

УДК 621.43.016.4(031)

В. А. Куликов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

В. Н. Сяктерев, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

И. А. Васильев, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНЕРЦИОННОГО ОБЪЕКТА

Предложен метод градуировки и аппроксимации функций преобразования полупроводниковых термисторов. Рассмотренные методы градуировки и аппроксимации функций блоков использованы при построении реальной измерительной системы.

Ключевые слова: система измерения, полупроводниковый термистор, функция преобразования термистора, градуировка термистора.

В современных автоматизированных системах измерения в качестве первичных измерительных преобразователей (ПИП) широко используются полупроводниковые терморезисторы – термисторы. Анализ работ в области исследования и применения термисторов показывает, что в настоящее время их свойства изучены всесторонне, разработаны методы их расчета, тепловые схемы и электрические схемы включения.

В системах измерения температуры инерционных объектов используются термисторы типа СТ1-19 и аналогичные им, функция преобразования которых аппроксимируется выражением [1]

$$R_t = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (1)$$

где R_t и T – сопротивление и температура термистора, К; B и R_∞ – постоянные коэффициенты.

Нелинейность характеристики преобразования термисторов и их индивидуальность вызывает ряд проблем их применения в системах измерения температуры, так как требуется их индивидуальная градуировка с целью определения коэффициентов R_∞ и B и линеаризация характеристик для согласования их с промежуточными преобразователями.

Коэффициенты B и B_∞ определяются при двух значениях температуры путем решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_{T_1} &= R_\infty \cdot e^{\frac{B}{T_1}} \\ R_{T_2} &= R_\infty \cdot e^{\frac{B}{T_2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Поскольку выражение (1) является приближенным и процесс градуировки осуществляется с ограниченной точностью, исследовались различные варианты выбора точек градуировки для расчета коэффициентов. Установлено, что расчет по крайним точкам таблицы градуировки дает максимальную погрешность аппроксимации в 1,5...2 градуса в центре диапазона измерений. Сближение точек приводит к повышению погрешности на краях диапазона.

Снижение влияния случайных ошибок градуировки на точность аппроксимации достигается усреднением коэффициентов B и R_∞ , рассчитываемых по парам точек, взятых из таблицы градуировки. Наилучшие результаты получены при формировании пар из первой и второй половины таблицы. При незначительной случайной составляющей ошибки целесообразно отдельно аппроксимировать каждый участок между узлами градуировки. Погрешность аппроксимации в этом случае не превышает ± 1 градус, если смежные точки градуировки разнесены не более чем на 50 градусов.

В системе измерения температуры инерционного объекта полупроводниковые ПИП подключаются к промежуточному преобразователю (ПП), который преобразует сопротивление в длительность временного интервала. Градуировка такого ПП осуществляется с применением эквивалентов ПИП, например, прецизионных резисторов типа С2-29.

Резисторы разных номиналов поочередно подключаются к ПП. Длительность временных интервалов, вырабатываемых ПП, преобразуется в код, который вводится в ПК. После проведения градуировки производится аппроксимация усредненной характеристики ПП.

Рассматривались различные способы аппроксимации характеристик.

Использовался сплайн-метод [2]. Функция преобразования ПП была представлена набором кубических сплайнов:

$$f_i(x) = \frac{1}{6h_i} \left[m_i(x_{i+1} - x)^3 + m_{i+1}(x - x_i)^3 \right] + \frac{1}{h_i} \left[\left(y_i - \frac{m_i h_i^2}{6} \right) (x_{i+1} - x) + \left(y_{i+1} - \frac{m_{i+1} h_i^2}{6} \right) (x - x_i) \right], \quad (3)$$

где x_i, y_i – координаты узла градуировки; $i = 1 \dots n$ – номер узла; $h_i = x_{i+1} - x_i$; $m_i = y'(x_i)$ – вторая производная функции. В качестве функции y в выражении (3) рассматривалось сопротивление R_t , а в качестве аргумента x – временной интервал t .

При введении условия $f_i(x) = y_i$ аппроксимирующая функция сводится к системе линейных уравнений

$$m_i h_i + 2(h_i + h_{i+1})m_{i+1} + h_{i+1}m_{i+2} = 6 \left(\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right), \quad (4)$$

из которых можно найти значения производных m_i . Производные в крайних точках задаются нулевыми: $m_1, \dots, m_n = 0$.

Как оказалось, при использовании сплайн-метода для достижения требуемой точности аппроксимации нельзя произвольно задавать номиналы эквивалентов ПИП. Их значения должны быть такими, чтобы разность между соседними точками по времени t в градуировочной таблице была постоянной по диапазону

и достаточно малой. В противном случае в промежутках между узлами градуировки возникают существенные отклонения аппроксимирующей функции от аппроксимируемой с изменением знака при переходе через точку градуировки (рис. 1).

Более высокая точность аппроксимации при менее жестких требованиях к данным градуировки ПП получена с использованием аналитической аппроксимирующей функции, выведенной на основе эквивалентной схемы ПП.

ПП представляет собой релаксационный генератор, времязадающая цепь которого может быть представлена схемой на рис. 2.

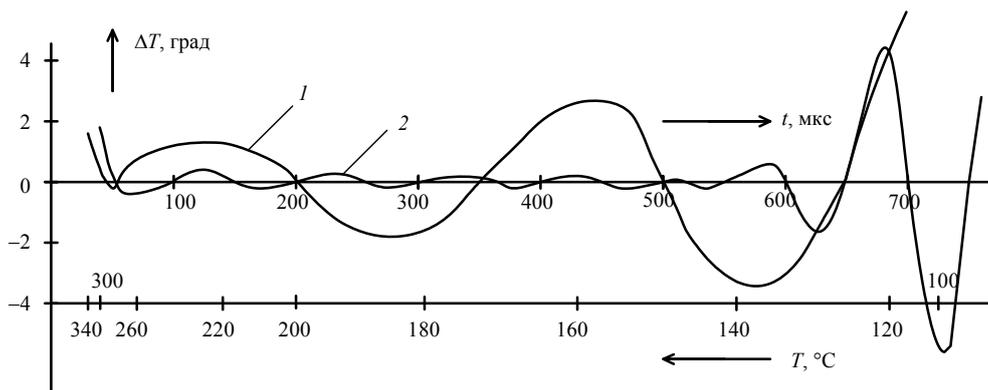


Рис. 1. Погрешность сплайн-аппроксимации при шаге градуировки: 1 – 150 мкс, 2 – 50 мкс

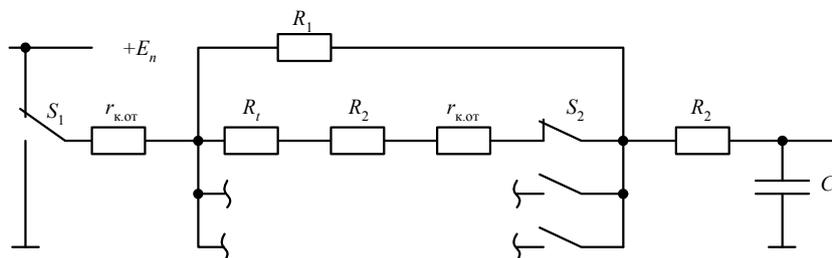


Рис. 2. Эквивалентная схема времязадающей цепи ПП

Здесь R_1 и R_2 – сопротивления корректирующих резисторов цепи термистора; R_t – сопротивление термистора (эквивалента); $r_{к.от}$ – сопротивление открытых каналов коммутаторов S_1, S_2 , обеспечивающих цикличность работы ПП.

Из схемы следует, что длительность генерируемых интервалов определяется соотношением

$$t = k \left[\frac{(R_t + R'_2)R_1}{R_1 + R'_2 + R_t} + R'_2 \right], \quad (5)$$

где t – временной интервал; k – коэффициент пропорциональности; $R'_2 = R_2 + r_{к.от}$.

Задача аппроксимации функции преобразования ПП выражением (5) сводится к задаче оптимизации и состоит в подборе значений k, R_1, R'_2 , обеспечивающих минимальную погрешность аппроксимации. Для ее решения реализован алгоритм с перебором комбинаций исходно заданных значений вели-

чин k, R_1, R'_2 и последующим сужением интервалов поиска их оптимальных значений методом половинного деления. В качестве критерия выбрано среднеквадратичное отклонение (СКО) аппроксимирующей функции от экспериментальных значений в точках градуировки. Как показали опыты, алгоритм имеет хорошую сходимость практически во всех случаях.

Рассмотренная методика аппроксимации с критерием СКО дает равномерную по диапазону погрешность аппроксимации функции $t(R_i)$. Однако при этом погрешность измерений температуры является неравномерной вследствие нелинейности характеристик ПИП и ПП (рис. 3).

Снижение ошибки на краях диапазона достигается дифференцированным заданием точности аппроксимации характеристики ПП. Для этого в формулу для расчета СКО при слагаемых отклонений вводится весовой коэффициент

$$A = \frac{B(R_1 + R'_2 + R_T)^2}{k \cdot R_1^2 \cdot R_T \left(\ln \frac{R_T}{R_\infty} \right)^2}, \quad (6)$$

учитывающий крутизну характеристик ПИП и ПП.

Введение весового коэффициента повышает чувствительность СКО на краях диапазона измерений и снижает ее в середине. В результате повышается точность аппроксимации характеристики ПП на краях и несколько снижается в середине диапазона. Аппроксимирующая функция при этом также ищется в виде (5).

Для конкретной градуировки ПП и термистора с параметрами $B = 5791$ К, $R_\infty = 1,65 \cdot 10^{-4}$ кОм в таб-

лице представлены результаты расчета абсолютной ошибки измерений температуры, вызванной погрешностью аппроксимации характеристики ПП. В таблице приняты обозначения: t, R_t – экспериментальные градуировочные данные ПП; R_{Ta1}, R_{Ta2} – расчетные значения сопротивления термистора, полученные с использованием аппроксимирующих функций для вариантов без весовых коэффициентов и с весовыми коэффициентами соответственно; T, T_{Tp1}, T_{Tp2} – температуры, рассчитанные по выражению (1) для сопротивлений R_t, R_{Ta1}, R_{Ta2} соответственно; $\Delta T_1 = T - T_{Tp1}$ – погрешность аппроксимации без весовых коэффициентов; $\Delta T_2 = T - T_{Tp2}$ – погрешность аппроксимации с весовыми коэффициентами.

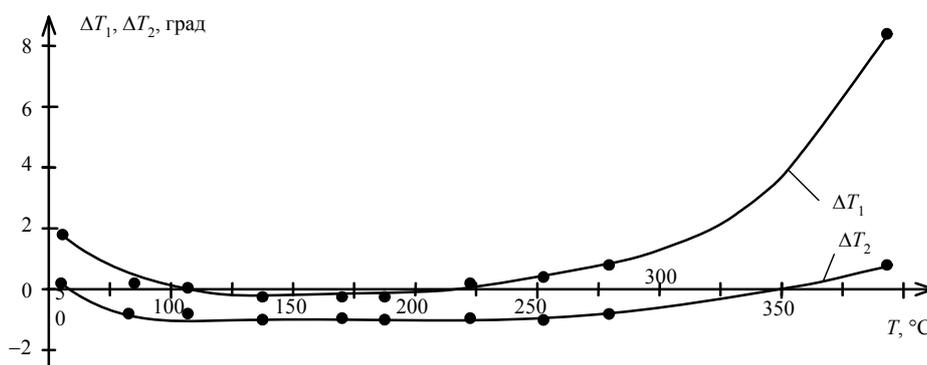


Рис. 3. Погрешность аппроксимации характеристики ПП аналитической функцией: оптимизация по СКО без весовых (ΔT_1) и с весовыми (ΔT_2) коэффициентами

Результаты расчета погрешности измерений температуры

$t, \text{мкс}$	$R_t, \text{кОм}$	$R_{Ta1}, \text{кОм}$	$R_{Ta2}, \text{кОм}$	$R_t - R_{a1}, \text{кОм}$	$R_t - R_{a2}, \text{кОм}$	$T, ^\circ\text{C}$	$T_{Tp1}, ^\circ\text{C}$	$T_{Tp2}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1, \text{град}$	$\Delta T_2, \text{град}$
40,5	1,00	1,118	1,010	-0,118	0,010	319,9	383,5	391,2	8,4	0,7
72,7	5,76	5,857	5,654	-0,097	0,106	280,6	279,7	281,6	0,9	-1,0
98,4	10,00	10,076	9,790	-0,076	0,210	252,9	252,5	253,9	0,4	-1,0
153,8	20,80	20,829	20,327	-0,029	0,473	220,1	220,0	221,1	0,1	-1,0
245,5	46,40	46,034	45,016	0,366	1,384	188,6	188,8	189,7	-0,2	-1,1
312,0	75,00	74,385	72,774	0,615	2,226	171,5	171,8	172,6	-0,3	-1,1
429,3	180,00	178,541	174,629	1,459	5,371	143,5	143,8	144,5	-0,3	-1,0
543,3	698,00	699,732	681,405	-1,732	16,595	106,5	106,5	107,1	0,0	-0,6
574,3	1651,00	1671,730	1613,803	-20,730	37,197	86,3	86,0	81,8	0,3	-0,5
593,7	7220,00	8008,767	7313,919	-788,767	-93,919	56,1	54,2	55,9	1,9	0,2

В расчетах использованы полученные в результате оптимизации коэффициенты аппроксимации функции (5):

$k = 7,847 \text{ мкс/кОм}, R_1 = 74,26 \text{ кОм};$

$R'_2 = 2,09 \text{ кОм}$ – в варианте без весовых коэффициентов;

$k = 7,996 \text{ мкс/кОм}, R_1 = 72,88 \text{ кОм};$

$R'_2 = 2,09 \text{ кОм}$ – в варианте с весовыми коэффициентами.

Графики зависимостей $\Delta T_1(T)$ и $\Delta T_2(T)$, представленные на рис. 3, построены по данным таблицы.

Рассмотренные методы градуировки и аппроксимации функций блоков использованы при создании реальной измерительной системы, построенной на базе ПК. Система прошла метрологическую

аттестацию, что подтверждено свидетельством о поверке. Реальная суммарная погрешность измерений, найденная путем сравнения с показаниями образцового средства, в диапазоне измерений $+60...+340 \text{ }^\circ\text{C}$ не превышает $\pm 1,5$ градуса. Это подтверждает эффективность предложенных методов аппроксимации функций преобразования ПИП и ПП и методики градуировки измерительной системы в целом.

Библиографические ссылки

1. Зайцев Ю. В., Марченко А. Н., Ващенко И. И. Полупроводниковые резисторы в электротехнике. – М. : Энергоатомиздат. 1988. – 136 с.
2. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. – М. : Наука. 1980. – 355 с.

V. A. Kulikov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

I. A. Vasiliev, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Identification of the Measurement System of Inertia Object Temperature

A method for calibration and approximation of conversion functions for semiconductor thermistors is proposed. The considered methods for calibration and approximation of blocks functions are used to develop the actual measuring system.

Key words: measurement system, semiconductor thermistor, conversion function of thermistor, thermistor calibration.

УДК 615.47616-073

О. В. Муравьева, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

О. П. Богдан, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Д. С. Мурашова, ООО «ИРЗ «ТЕСТ», Ижевск

Е. П. Кузнецов, кандидат медицинских наук, БУЗ УР «ГКБ № 2» МЗ УР, Ижевск

МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ОЦЕНКИ СДВИГОВЫХ МОДУЛЕЙ МЯГКИХ ТКАНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ *

Теоретически обоснована методика оценки сдвиговых модулей среды за счет оценки деформации, возникающей под воздействием внешнего статического давления с использованием В-режима ультразвукового сканирования. Предложено устройство для реализации методики, представлены результаты апробации в клинических условиях.

Ключевые слова: статическая эластография, В-режим, упругие модули, деформация, компрессия.

Эластография – ультразвуковой (УЗ) метод визуализации тканей и органов, основанный на различии упругих свойств нормальных и патологических тканей и использующий оценку их деформации при дозированной компрессии или вибрации [1]. Клинические применения эластографии: онкология, кардиология, трансплантология, пластическая хирургия и др. [2, 3].

Существует несколько схем силового воздействия для получения УЗ-изображений упругих свойств ткани: вручную механическим способом, путем использования дополнительного акустического источника; за счет использования естественных пульсаций сердца и кровеносных сосудов [2, 3]. Так, воздействие сил радиационного давления при УЗ-исследовании (УЗИ) может приводить к появлению артефакта УЗ-изображения «псевдопоток», возникающего в неоднородных жидких средах и состоящего в окрашивании изображений в режиме цветного и энергетического доплера [4, 5]. В некоторых случаях артефакт «псевдопоток» позволяет судить о физических свойствах исследуемого объекта, в частности, проводить дифференциальную диагностику неоднородных жидкостных и солидных (тканевых) образований [6].

Условно все технологии эластографии можно разделить на методы виброэластографии (динамиче-

ской эластографии) и эластографии с однократной компрессией (статической эластографии) [7]. Метод статической эластографии получил широкое распространение благодаря простоте реализации [7]. Отмечаются недостатки метода: уменьшение чувствительности с глубиной; зависимость результата от силы и направления сжатия; низкая повторяемость результатов; определенные трудности при выполнении компрессии; дискомфорт, болевые ощущения; наличие выраженных шумов и артефактов [7].

Количественная оценка упругих модулей среды в процессе проведения УЗ-исследования позволяет повысить информативность диагностического исследования, увеличить контрастность изображения и может быть использована в качестве дополнительного способа диагностики патологических образований и при определении их биомеханических свойств. В некоторых современных УЗ-сканерах, оснащенных технологией *ElastoScan*TM, существует опция «эластометрия», позволяющая получать показатели эластичности ткани в числовом выражении [7]. В [8] разработана методика количественной оценки упругих свойств ткани с помощью УЗ-доплерографии за счет визуализации и оценки виброскорости, создаваемой при воздействии внешних гармонических механических давлений. Считается, что получить числовые показатели модуля упругости ткани при

© Муравьева О. В., Богдан О. П., Мурашова Д. С., Кузнецов Е. П., 2013

Получено 03.10.13

* Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2012–2014 гг. в части проведения научно-исследовательских работ (проект № 7.1378.2011); в соответствии с разделами 2 (проект ПСР/М2/Н2.5/МВВ) и 3.1.2 (задание ГШ-1-13) мероприятий Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2012–2016 гг.