

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ RT-100

Дмитрий ДОРОНИН<sup>1\*</sup>, Юлия САНДУ<sup>1</sup>, Адриан БЫРНАЗ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Департамент Микроэлектроники и Биомедицинской Инженерии, группа MN-182, Факультет Вычислительной Техники, Информатики и Микроэлектроники, Технический Университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

<sup>2</sup>Центр Нанотехнологий и Наносенсоров, Факультет Вычислительной Техники, Информатики и Микроэлектроники, Технический Университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

\*Автор-корреспондент: Дмитрий Доронин, [dmitrii.doronin@mib.utm.md](mailto:dmitrii.doronin@mib.utm.md)

**Аннотация.** В данной работе была выведена формула для прямой конвертации из значения сопротивления в значения температуры. Для обеспечения правильного сбора данных и корректного определения температуры была разработана принципиальная схема на основе резистивного температурного датчика RT100 моста Уитстона и инструментального усилителя.

**Ключевые слова:** RT100, датчик, резистивный датчик температуры (RTD).

### Введение

Данная работа была выполнена для контроля температуры при нагреве и охлаждении подложек датчиков на основе оксидов металлов, свойства которых зачастую исследуются при положительных температурах, во много раз превышающих комнатную температуру [1-4]. Интересную область для исследования представляет изучение этих же свойств датчиков при отрицательных температурах. Для мониторинга температуры требуется высокоточный датчик способный осуществлять сбор данных в расширенном диапазоне температур. Для осуществления поставленных целей был выбран тонкопленочный платиновый резистор RT-100 [5]. При отрицательных температурах формула конвертации сопротивления в температуру имеет вид полинома четвертой степени. В данной работе приведено решение этого уравнения.

### Основная часть

Резистивные датчики температуры (RTD) — это датчики температуры, которые изменяют собственное значение сопротивления при изменении температуры измеряемого объекта [6]. Они использовались в лабораторных условиях, таким образом зарекомендовав себя в качестве высокоточных измерительных приборов.

Температурный датчик RTD произведен из тонкой пленки платины, сопротивление которой измерялось при изменении температуры среды, это привело к выводу, что есть однозначное соответствие между сопротивлением и температурой среды

Для определения температуры элемент RTD может быть подключен в составе моста Уитстона, дифференциальный сигнал от которого, будет усиливаться при помощи инструментального усилителя и будет адаптирован к одному из входов аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера.

Существует несколько конфигурации подключения датчика. Особое внимание уделяется поддержанию точности и стабильности напряжения возбуждения моста, поскольку выход моста прямо пропорционален возбуждению. Для исключения ошибки, обусловленной сопротивлением соединительных проводов резистивного моста используются 3-х и 4-х проводные конфигурации подключения [7].

Блок 1: Резистивный датчик температуры RT100 – осуществляет сбор данных в измеряемой точке.

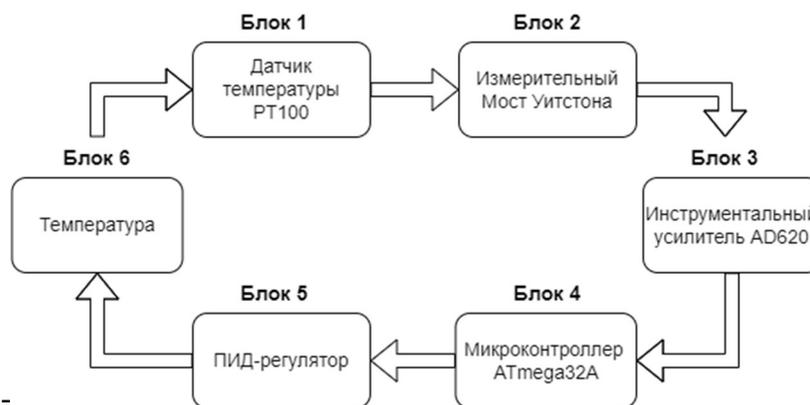


Рисунок 1. Блок-схема для считывания и регулировки температуры

Блок 2: Измерительный мост Уитстона преобразует получаемое сопротивление в электрический сигнал.

Блок 3: Инструментальный усилитель AD620, усиливающий сигнал с мостовой схемы. Основными характеристиками инструментального усилителя является: маленький температурный дрейф, высокий коэффициент усиления дифференциального сигнала, который регулируется всего одним резистором, также имеет маленькое смещение напряжения. Такие усилители применяются, когда требуются большая точность и высокая стабильность схемы, как кратковременная, так и долговременная.

Блок 4-5: Микроконтроллер, который обрабатывает сигнал с инструментального усилителя и формирует управляющий сигнал при помощи ПИД-регулятора, который задает температуру в системе.

Блок 6: Температура, получаемая от объекта измерения. Инструментальный усилитель состоит из трех операционных усилителей. Два из них выступают в качестве буфера с очень высоким входным и низким выходным сопротивлением. Как правило, коэффициент усиления этих буферов равен единице. Третий операционный усилитель подключен по дифференциальной схеме, а к его входу подается сигнал от предыдущих двух операционных усилителей. Отличительной особенностью является высокое входное сопротивление, порядка десятков мегаом, и то, что коэффициент усиления всей сборки задается при помощи только одного резистора, который подключен между отрицательными входами операционных усилителей, составляющих буфер.

Ниже приведен пример расчета моста Уитстона в паре с инструментальным усилителем.

Мостовая схема уравновешена при достижении условия  $R_1/R_2=R_3/R_4$ . Данное состояние будет поддерживаться, не завися от: величины возбуждающего сигнала, способа его возбуждения, метода считывания сигнала, импеданса схемы измерения. Положим,  $k_1=R_1/R_2$ , а величину  $R_4$ , как искомую. При минимальной измеряемой температуре значения  $R_2$  и  $R_4$  будут равны, при увеличении температуры коэффициент  $k_2 = R_3/R_4$  будет пропорционально уменьшаться, а разность напряжений между плечами моста Уитстона наоборот возрастать.

Таблица 1

Начальные данные для расчета

Характеристика	Обозначение	Значение
Входное напряжение	$V_{in}$	12.12V
Максимальное сопротивление с вывода моста	$R_{Tmax}$	247Ω
Минимальное сопротивление с вывода моста	$R_{Tmin}$	100 Ω
Минимальное значение сопротивления мостовой схемы	$R_{x0}$	6790 Ω
Разрешение аналогово-цифрового преобразователя (АЦП)	$ADC_{resolution}$	1024
Максимальное напряжение на входе АЦП	$V_{maxinadc}$	2.56V
Опорное сопротивление	$R_0$	21660 Ω
Сопротивление на входе второго усилительного каскада	$R_1$	8180 Ω

Расчет максимального и минимального выходного напряжения с мостовой схемы:

$$V_{Tmin} = \left[ V_{in} \frac{R_{Tmin}}{R_{x0} + R_{Tmin}} \right] = 0.17V \quad (1)$$

$$V_{Tmax} = \left[ V_{in} \frac{R_{Tmax}}{R_{x0} + R_{Tmax}} \right] = 0.42V \quad (2)$$

$$V_{Tmax} = V_{out} A_T = 2.56V \quad (3)$$

Коэффициент усиления первого усилительного каскада:

$$A_d = \left[ \frac{R_0}{R_1} \right] = 2.64 \quad (4)$$

$$k = \frac{V_{maxadc}}{V_{out}} = 10.25 \quad (5)$$

Сопротивление управляющего резистора:

$$R_{gain} = \frac{2R_c}{\frac{k}{A_d} - 1} = 2088.77\Omega \quad (6)$$

Промежуточное и полное усиление инструментального усилителя:

$$A_i = 1 + \frac{2R_c}{R_{gain}} = 3.87 \quad (7)$$

Максимальное выходное напряжение:

$$V_{Tmax} = V_{out} A_T = 2.56V \quad (8)$$

Расчет соотношения допустимых сопротивлений максимального выходного напряжения с мостовой схемы:

$$slope = \frac{R_{Tmax} - R_{Tmin}}{V_{Tmax} - 0} = 57.45 \quad (9)$$

Чувствительность мостовой схемы, это максимальное изменения выходного напряжения разделенное на величину возбуждения схемы. Например, если максимальное изменение выходного напряжения составляет  $100\text{ mV}$ , а напряжение питания мостовой схемы  $10\text{ V}$ , то чувствительность равна  $10\text{ mV/V}$ .

Для датчика при неотрицательных температурах формула перевода из сопротивления в значение температуры имеет вид:

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (10)$$

Для отрицательных значений температуры уравнение принимает вид:

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)) \quad (13)$$

Составляем уравнение 4-ой степени:

$$t^4 - 100t^3 + \frac{B}{C}t^2 + \frac{A}{C}t + \frac{R(t) - R_0}{CR_0} = 0 \quad (14)$$

$$a = -100 \quad b = \frac{B}{C} \quad c = \frac{A}{C} \quad d = \frac{R(t) - R_0}{CR_0} \quad (18)$$

Для приведенного выше выражения формула кубической резольвенты принимает вид:

$$y^3 - by^2 + (ac - 4d)y - a^2d + 4bd - c = 0 \quad (19)$$

Вышеприведенная формула разрешима при помощи метода Кардано, для этого нужно сделать следующую подстановку:

$$x = y + \frac{ac - 4d}{b} \quad (20)$$

$$p = \frac{(ac - 4d)^2}{3b^2} + \frac{-ad^2 + 4bd - c}{b} \quad (21)$$

$$q = \frac{-2(ac - 4d)^2}{27b^3} + \frac{(ac - 4d)(a^2d - 4bd + c)}{3b^2} \quad (22)$$

Преобразованное уравнение принимает следующий вид:

$$x^3 + px + q = 0 \quad (23)$$

Финальное решение кубического уравнения:

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 \quad (24)$$

$$\alpha = \left(\frac{-q}{2} + \sqrt{Q}\right)^{1/3} \quad (25)$$

$$\beta = \left(\frac{-q}{2} - \sqrt{Q}\right)^{-1/3} \quad (26)$$

$$y_1 = \alpha + \beta \quad (27)$$

$$y_{2,3} = -\frac{\alpha + \beta}{2} \pm i \frac{\alpha - \beta}{2} \sqrt{3} \quad (28)$$

После того, как нашли решение уравнения резольвенты, выбираем вещественные корни и подставляем их в финальное квадратное уравнение:

$$t^2 + \frac{a}{2}t + \frac{y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a^2}{2} - b + y\right)t^2 + \left(\frac{a}{2}y - c\right)t + \frac{y^2}{4} - d^2} \quad (29)$$

Подкоренное выражение является достаточно громоздким для вычисления на микроконтроллерных устройствах, имеет смысл разложить в ряд Тейлора подкоренное выражение:

$$\frac{1}{2} \sqrt{(y^2 - 4d^2)} + \frac{(ay - 2c)}{2\sqrt{y^2 - 4d^2}} t + O(t^2) \quad (30)$$

### Выводы

Благодаря выполнению данной работы стало возможно более точно измерять температуру при отрицательных температурах, не прибегая к приближенным методам вычисления. Данный расчет может быть применен, когда требуется очень точная регулировка температуры в системе. Главным минусом является тот факт, что сами вычисления являются громоздкими и не применимы в системах, где критична память.

### Примечания

1. LUPAN, O., CRETU, V., DENG, M., GEDAMU, D., PAULOWICZ, I., KAPS, S., MISHRA, Y., POLONSKYI, O., ZAMPONI, C., KIENLE, L., TROFIM, V., TIGINYANU, I., ADELUNG, R. Versatile growth of freestanding orthorhombic  $\alpha$ -molybdenum trioxide nano- and microstructures by rapid thermal processing for gas nanosensors. In: Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118(27), pp. 15068-15078. <https://doi.org/10.1021/jp5038415>
2. LUPAN, O., TROFIM, V., CRETU, V., STAMOV, I., SYRBU, N., TIGINYANU, I., MISHRA, Y., ADELUNG, R. Investigation of optical properties and electronic transitions in bulk and nano-microribbons of molybdenum trioxide. In: Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(8). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/8/085302>
3. LUPAN, O., ABABII, N., MISHRA, Y., BODDULURI, M., MAHARIU, N., VAHL, A., KRÜGER, H., WAGNER, B., FAUPEL, F., ADELUNG, R., DE LEEUW, N., HANSEN, S. Heterostructure-based devices with enhanced humidity stability for H<sub>2</sub> gas sensing applications in breath tests and portable batteries. In: Sensors and Actuators, A: Physical, 2021, 329. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112804>

4. CAI, L., ZHU, S., WU, G., JIAO, F., LI, W., WANG, X., AN, Y., HU, Y., SUN, J., DONG, X., WANG, J., LU, Q., JING, Q., LIU, B. Highly sensitive H<sub>2</sub> sensor based on PdO-decorated WO<sub>3</sub> nanospindle p-n heterostructure. In: International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(55), pp. 31327-31340. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.109>
5. PT100 резистивный датчик температуры (RTD) поддерживает диапазон экстремальных температур. [online]. [Date accessed: 26/02/2022] Accessible: [PT100 резистивный датчик температуры \(RTD\) поддерживает диапазон экстремальных температур — CNXSoft- новости Android-приставок и встраиваемых систем \(cnx-software.ru\)](#)
6. Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning, 1999 | Education | Analog Devices. [online]. [Date accessed: 26/02/2022] Accessible: [Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning, 1999 | Education | Analog Devices](#)
7. PT100 резистивный датчик температуры (RTD) поддерживает диапазон экстремальных температур. [online]. [Date accessed: 26/02/2022] Accessible: <https://cnx-software.ru/2019/09/03/pt100-rezistivnyj-datchik-temperatury-rtd-podderzhivaet-diapazon-ekstremalnyh-temperatur/>