

УДК 004.89:536.5

С.С. Федін, Н.А. Зубрецька, І.С. Зубрецька

Київський національний університет технологій і дизайну, Київ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

На основе теории нечетких множеств предложена формализация задачи моделирования статической R/T-характеристики полупроводниковых терморезистивных преобразователей температуры с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Ключевые слова: моделирование, градуировочная характеристика, датчик температуры, термистор, нечеткие множества.

Введение

В процессе измерения физической величины первым звеном измерительной цепи и обязательным элементом современных средств измерительной техники (СИТ) является датчик – первичный преобразователь. В работах [1 – 3] показано, что точность измерения физической величины в значительной степени зависит от процедуры построения градуировочной характеристики (ГХ) СИТ – статической характеристики, предназначенной для определения значения измеряемой физической величины по отклику СИТ.

Актуальной задачей обеспечения точности измерения физической величины является выбор метода построения одномерных или многомерных ГХ СИТ, т.е. моделирование зависимостей «вход (входы) → выход» на основе экспериментальных данных.

В настоящее время существует большое количество различных методов моделирования (построения) линейных или нелинейных ГХ первичных преобразователей, которые можно разделить на группы параметрических и непараметрических методов [2]. Использование параметрических методов предполагает моделирование статических характеристик, т.е. аппроксимацию ГХ в рамках выбранного класса функций, адекватно описывающих искомую зависимость. Этот поиск сводится к нахождению наилучших по выбранному критерию значений параметров модели.

Параметрические модели могут быть получены на основе использования методов регрессионного или конфлюэнтного анализа в зависимости от различных условий выбора подходящего класса аппроксимирующих функций [1, 4].

Методы непараметрического моделирования обладают значительными преимуществами в том случае, если построение статических характеристик СИТ осуществляется в условиях априорной неопределенности о виде параметрической функций или ее неадекватности экспериментальным данным. К не-

параметрическим методам относятся процедуры сплайнового и ядерного моделирования, а также интеллектуальный анализ данных с использованием искусственных нейронных сетей и принципов нечеткой логики. Недостатком процедуры сплайновой аппроксимации ГХ является априорная неопределенность при выборе количества и расположения узлов аппроксимации и определении порядка сплайна [5].

Использование ядерного моделирования позволяет получить результат аппроксимации зависимости в виде средневзвешенной оценки отклика, однако сложность выбора ядра оценки является недостатком этого метода [1].

Задача нейросетевого моделирования заключается в нахождении весовых коэффициентов связей между нейронами сети, при которых погрешность аппроксимации зависимости «вход (входы) → выход», полученная на основе обучения модели нейронной сети, является минимальной. Следует отметить, что практическая реализация данной задачи характеризуется выполнением требований воспроизводимости результатов аппроксимации для тестовой и контрольной выборок и сходимости нейросетевой модели к заданной величине погрешности обучения.

Использование нечетких множеств согласно теореме Б. Коско [6] (FAT – Fuzzy Approximation Theorem) позволяет аппроксимировать любую математическую зависимость на основе модели нечеткого логического вывода. Таким образом, эффективное решение задачи построения ГХ датчиков для получения с заданной точностью одномерного или многомерного отображения «вход (входы) → выход» возможно на основе ее формализации средствами теории нечеткой логики (fuzzy logic).

Цель исследования. Целью статьи является формализация задачи непараметрического моделирования нелинейных градуировочных характеристик датчиков температуры с использованием математического аппарата нечеткой логики.

Построение градуировочных характеристик датчиков температуры на основе нечеткой логики

Рассмотрим постановку задачи непараметрического моделирования нелинейных ГХ датчиков температуры с использованием математического аппарата нечеткой логики на примере терморезистивных преобразователей температуры с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (NTC-термисторов).

Для NTC-термисторов процедура градуировки реализуется на двух этапах. На первом этапе осуществляются совместные измерения температуры T и электрического сопротивления R (T_i, R_i); $i = \overline{1, N}$ соответственно на входе и выходе СИТ. На втором этапе по полученным эмпирическим данным моделируется прямая градуировочная зависимость (R/T -характеристика термистора) или определяется обратная градуировочная зависимость.

Используемые в настоящее время подходы к моделированию характеристик NTC-термисторов существенно ограничивают перечень исследуемых процессов и в ряде случаев не позволяют добиться высокой точности результатов моделирования [7, 8, 9]. В основу большинства существующих моделей для аппроксимации зависимости сопротивления от температуры положено выражение

$$R_T = R_N \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right], \quad (1)$$

где R_T – сопротивление термистора, Ом (при температуре T);

R_N – номинальное сопротивление термистора, Ом (при температуре T_N);

T, T_N – температура, К;

B – постоянный коэффициент температурной чувствительности, зависящий от свойств материала термистора, К [8].

Зависимость (1) зачастую представляют в виде

$$R_T = K_N \exp \left(\frac{B}{T} \right), \quad (2)$$

где $K_N = R_N \exp \left(-\frac{B}{T_N} \right)$ – постоянный коэффициент,

зависящий от свойств материала термистора, Ом [3].

Аргумент функции (2) можно представить в виде [10]:

$$\frac{B}{T} = -\alpha T, \quad (3)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, %/К.

Следует отметить, что использование зависимости (1) приводит к высокой методической погрешности, которая в пересчете на значения темпе-

ратуры в интервале $\pm 25^\circ\text{C}$ может достигать $0,3^\circ\text{C}$ [9]. Учитывая тот факт, что рабочий диапазон температур NTC-термисторов SIMENS или MATSUSHITA находится в диапазоне $(-55 \dots 180)^\circ\text{C}$ или $(-55 \dots 155)^\circ\text{C}$ [8, 11], а их градуировка в диапазоне $(0 \dots 100)^\circ\text{C}$ осуществляется в точках с интервалом 20°C [12], то выбор узловых точек для моделирования ГХ с использованием, например, параметрических зависимостей Стейнхарта-Харта характеризуется различными значениями погрешности аппроксимации и представляет нетривиальную задачу, требующую непараметрического подхода.

Современным подходом к непараметрическому моделированию является теория нечетких множеств, оперирующая небинарными отношениями вхождения, что позволяет определить степень принадлежности элемента x некоторого множества X нечеткому множеству A в непрерывном диапазоне $[0, 1]$ с использованием симметричных (рис. 1) или несимметричных треугольных функций принадлежности $\mu_A(x)$, или функций принадлежности других типов [13, 14].

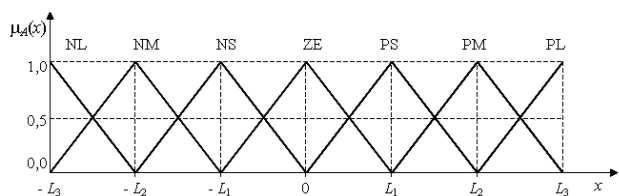


Рис. 1. Треугольные функции принадлежности: NL (negative large) – «отрицательный большой»; NM (negative medium) – «отрицательный средний»; NS (negative small) – «отрицательный малый»; ZE (zero) – «близкий нулю»; PS (positive small) – «положительный малый»; PM (positive medium) – «положительный средний»; PL (positive large) – «положительный большой»

Область определения треугольных функций принадлежности элементов x_i одному из нечетких термов заданного нечеткого множества A находится в интервале $[-L_i, L_i]$, $i = 1, 2, \dots, n$ (рис. 1). Количество термов определяется по формуле $m = 2 \cdot n + 1$, где n – число функций принадлежности в отрицательной области «Negative-N» (термы NS, NM, NL) и положительной области «Positive-P» (термы PS, PM, PL) с учетом терма «zero-ZE».

Основу модели нечеткого логического вывода составляет база нечетких правил, которые могут быть сформулированы эвристически или с использованием автоматического конструктора, например, модуля Rule Maker, входящего в систему моделирования CubiCalc 2.0 [15, 16]. Следует отметить, что использование второго способа позволяет на основе измеренных входных и выходных данных создать самоорганизующиеся нечеткие модели, характеризующиеся оптимальным количеством нечетких тер-

мов с установленной формой и числом нечетких правил [13]. Так, например, нечеткие производные правила формируются в виде условных суждений вида

ЕСЛИ \bar{x} есть А, ТО z есть С,

где А и С – нечеткие переменные, определяемые соответствующими функциями принадлежности. При этом А идентифицируется n-мерной функцией принадлежности (n – размерность входного вектора \bar{x}). Левая часть правила «ЕСЛИ \bar{x} есть А» является условием или предпосылкой, а правая часть «ТО z есть С» – следствием или заключением. В большинстве случаев предпосылки нечетких правил, записываются отдельно для каждой компоненты вектора \bar{x} с использованием одномерных нечетких переменных. Так, например, в алгоритме Мамдани нечеткие производные правила имеют вид [17, 18]:

ЕСЛИ x_1 есть A_1 и ЕСЛИ x_2 есть A_2 и ... и ЕСЛИ x_n есть A_n , ТО z есть С,

при этом очевидно, что $A = A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n$. Алгоритм нечеткого логического вывода позволяет на основе базы производных правил определить заключение $z = z_0$ по заданному входному вектору $\bar{x} = \bar{x}_0$ [17].

Используя тот факт, что аппроксимация статической характеристики датчика, например, на основе непараметрического метода ядерного моделирования позволяет получить средневзвешенную оценку отклика с использованием треугольной весовой функции [1], можно сделать предположение о целесообразности получения такого рода оценки для ГХ NTC-термистора на основе преобразования значений T, α и R в нечеткие множества. Основой такого предположения является центроидный метод приведения нечеткого результата средневзвешенной оценки отклика в численный результат $z = z_0$, используемый в алгоритме нечеткого логического вывода Мамдани. Универсальным аппроксиматором в этом случае может быть нечеткая модель, основанная на использовании функций принадлежности температуры T и сопротивления R нечетким термам (рис. 1), определенным для всего рабочего диапазона NTC-термистора.

Формализация задачи построения градуировочной характеристики NTC-термисторов с использованием алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани

Формализацию задачи построения ГХ датчиков температуры осуществим с использованием нечетких производных правил и процедур fuzzy logic на примере аппроксимации статической R/T-характеристики NTC-термистора B57703M (рис. 2) [19].

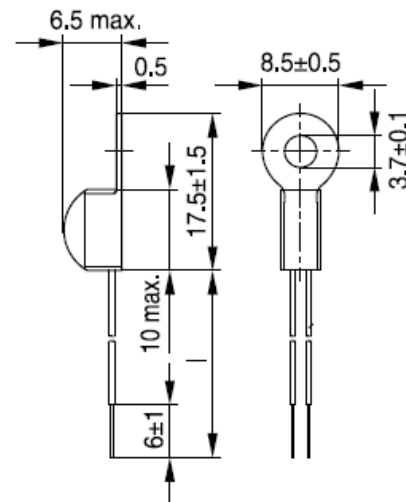


Рис. 2. Внешний вид и габаритные размеры NTC-термистора B57703M

Значения нормализованной R/T-характеристики NTC-термистора B57703M и температурного коэффициента сопротивления α %/K при $B=3988$ K в рабочем диапазоне температуры $(-55 \dots 155)^\circ\text{C}$ приведены в табл. 1 [19].

На основе данных (табл. 1) и с учетом зависимости (3) представим R/T-характеристику NTC-термистора в виде одномерной функции $z=f(x)$, где $z=R$, $x=T$ или в виде функции двух переменных $z=f(x, y)$, где $z=R$, $x=T$, $y=\alpha$.

На основе экспертных оценок или с использованием автоматического конструктора нечетких правил разделим диапазон входных переменных x, y и выходной переменной z и получим нечеткие термы – нечеткие переменные A_i, B_i, C_i .

Создадим базу знаний, состоящую из N правил $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$:

- Π_1 : ЕСЛИ x есть A_1 и y есть B_1 , ТО z есть C_1 ;
- Π_2 : ЕСЛИ x есть A_2 и y есть B_2 , ТО z есть C_2 ;
-
- Π_N : ЕСЛИ x есть A_N и y есть B_N , ТО z есть C_N ,

где A_i, B_i, C_i – нечеткие переменные с соответствующими функциями принадлежности $\mu_{A_i}(x)$, $\mu_{B_i}(x)$ и $\mu_{C_i}(x)$, $i=1, 2, \dots, N$.

Реализуем механизм нечеткого логического вывода для зависимостей $z=f(x, y) \equiv R=f(T, \alpha)$ или $z=f(x) \equiv R=f(T)$. При этом требуется по конкретным значениям $x=x_0$ и $y=y_0$ определить z_0 .

Следует отметить, что рассматриваемая задача может быть обобщена на случай произвольного числа входных переменных и производных правил.

Процесс нечеткого логического вывода при решении задачи аппроксимации R/T-характеристики терморезистивных преобразователей температуры включает четыре процедуры (рис. 3).

Таблица 1

Значения нормализованной R/T-характеристики NTC-термистора B57703M с номинальным сопротивлением R₂₅=10 кОм (при температуре T=25°C)

T(°C)	R _T /R ₂₅	α (%/K)	T(°C)	R _T /R ₂₅	α (%/K)	T(°C)	R _T /R ₂₅	α (%/K)
-55	96,30	7,4	15	1,571	4,7	90	0,09177	3,1
-50	67,01	7,2	20	1,249	4,5	95	0,07885	3,0
-45	47,17	6,9	25	1,0000	4,4	100	0,06800	2,9
-40	33,65	6,7	40	0,5327	4,0	105	0,05886	2,9
-35	24,26	6,4	45	0,4369	3,9	110	0,05112	2,8
-30	17,70	6,2	50	0,3603	3,8	115	0,04454	2,7
-25	13,04	6,0	30	0,8057	4,3	120	0,03893	2,6
-20	9,707	5,8	35	0,6531	4,1	125	0,03417	2,6
-15	7,293	5,6	55	0,2986	3,7	130	0,03009	2,5
-10	5,533	5,5	60	0,2488	3,6	135	0,02654	2,5
-5	4,232	5,3	65	0,2083	3,5	140	0,02348	2,4
0	3,265	5,1	70	0,1752	3,4	145	0,02083	2,4
5	2,539	5,0	75	0,1481	3,3	150	0,01853	2,3
10	1,990	4,8	80	0,1258	3,2	155	0,01653	2,3
			85	0,1072	3,2			

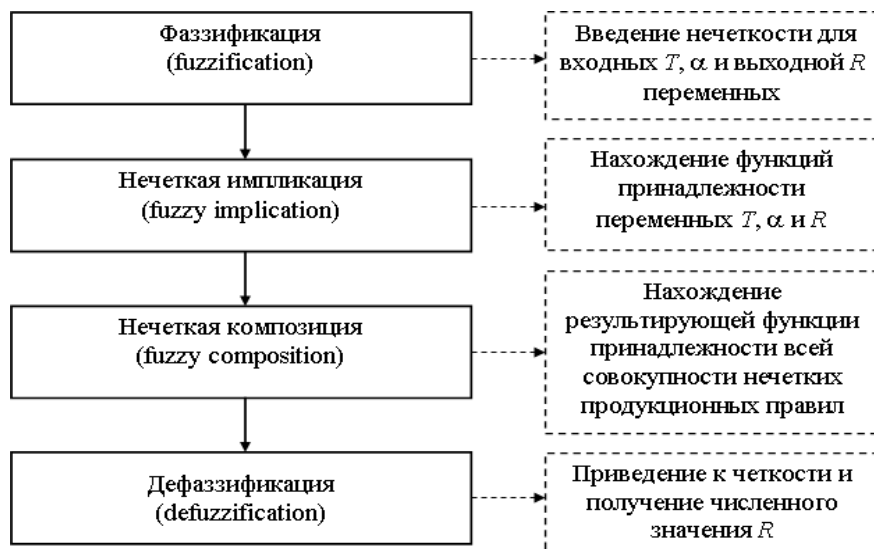


Рис. 3. Процедуры нечеткого логического вывода

Реализуем процедуру фаззификации, т.е. для заданных в численной форме входных переменных x и y рассчитаем их принадлежности к отдельным термам

$$\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_i}(y_0), i = 1, 2, \dots, N.$$

Выполним процедуру нечеткой импликации для определения функции принадлежности предпосылок каждого отдельного правила при конкретных входных сигналах x₀ и y₀:

$$\beta_i = \mu_{A_i}(x_0) \cap \mu_{B_i}(y_0), i = 1, 2, \dots, N$$

и найдем результирующие функции принадлежности каждого правила

$$\mu_i(z) = \beta_i \cap \mu_{C_i}(z), i = 1, 2, \dots, N.$$

На основе нечеткой композиции определим результирующую функцию принадлежности всей совокупности правил при входных сигналах x₀ и y₀:

$$\mu_{\Sigma}(z) = \mu_1(z) \cup \mu_2(z).$$

Выполним приведение нечеткой выходной переменной z к численному виду z₀ путем определения центра тяжести плоской фигуры, ограниченной осями координат и графиком функции принадлежности нечеткого множества с использованием, например, центроидного метода дефаззификации

$$z_0 = \frac{\int_R z \cdot \mu_{\Sigma}(z) dz}{\int_R \mu_{\Sigma}(z) dz}.$$

Таким образом, при моделировании статической R/T-характеристики NTC-термисторов можно разделить диапазон входных переменных T, α и выходной переменной R (табл. 1) и получить нечеткие термы с соответствующими им функциями принадлежности (рис. 1) для реализации отображения «вход (входы)→выход» на основе процедур нечеткого логического вывода (рис. 3).

Следует отметить, что предложенная формализация задачи аппроксимации статических характеристик полупроводниковых терморезистивных преобразователей температуры может быть реализована при построении ГХ различных первичных преобразователей с использованием соответствующей базы продукционных правил.

Выводы

1. Теоретически обоснована возможность использования моделей нечеткого логического вывода для построения нелинейных статических характеристик первичных преобразователей физических величин на примере датчиков температуры.

2. Предложена формализация задачи аппроксимации нелинейных градуировочных характеристик датчиков температуры на основе теории нечетких множеств. Задача реализована на примере аппроксимации R/T-характеристики NTC-термисторов с использованием треугольных функций принадлежности и алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани.

Список литературы

1. 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.
2. Семенов Л.А. Методы построения градуировочных характеристик средств измерения / Л.А. Семенов, Т.Н. Сирая. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 128 с.
3. Шарапов В.М. Датчики: Справочное пособие / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук и др. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
4. Сирая Т.Н. Методы конfluenceного анализа для построения линейных зависимостей // В кн.: Труды метрологии. Институты СССР. – 1979, вып. 242.
5. An implementation of the Scheffe approach to calibration using spline functions, illustrated by a pressure-volume calibration // *Technometrics*. – 1982. – Vol. 24, N3.
6. Kosko B. Fuzzy Systems as Universal Approximators / B. Kosko // *IEEE Trans. on Computers*. – 1994. – Vol. 43, №11. – P. 1329-1333.
7. Мэ́клин Э.Д. Терморезисторы: Пер. с англ. / Э.Д. Мэ́клин; под общей редакцией К.И. Мартюшова. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.

8. Библиотека электронных компонентов. Вып. 5: Термисторы фирмы SIEMENS & MATSUSHITA. – М.: ДОДЭКА, 1999. – 48 с.

9. 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 Алексей Олегович. – Таганрог, 2012. – 20 с.

10. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы: учебник / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.В. Тареев. 7-е изд., перераб и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

11. Измерение температуры при помощи NTC-термистора и микроконтроллера AVR: [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://aterlux.ru/index.php?page=article&art=ntcresistor#_h2_6.

12. Термисторы: [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://temperatures.ru/pages/termistory>.

13. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.

14. Корнеев В.В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В.В. Корнеев, А.Ф. Гареев, С.В. Васютин, В.В. Райх. – М.: Нолижд, 2000. – 352 с.

15. Федин С.С. Информационное обеспечение качества деталей машиностроения с использованием моделей нечеткого логического вывода / С.С. Федин, Н.А. Зубрецька, А.С. Гончаров // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2012. – Вып. 2(100). – С. 104-107.

16. Зубрецька Н.А. Управление стабильностью технологических процессов изготовления деталей на основе нечеткого моделирования / Н.А. Зубрецька, С.С. Федин // Системы управления, навигации и связи. – Полтава: ПНТУ, 2014. – Вып. 2 (30). – С. 42-47.

17. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М.: Горячая линия – телеком, 2004. – 143 с.

18. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб: БХВ–Петербург, 2005. – 716 с.

19. NTC thermistors for temperature measurement. Probe assemblies B57703M – EPCOS AG, 2013 – 9 p.

Поступила в редколлегию 3.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Петко, Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев.

МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

С.С. Федін, Н.А. Зубрецька, І.С. Зубрецька

На основі теорії нечітких множин запропоновано формалізацію задачі моделювання статичної R/T-характеристики напівпровідникових терморезистивних перетворювачів температури з негативним температурним коефіцієнтом опору.

Ключові слова: моделювання, градуювальна характеристика, датчик температури, термістор, нечіткі множини.

MODELING OF STATIC CHARACTERISTICS OF TEMPERATURE SENSORS BASED ON FUZZY LOGIC

S.S. Fedin, N.A. Zubretskya, I.S. Zubretskya

Based on the theory of fuzzy sets a formalization of the problem of modeling the static R/T-characteristics of semiconductor thermoresistive temperature transmitters with a negative temperature coefficient of resistance.

Keywords: modeling, calibration characteristic, temperature sensor, thermistor, fuzzy sets.