит от выбора узловых точек внутри рабочего диапазона температуры и возможно на основе полиномиальной зависимости Стейнхарта-Харта и непараметрических методов нейросетевого и нечеткого моделирования. Целесообразность использования методов нечеткой логики (fuzzy logic) для аппроксимации нелинейной  $R/T$ -характеристики NTC-термистора обусловлена универсальностью нечетких алгоритмов обработки измерительной информации. В соответствии с теоремой Б. Коско [8] (FAT – Fuzzy Approximation Theorem) использование нечетких функций принадлежности позволяет с заданной точностью аппроксимировать любую математическую зависимость и получить эффективное решение задачи построения нелинейной ГХ NTC-термистора.

**Постановка задачи.** Целью исследования является разработка аппроксимационной модели  $R/T$ -характеристики на основе нечетких функций принадлежности для обеспечения точности градуировки NTC-термистора в рабочем диапазоне температуры.

**Результаты исследования.** Решение задачи построения ГХ NTC-термистора B57703M0103G017 осуществляли с использованием нечетких функций принадлежности на основе априорных данных нормализованной  $R/T$ -характеристики при номинальных значениях температуры  $T_N=25^\circ\text{C}$  и сопротивления  $R_N=R_{25}=10$  кОм в рабочем диапазоне температуры  $(-55\dots155)^\circ\text{C}$  (табл. 1) [9].

На первом этапе моделирования создавали базу нечетких продукционных правил типа «ЕСЛИ (условие), ТО (действие)» и осуществляли идентификацию нечетких функций принадлежности для входной переменной  $T$  и выходной переменной  $R$  на основе методов Data Points Rules, Sparse Interpolation, Correlation Analysis, Slice Interpolation модуля Rule Maker системы моделирования CubiCalc 2.0 (рис.1).

Оценку точности результатов нечеткого моделирования ГХ NTC-термистора выполняли для семи поддиапазонов температуры  $T$ , К: 218,15...243,15; 248,15...273,15; 278,15...303,15; 308,15...333,15; 338,15...363,15; 368,15...393,15; 398,15...428,15 на основе критериев среднеквадратической  $MSE$  (Mean Squared Error) и относительной  $MPE$  (Mean Percentage Error) погрешностей [7].

Таблица 1

**Значения нормализованной  $R/T$ -характеристики NTC-термистора B57703M0103G017**

$T, ^\circ\text{C}$	$R_T/R_{25}$	$T, ^\circ\text{C}$	$R_T/R_{25}$	$T, ^\circ\text{C}$	$R_T/R_{25}$	$T, ^\circ\text{C}$	$R_T/R_{25}$	$T, ^\circ\text{C}$	$R_T/R_{25}$
-55	96,30	-10	5,533	35	0,6531	80	0,1258	125	0,03417
-50	67,01	-5	4,232	40	0,5327	85	0,1072	130	0,03009
-45	47,17	0	3,265	45	0,4369	90	0,09177	135	0,02654
-40	33,65	5	2,539	50	0,3603	95	0,07885	140	0,02348
-35	24,26	10	1,990	55	0,2986	100	0,06800	145	0,02083
-30	17,70	15	1,571	60	0,2488	105	0,05886	150	0,01853
-25	13,04	20	1,249	65	0,2083	110	0,05112	155	0,01653
-20	9,707	25	1,000	70	0,1752	115	0,04454	-	-
-15	7,293	30	0,8057	75	0,1481	120	0,03893	-	-

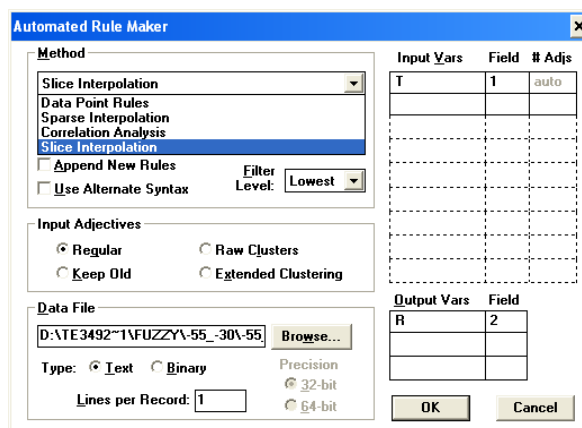


Рис. 1 Диалоговое окно автоматического конструктора нечетких продукционных правил Rule Maker

Анализ результатов моделирования для первого поддиапазона температуры (218,15...243,15) К показал, что наименьшие значения среднеквадратической ( $MSE$ ) и относительной ( $MPE$ ) погрешностей соответствуют нечеткой модели, полученной на основе метода кусочно-линейной интерполяции (Slice Interpolation).

На втором этапе нечеткого моделирования для каждого из семи выбранных поддиапазонов температуры с использованием метода Slice Interpolation определяли базу продукционных правил модели «вход  $T \rightarrow$  выход  $R$ » и функций принадлежности нечетких переменных  $T$  и  $R$  (рис. 2).

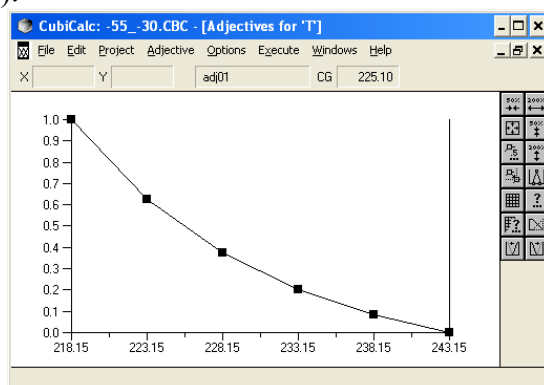


Рис. 2 Функция принадлежности входной нечеткой переменной  $T$  для поддиапазона (218,15...243,15) К

Результаты нечеткого моделирования для рабочего диапазона температуры NTC-термистора представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты аппроксимации  $R/T$ -характеристики NTC-термистора B57703M0103G017 на основе нечеткого моделирования

$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$
218,15	962,8243	263,15	55,3222	308,15	6,5303	353,15	1,2579	398,15	0,3417
223,15	669,9810	268,15	42,3142	313,15	5,3264	358,15	1,0719	403,15	0,2996
228,15	471,6189	273,15	32,6500	318,15	4,3685	363,15	0,9177	408,15	0,2667
233,15	336,4437	278,15	25,3867	323,15	3,6026	368,15	0,7884	413,15	0,2348
238,15	242,5606	283,15	19,8975	328,15	2,9857	373,15	0,6799	418,15	0,2074
243,15	177,0000	288,15	15,7081	333,15	2,4880	378,15	0,5886	423,15	0,1861
248,15	130,3800	293,15	12,4885	338,15	2,0828	383,15	0,5112	428,15	0,1653
253,15	97,0555	298,15	9,9988	343,15	1,7518	388,15	0,4454	-	-
258,15	72,9194	303,15	8,0570	348,15	1,4809	393,15	0,3893	-	-

Оценку точности разработанной модели выполняли путем ее сравнения по критериям  $MSE$  и  $MPE$  с точностью полиномиальной модели Стейнхарта-Харта

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3, \quad (1)$$

где  $a, b, c$  – параметры модели [10].

Результаты полиномиальной аппроксимации  $R/T$ -характеристики НТС-термистора на основе модели (1) для рабочего диапазона температуры (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты полиномиальной аппроксимации  $R/T$ -характеристики НТС-термистора B57703M0103G017**

$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$	$T, K$	$R_T$
218,15	963,1609	263,15	55,3141	308,15	6,5315	353,15	1,2572	398,15	0,3417
223,15	669,8129	268,15	42,3108	313,15	5,3276	358,15	1,0719	403,15	0,3007
228,15	471,7738	273,15	32,6244	318,15	4,3694	363,15	0,9179	408,15	0,2654
233,15	336,3627	278,15	25,3889	323,15	3,6028	368,15	0,7885	413,15	0,2348
238,15	242,6355	283,15	19,8979	328,15	2,9862	373,15	0,6800	418,15	0,2083
243,15	176,9952	288,15	15,7093	333,15	2,4879	378,15	0,5886	423,15	0,1852
248,15	130,0103	293,15	12,4907	338,15	2,0829	383,15	0,5112	428,15	0,1650
253,15	96,6042	298,15	9,9996	343,15	1,7523	388,15	0,4454	-	-
258,15	72,9137	303,15	8,0584	348,15	1,4809	393,15	0,3892	-	-

Сравнительная оценка критериев  $MSE$  и  $MPE$  (табл. 4) показывает, что аппроксимация на основе нечетких функций принадлежности является более точной по сравнению с полиномиальной аппроксимацией, поскольку значения  $MSE$  и  $MPE$  и их стандартные отклонения для нечетких моделей меньше, чем для модели Стейнхарта-Харта.

Таблица 4

**Сравнение точности аппроксимационных моделей на основе критериев  $MSE$  и  $MPE$**

Критерии	Вид аппроксимации	
	Модель Стейнхарта-Харта	Модель на основе нечетких функций принадлежности
$MSE$	0,011721	0,001330
Ст. откл. $MSE$	0,041428	0,005195
$MPE$	0,000306	0,000067
Ст. откл. $MPE$	0,000897	0,001382

Следует отметить, что данный результат не позволяет оценить значимость различий между полиномиальной моделью и нечеткими моделями по критериям  $MSE$  и  $MPE$ . Это возможно с использованием  $t$ -критерия для независимых выборок – исходных и аппроксимированных значений сопротивления  $R$ . Анализ результатов сравнения аппроксимационных моделей с использованием  $t$ -критерия и диаграмм размаха в системе STATISTICA 6.1, представленный на рис. 3, показывает значимое различие между разработанными нечеткими моделями и полиномиальной моделью (1) по критерию  $MSE$  при уровне значимости  $p=0,11$ , что подтверждается отсутствием пересечения интервалов стандартных ошибок (рис. 3, а). По критерию  $MPE$  результат незначим, что подтверждается пересечением интервалов стандартных ошибок (рис. 3, б).

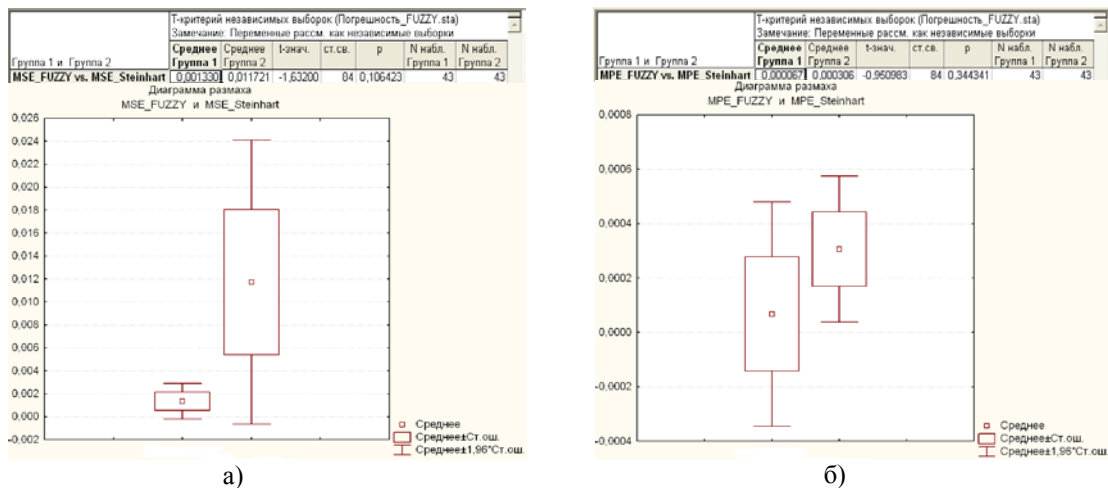


Рис. 3 Оценка значимости различий между нечеткими моделями и полиномиальной моделью по критериям *MSE* (а) и *MPE* (б)

**Выводы.** В результате проведенных исследований установлено, что использование моделей на основе нечеткой логики позволяет получить более точную аппроксимацию *R/T*-характеристики NTC-термистора в рабочем диапазоне температуры по сравнению с полиномиальной моделью Стейнхарта-Харта. Это подтверждается значимым различием среднеквадратической погрешности аппроксимации между разработанными нечеткими моделями и полиномиальной моделью.

#### Список использованной литературы

1. Семенов Л. А. Методы построения градуировочных характеристик средств измерения / Л. А. Семенов, Т. Н. Сирая. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 128 с.
2. Хробостов Д.А. Разработка нейросетевых методов построения градуировочных характеристик сенсоров и сенсорных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Хробостов Дмитрий Александрович. – М., 2001. – 191 с.
3. Metrology in industry: the key for quality / edited by French College of Metrology. Paris, 2006. – 270 p.
4. Термисторы: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://temperatures.ru/pages/sravnitelnaya\\_tablica\\_temperaturnyh\\_datchikov](http://temperatures.ru/pages/sravnitelnaya_tablica_temperaturnyh_datchikov)
5. Зубрецкая Н. А., Федин С. С., Зубрецкая И. С. Построение градуировочных характеристик датчиков температуры с использованием нейронных сетей // Вестник Инженерной академии Украины. – 2015. – № 1 – С. 130–136.
6. Федин С.С., Зубрецкая Н.А., Зубрецкая И.С. Моделирование статических характеристик датчиков температуры на основе нечеткой логики // Системы обработки информации. – 2015. – Вып. 4(129). – С.75 – 79.
7. Федин С.С., Зубрецкая И.С. Обеспечение точности аппроксимации *R/T*-характеристики NTC-термистора на основе нейросетевого моделирования // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015, № 4. – С. 28-35.
8. Kosko B. Fuzzy Systems as Universal Approximators // IEEE Trans. on Computers. 1994. Vol. 43. №11. P.1329. – 1333.
9. NTC thermistors for temperature measurement. Probe assemblies B57703M – EPCOS AG, 2013 – 9 p.
10. John S. Steinhart, Stanley R. Hart, Calibration curves for thermistors, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, Volume 15, Issue 4, August 1968, P. 497-503

## ГРАДУЮВАННЯ NTC-ТЕРМІСТОРА МЕТОДОМ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ R/T-ХАРАКТЕРИСТИКИ

ЗУБРЕЦЬКА І.С., ФЕДІН С.С., ЛАГОДА О.А.

*Київський національний університет технологій та дизайну*

**Мета.** Розробка апроксимаційної моделі R/T-характеристики на основі нечітких функцій належності для забезпечення точності градуювання NTC-термістора в робочому діапазоні температури.

**Методика.** Створення апроксимаційних моделей R/T-характеристики NTC-термістора здійснювали на основі теорії нечіткої логіки з використанням модуля Rule Maker системи моделювання CubiCalc 2.0. За критеріями середньоквадратичної та відносної похибок порівнювали точність апроксимації розробленої моделі з поліноміальною моделлю Стейнхарта-Харта.

**Результати.** Показано, що використання моделей на основі нечітких функцій належності дозволяє за критерієм середньоквадратичної похибки отримати більш точну апроксимацію R/T-характеристики NTC-термістора в порівнянні з моделлю Стейнхарта-Харта.

**Наукова новизна.** Науково обґрунтовано використання нечітких функцій належності для підвищення точності апроксимації R/T-характеристики NTC-термістора.

**Практична значимість.** Розроблена модель дозволяє отримати градуювальну таблицю термісторів типу NTC в робочому діапазоні температури.

**Ключові слова:** градуювальна характеристика, NTC-термістор, точність апроксимації, R/T-характеристика, поліноміальна модель, нечіткі функції належності, нечітке моделювання.

## NTC-THERMISTOR CALIBRATION BY METHOD FUZZY MODELING R/T CHARACTERISTIC

ZUBRETSKA I., FEDIN S., LAGODA O.

*Kyiv National University of Technologies and Design*

**Purpose.** Development approximation model R/T-characteristics based on fuzzy membership functions to ensure the accuracy of the calibration NTC-thermistor in the operating temperature range.

**Methodology.** Create approximation model R/T-characteristics NTC-thermistor was carried out on the basis of fuzzy membership functions using the Rule Maker module simulator CubiCalc 2.0. According to the criteria and the relative mean square error of approximation accuracy compared with the developed model polynomial model Steinhart-Hart.

**Findings.** It is shown that the use of models based on fuzzy logic allows for a standard error criterion to obtain a more accurate approximation of the R / T-Specifications NTC-thermistor in comparison with the model of the Steinhart-Hart.

**Originality.** Scientifically justified the use of fuzzy membership functions to improve the accuracy of the approximation R/T-characteristics NTC-thermistor.

**Practical value.** The developed model allows to obtain the calibration table thermistors NTC type in the operating temperature range.

**Keywords:** the calibration characteristics, the NTC-thermistor, the accuracy of the approximation, R/T-characteristic, polynomial model, fuzzy functions, fuzzy modeling.