

УДК 516.511

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАТИНОВОГО
ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ АНАЛИЗА
ЗАВИСИМОСТИ ЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ОТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

К.В. Епифанцев, С.А. Наумов

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург
epifancew@gmail.com*

В данной статье представлены методы определения зависимости сопротивления термопреобразователя с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) от температуры.

Ключевые слова: термопреобразователь, статическая характеристика, аппроксимирующий полином, линейная зависимость, ТКС (температурный коэффициент сопротивления).

**RESEARCH OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS
OF PLATINUM THERMAL TRANSDUCERS
FOR ANALYSIS OF DEPENDENCE OF ITS RESISTANCE
FROM TEMPERATURE PARAMETERS**

K.V. Epifantsev, S.A. Naumov

*St. Petersburg state university of aerospace instrumentation, St. Petersburg
epifancew@gmail.com*

This article presents methods for determining the dependence of the resistance of a thermal Converter with a positive temperature coefficient of resistance (TCS) on temperature.

Key words: thermal resistor, static performance/characteristic, polynomial approximant, linear dependence, TCR (temperature coefficient of resistance).

Введение

В первую очередь терморезисторы (термопреобразователи) являются первичными преобразователями изменения температуры в электрический сигнал. Спектр применения данных элементов достаточно широк. Сегодня предприятия изготавливают миллионы различных терморезисторов, которые нашли применение в самых разнообразных сферах, а именно в промышленном оборудовании, аппаратах и установках, в системах управления космическими кораблями, двигателями внутреннего сгорания, воздушными кондиционерами и датчиками обледенения, а также в устройствах для защиты

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)

от перегрева. Терморезисторные датчики применяются в медицине для измерения локальной и общей температур тела. Терморезисторы также используются для температурной компенсации отклоняющих катушек или схем развёртки. В системах телефонной связи данная группа элементов применяется для регулирования уровня речевого сигнала, выравнивания частотной характеристики телефонных линий и др.

Термопреобразователи сопротивления являются неотъемлемой частью датчиков для автоматизированной системы глобальных производств: контроля металлургических процессов, процессов литья пластмасс, приготовления пищевой продукции, охлаждения частей машин. Все типы производств, использующие в своём технологическом цикле устройства для расплава, спекания или охлаждения, оснащаются измерительными преобразователями, способными дистанционно контролировать температуру нагревателя. Термопреобразователи представляют собой тонкую платиновую нить, намотанную на специальную слюдяную основу, вмонтированную в каналы защитного корпуса. Схема исследуемого образца представлена на рис. 1. Чувствительный элемент состоит из двух последовательно соединённых платиновых спиралей 2, к которым припаяны платиновые выводы 3.

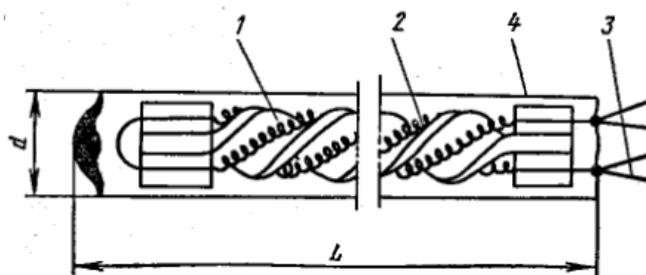


Рис. 1. Схема устройства платинового термометра сопротивления П.Г. Стрелкова:
1 — каркас; 2 — платиновая спираль; 3 — выводы; 4 — оболочка



Рис. 2. Измерительная установка по испытаниям термопреобразователей

Измерения проводились в аудитории ФБУ «Тест Санкт-Петербург» на установке, состоящей из термостата, термометра и омметра. В ходе проведения измерений была получена следующая совокупность экспериментальных данных.

Таблица 1

Экспериментальные данные

№ п/п	Температура в термостате, °С	Сопротивление термопреобразователя R_t , Ом
1	30	111,85331
2	35	113,82124
3	40	115,78231
4	45	117,74111
5	50	119,70301
6	55	121,65290
7	60	123,60246
8	65	125,55321
9	70	127,50112
10	75	129,44289

В промышленности принято использовать отдельные аппроксимации для низких и высоких температур, а именно в двух диапазонах: от -200 до 0 °С и от 0 до 630 °С. Рассмотрим последний диапазон. Каллендар-Ван Дюзен предложил следующее аппроксимационное выражение для передаточной функции платинового детектора в диапазоне высоких температур:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

где R_t — сопротивление термопреобразователя, Ом; R_0 — номинальное сопротивление термопреобразователя, Ом, при температуре 0 °С; коэффициенты A и B определяются свойствами платины (их определение и есть основная задача аппроксимации экспериментальных данных).

Так как аппроксимирующая функция (аппроксимирующая функция — функция близкая к исследуемой истинной функции) является параболой (количество точек, через которые можно провести лишь одну параболу, равно трём), то для нахождения коэффициентов R_0 , A и B необходимо решить систему трёх линейных уравнений относительно этих коэффициентов:

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_0(1 + At_1 + Bt_1^2), \\ R_{t_2} = R_0(1 + At_2 + Bt_2^2), \\ R_{t_3} = R_0(1 + At_3 + Bt_3^2), \end{cases}$$

где $R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}$ — сопротивление термопреобразователя при температуре t_1, t_2, t_3 соответственно. После некоторого преобразования можно записать

$$\begin{cases} R_0 + AR_0t_1 + BR_0t_1^2 = R_{t_1}, \\ R_0 + AR_0t_2 + BR_0t_2^2 = R_{t_2}, \\ R_0 + AR_0t_3 + BR_0t_3^2 = R_{t_3}. \end{cases}$$

Запишем данную систему уравнений в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_0 \\ AR_0 \\ BR_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{t_1} \\ R_{t_2} \\ R_{t_3} \end{pmatrix},$$

для полученных экспериментальных данных

$$R_0 \approx 99,982433 \approx 99,98243 \text{ Ом},$$

$$A = \frac{AR_0}{R_0} \approx \frac{0,397622}{99,982433} \approx 3,97692 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1},$$

$$B = \frac{BR_0}{R_0} \approx \frac{-6,421777 \cdot 10^{-5}}{99,982433} \approx -6,42291 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}.$$

Сравнивая полученные результаты со значениями из ГОСТ 6651-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний» $R_0 = 100 \text{ Ом}$, $A = 3,9690 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $B = -5,841 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$, видно, что погрешность экспериментально полученных значений невелика, и в данном случае для определения сопротивления термопреобразователя имеем следующее аппроксимирующее уравнение

$$R_t = 99,98243 \cdot (1 + 3,97692 \cdot 10^{-3}t - 6,42291 \cdot 10^{-7}t^2).$$

Составим сравнительную таблицу экспериментальных данных и данных, полученных с помощью аппроксимирующего выражения.

Таблица 2

Сравнительная таблица экспериментальных значений и значений аппроксимации

№ п/п	Температура в термостате, $^\circ\text{C}$	Сопротивление термопреобразователя R_t (эксперимент), Ом	Сопротивление термопреобразователя R_t (аппроксимация), Ом
1	30	111,85331	111,85330
2	35	113,82124	113,82054
3	40	115,78231	115,78457
4	45	117,74111	117,74538

Продолжение таблицы 2

№ п/п	Температура в термостате, °С	Сопротивление термопреобразователя R_t (эксперимент), Ом	Сопротивление термопреобразователя R_t (аппроксимация), Ом
5	50	119,70301	119,70299
6	55	121,65290	121,65739
7	60	123,60246	123,60857
8	65	125,55321	125,55655
9	70	127,50112	127,50131
10	75	129,44289	129,44286

Как видно из таблицы, отклонение данных аппроксимации от экспериментальных невелико.

Проиллюстрируем графически полученный результат.

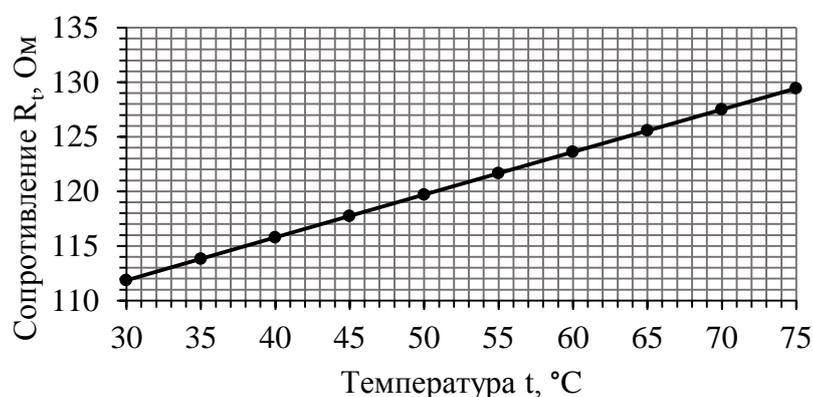


Рис. 3. График зависимости сопротивления R_t , Ом, термопреобразователя от температуры t , °С

Точками на графике изображены экспериментальные значения, а прямой линией — аппроксимирующие. Из данного графика видно, что функциональная зависимость между температурой и сопротивлением достаточно линейна. Это обусловлено очень малым значением коэффициента B при квадратном члене полинома, который обуславливает квадратичную зависимость, по сравнению с коэффициентом A при члене первой степени, который обуславливает линейную зависимость.

Рассмотрим ещё один параметр, характеризующий работу термопреобразователя сопротивления, а именно температурный коэффициент термопреобразователя сопротивления α . Он показывает относительное приращение сопротивления термопреобразователя при изменении температуры на единицу или, другими словами, температурный коэффициент α выражает

в процентах изменение абсолютной величины сопротивления при изменении температуры на 1 °С. В общем виде определяется по формуле

$$\alpha = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt}, C^{-1}$$

или

$$\alpha = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt} \cdot 100, \%$$

Для расчётного метода по экспериментальным данным используется приближённая формула

$$\alpha = \frac{1}{R_t} \frac{\Delta R_t}{\Delta t}, C^{-1}$$

или

$$\alpha = \frac{1}{R_t} \frac{\Delta R_t}{\Delta t} \cdot 100, \%$$

где R_t — сопротивление термопреобразователя, Ом; dR_t — дифференциал сопротивления термопреобразователя, Ом; dt — дифференциал температуры, °С; ΔR_t — приращение сопротивления термопреобразователя, Ом; Δt — приращение температуры, °С. В случае, если график, построенный по экспериментальным значениям, достаточно линейный, то возможно использовать первую группу формул, найдя производную этой линейной зависимости, так как в данном случае и первая и вторая группы формул идентичны. Для нахождения ТКС α по аппроксимирующей зависимости воспользуемся первыми двумя формулами, а для нахождения ТКС α по опытным данным — последними двумя. Найдём производную от

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

$$(R_t)'_t = \left[R_0(1 + At + Bt^2) \right]'_t = R_0(A + 2Bt),$$

тогда для имеющейся аппроксимирующей функции получим:

а) в начале полученной характеристики:

$$\alpha = \frac{1}{R_{t_1}} \frac{dR_t}{dt} = \frac{1}{111,85330} \cdot 99,98243 \cdot (3,97692 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 6,42291 \cdot 10^{-7} \cdot 30) \approx 3,52041 \cdot 10^{-3}, C^{-1}$$

или

$$\alpha = \frac{1}{R_{t_1}} \frac{dR_t}{dt} \cdot 100 \approx 0,352, \%$$

б) в конце полученной характеристики:

$$\alpha = \frac{1}{R_{t_{10}}} \frac{dR_t}{dt} = \frac{1}{129,44286} \cdot 99,98243 \cdot (3,97692 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 6,42291 \cdot 10^{-7} \cdot 75) \approx 2,99738 \cdot 10^{-3}, C^{-1}$$

или

$$\alpha = \frac{1}{R_{t_{10}}} \frac{dR_t}{dt} \cdot 100 \approx 0,3, \%$$

То есть для полученного аппроксимирующего полинома ТКС α будет изменяться в пределах от $\approx 0,352$ до $\approx 0,3\%$ в диапазоне температур от 30 до 75 °С.

Найдём ТКС α по экспериментальным значениям. Так как график, построенный по экспериментальным значениям, является вполне линейным, то мы можем найти производную по температуре этой линейной зависимости, а затем вычислить ТКС:

а) в начале полученных данных:

$$\begin{aligned} \alpha &\approx \frac{1}{R_{t_1}} \frac{\Delta R_t}{\Delta t} = \frac{1}{R_{t_1}} \cdot \frac{R_{t_{10}} - R_{t_1}}{t_{10} - t_1} = \frac{1}{R_{t_1}} \cdot \frac{129,44289 - 111,85331}{75 - 30} = \\ &= \frac{0,39088}{R_{t_1}} = \frac{0,39088}{111,85331} \approx 3,49458 \cdot 10^{-3}, C^{-1} \end{aligned}$$

или

$$\alpha = \frac{0,39088}{R_{t_1}} \cdot 100 \approx 0,349, \%$$

б) в конце полученных данных:

$$\alpha = \frac{0,39088}{R_{t_{10}}} = \frac{0,39088}{129,44289} \approx 3,01971 \cdot 10^{-3}, C^{-1}$$

или

$$\alpha = \frac{0,39088}{R_{t_1}} \cdot 100 = \frac{0,39088}{129,44289} \cdot 100 \approx 0,302, \%$$

То есть для полученных экспериментальных данных ТКС α будет изменяться в пределах от $\approx 0,349$ до $\approx 0,302\%$ в диапазоне температур от 30 до 75 °С. Сравнивая полученные разными методами значения — по аппроксимирующему полиному и экспериментальным данным, видно, что они отличаются между собой в районе четвёртого знака после запятой, что является приемлемым, поэтому для приближённых расчётов ТКС можно представлять зависимость сопротивления платинового термопреобразователя от температуры в виде линейной функции и пользоваться формулой

$$\alpha = \frac{1}{R_t} \cdot \frac{R_{t_n} - R_{t_1}}{t_n - t_1},$$

где R_t — сопротивление термопреобразователя, Ом; R_{t_1} — сопротивление термопреобразователя, Ом, при температуре начала измерений t_1 , °С; R_{t_n} — сопротивление термопреобразователя, Ом, при температуре окончания измерений t_n , °С.

В ходе проведения исследования была изучена статическая характеристика платинового термопреобразователя с положительным ТКС. Было выяснено, что для приближённых расчётов удобно представлять зависимость электрического сопротивления термопреобразователя от температуры в виде линейной функции, если же поставленная задача требует более точных результатов расчётных данных, то необходимо представлять статическую характеристику платинового термопреобразователя в виде полинома второй степени и методами, изложенными выше, аппроксимировать совокупность экспериментальных точек в данном диапазоне измерений.

Литература

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. Москва: Техносфера, 2005. 592 с.
2. Мэклин Э.Д. Термопреобразователи: пер. с англ. / под общей редакцией К.И. Мартюшова. М.: Радио и связь, 1983. 208 с., ил.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». 3-е изд., перераб. М.: Энергия, 1978. 704 с., ил.
4. Шефтель И.Т. Термопреобразователи. М.: 1973. 416 с.
5. Датчики теплофизических и механических параметров: справочник: в 3 т. Т. 1 (Кн. 1) / под общ. ред. Ю.Н. Коптева. М.: ИПРЖР, 1998.
6. Авторское свидетельство № 602796 РФ Термометр сопротивления // Изобретения. 1978. № 14.
7. Суханова Н.Н., Суханов В.И., Хасиков В.В., Юровский А.Я. Полупроводниковые термопреобразователи с расширенным диапазоном рабочих температур // Датчики и системы. 1999. № 7–8.