

МРНТИ 89.25.21

<https://doi.org/10.26577/JPEOS202527347>А. Подопригора¹, Д.Т. Тастайбек^{2*},І. Жалымбетова², Д.Е. Саметов²¹Университет Штата Аризона, Аризона, США²АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан

*e-mail: dinaratastaibek@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ТЕРМИСТОРА PT100

Мониторинг состояния элементов космических аппаратов – одна из наиболее важных задач космической промышленности. Знание такого ключевого параметра, как температура, позволяет контролировать состояние критически важных компонентов ракеты. Это особенно важно для термочувствительной электроники, а также для частей ракеты, подвергающихся наибольшему термическому воздействию.

Целью данного исследования была разработка компактного и практичного решения для измерения температуры одновременно в трёх точках космического аппарата, а также создание оптимального алгоритма калибровки датчика температуры PT100, используемого в схеме, что позволило бы учесть индивидуальные характеристики датчика для более точного измерения температуры. Научная новизна работы заключается в предлагаемом новом исполнении схемы измерения температуры, нацеленной на компактность и применимость в ракетно-космической технике. О практической значимости работы свидетельствует реальное внедрение данной схемы в национальные проекты. Методология работы включает в себя разработку электронной схемы и отрисовку в редакторе топологии печатных плат EasyEDA, ее подключение, а также калибровку с помощью языка программирования C++ и среды STM32CubeIDE. В работе были использованы такие ключевые электронные компоненты, как терморезистор PT100, усилитель LM224 и микроконтроллер STM32. Результатом является готовое решение для измерения температуры элементов космических аппаратов. Его ценность заключается в применении в реальных проектах, а также в адаптируемости под аналогичные проекты за счёт простоты, компактности и высокой гибкости технических решений. Такое решение было предложено впервые, оно является шагом на пути независимости национальной космической промышленности от зачастую недоступных технологий мировых лидеров в этой области. Тем не менее, оно опирается на международный опыт, применяя и модифицируя классические формулы и схемы.

Ключевые слова: измерение температуры, терморезистор PT100, электронные схемы, проектирование электроники, космическая промышленность.

A. Podoprigora¹, D.T. Tastaibek^{2*}, I. Zhalymbetova², D.E. Sametov²¹Arizona State University, Arizona, USA²JSC «National Center of Space Research and Technology», Almaty, Kazakhstan

*e-mail: dinaratastaibek@yandex.ru

Development and calibration of an electronic circuit for measuring the temperature of elements of rocket and space technology based on the PT100 thermistor

Monitoring the condition of spacecraft components is a crucial aspect of the space industry. By monitoring key parameters such as temperature, it is possible to ensure the safety and reliability of critical rocket systems. This is particularly important for thermally sensitive electronics and rocket parts that are subjected to significant thermal stress.

The aim of this research was to develop a compact and efficient solution for simultaneously measuring temperature at three points on a rocket or spacecraft, as well as create an optimal calibration algorithm for a PT100 temperature sensor used in the system. This would allow for considering individual sensor characteristics for more accurate measurements.

The novelty of this work lies in the new design of a temperature measurement system, which has been developed with the aim of being compact and suitable for use in rocket and space technologies. The significance of this work is demonstrated by its practical implementation in national projects.

To achieve these goals, a methodology was followed that included the development of electronic circuits, rendering in the EasyEDA PCB editor, circuit connection, and calibration using C++ programming and the STM32CubeIDE software environment. Key electronic components, such as the PT100 temperature sensor, the LM224 operational amplifier, and the STM32 microcontroller, were used in this project. The result is a custom-designed solution for measuring the temperature of rocket and spacecraft parts. The value of this solution lies in its potential application in real-world projects, as well as its adaptability for similar projects due to its simplicity, compactness, and high degree of technical flexibility. This solution has been proposed for the first time and represents a step towards greater independence for the national space industry, free from the often-unattainable technologies of world leaders in the field. Nevertheless, this solution draws upon international experience by applying and adapting classical formulas and designs.

Keywords: temperature measurement, PT100 thermistor, electronic circuits, electronics design, space industry.

А. Подопригора¹, Д.Т. Тастайбек^{2*}, І. Жалымбетова², Д.Е. Саметов²

¹Аризона Мемлекеттік Университеті, Аризона, АҚШ

² «Ұлттық ғарыштық зерттеулер және технологиялар орталығы» АҚ, Алматы, Қазақстан

*e-mail: dinaratastaipek@yandex.ru

PT100 термисторының негізі зымыран-ғарыш техникасы элементтерінің температурасын өлшеуге арналған электрондық схеманы әзірлеу және калибрлеу

Ғарыш аппараттарының элементтерінің күйін бақылау – ғарыш өнеркәсібіндегі ең маңызды міндеттердің бірі. Температура сияқты негізгі параметрді білу зымыранның маңызды компоненттерінің жұмыс жағдайын бақылауға мүмкіндік береді. Бұл, әсіресе, температураға сезімтал электроника мен жоғары жылулық жүктемеге ұшырайтын зымыран бөліктері үшін аса маңызды. Осы зерттеудің мақсаты – ғарыштық-зымыран аппаратының үш нүктесінде температураны бір мезгілде өлшеуге арналған ықшам әрі тиімді шешім әзірлеу, сондай-ақ PT100 температура датчигін калибрлеудің оңтайлы алгоритмін жасау болды. Бұл әдіс датчиктің жеке сипаттамаларын ескере отырып, температураны дәлірек өлшеуге мүмкіндік береді. Жұмыстың ғылыми жаңалығы – ғарыш техникасына арналған ықшам және қолданбалы температура өлшеу схемасының жаңа түрін ұсыну. Жобаның практикалық маңыздылығы оның ұлттық жобаларда нақты қолданылғанымен расталады. Зерттеу әдістемесі электрондық схеманы әзірлеу мен оны плата сызбаларын салу EasyEDA редакторында жобалауды, сондай-ақ STM32CubeIDE ортасында C++ тілінде қосып, калибрлеуді қамтиды. Жұмыста PT100 терморезисторы, LM224 күшейткіші және STM32 микроконтроллері сияқты негізгі электрондық компоненттер пайдаланылды. Нәтижесінде ғарыш аппараттарының элементтерінің температурасын өлшеуге арналған дайын шешім жасалды. Оның құндылығы – нақты жобаларда қолданылуы және қарапайымдылығы, ықшамдығы мен техникалық икемділігі арқасында ұқсас жобаларға бейімделе алуында. Бұл шешім алғаш рет ұсынылып отыр және ол ғарыш өнеркәсібіндегі ұлттық тәуелсіздікке қол жеткізудің маңызды қадамы болып табылады. Сонымен қатар, ол халықаралық тәжірибеге сүйеніп, классикалық формулалар мен схемаларды түрлендіріп қолданады.

Түйін сөздер: температураны өлшеу, PT100 терморезисторы, электрондық схемалар, электрониканы жобалау, ғарыш өнеркәсібі.

Введение

Ввиду того, что разработка ракетно-космических технологий по всему миру не является полностью публичной отраслью, готовых опубликованных конструкций космических аппаратов нет в широком доступе. Поэтому при проектировании новых ракетных и космических установок приходится разрабатывать индивидуальные решения даже для таких, казалось бы,

простых задач, как измерение температуры различных частей ракеты. Таким образом, задача создания гибкой, подстраиваемой под индивидуальные характеристики аппарата системы измерения температуры является актуальной для казахстанской космической промышленности. Объект данного исследования – электронные схемы, предмет – конкретная схема включения термосопротивления PT100. Нашей целью было представление готового решения для индиви-

дуально проектируемой установки, а задачами, которые были поставлены для достижения этой цели были проектирование электронной схемы и её калибровка. Анализ литературных источников помог выявить основные направления работы. Тезис о необходимости создания алгоритма калибровки, выдвинутый в процессе работы, был подтвержден и реализован в практическом виде.

Температура – одна из немногих интуитивно понятных человеку физических величин. Несмотря на это, определения температуры, предложенные в физике, обычно не очень очевидны и обращаются к таким понятиям, как энтропия, цикл Карно или распределения Бозе и Ферми. Одним из самых интуитивно понятных определений температуры является, конечно, статистическое определение: температура – мера средней кинетической энергии хаотического движения частиц системы. Тем не менее, экспериментально измерить макроскопически эту величину не представляется возможным.

Приборы, измеряющие температуру, называются термометрами. На данный момент существует несколько популярных видов термометров:

Термометры расширения. Их работа основана на принципе изменения объема вещества при нагревании. В качестве рабочего тела могут использоваться жидкости, твердые тела или газовые среды, помещённые в специальную трубку, соединённую с индикаторным устройством. Такие приборы отличаются относительной простотой конструкции и не требуют внешнего источника питания, однако их точность и скорость отклика ограничены, особенно при измерении быстро меняющихся температур. Они массово используются для бытовых нужд человека, однако неприменимы в областях, где нужна точность и скорость измерений. Также их показатели сложнее поддаются оцифровке.

Термопарные термометры работают на эффекте Зеебека, при котором в цепи из двух разных металлов возникает электрическое напряжение, если их спаи находятся при разных температурах. Измеряя это напряжение, можно определить температуру рабочего спая. Такие термометры способны работать в широком диапазоне температур и подходят для агрессивных сред, но требуют калибровки и могут давать погрешности из-за внешних помех. Их преимущество – широкий диапазон и устойчивость, а недостаток – низкая точность. Они применяются

в некоторых видах лабораторного и производственного оборудования, особенно при контакте с агрессивной средой.

В специфических условиях способны работать также *радиационные термометры*. Они измеряют температуру по интенсивности теплового излучения объекта без контакта с ним. Их преимущество – возможность дистанционного измерения, недостатки – зависимость от внешних условий и излучательной способности поверхности.

Работа *термисторных термометров* основана на использовании полупроводниковых резисторов, электрическое сопротивление которых заметно меняется при изменении температуры [1]. В зависимости от типа термистора (NTC или PTC) сопротивление уменьшается или увеличивается с ростом температуры, что позволяет точно фиксировать её значение с помощью электрических измерительных схем. Такие приборы отличаются высокой чувствительностью и быстродействием [2], но имеют ограниченный диапазон измерений и могут деградировать при длительной эксплуатации в экстремальных условиях [3]. Их преимущество – высокая точность и скорость отклика, недостаток – узкий диапазон и ограниченный срок службы.

Надо отметить, что ни один из вышеперечисленных приборов не измеряет температуру напрямую. Все они используют зависимость других измеряемых величин от температуры. При таких непрямых методах неизбежно возникает погрешность. Это важно учитывать при измерении в лабораторных, научных, космических и других системах, требующих особой точности. Для космических систем термометры расширения или радиационные термометры, очевидно, не являются оптимальным решением. Выбор между термопарой и термосопротивлением несколько более труден. Сравнению условий применения и характеристик этих двух устройств посвящено немало работ, в том числе новых и зарубежных [4]. Термопары менее чувствительны к вибрациям, чем терморезисторы. Терморезисторы точнее, и они дольше держат калибровку. Помимо этого, термосопротивление не так чувствительно к помехам за счёт большего уровня выходного сигнала. Раньше считалось, что время отклика термопары меньше, чем у термосопротивления, однако есть работы, которые говорят о том, что это верно только для лабораторных условий, а в изолирующем корпусе отклик терморезисторов может быть и меньше, чем у термопар [5].

В системах, требующих точных динамических измерений температуры, особенно в космических и метеорологических ракетах, термисторные термометры определенно заняли свою нишу. Схема для измерения температуры, предложенная в данной статье, предлагается для использования в таких системах.

PT100 – один из самых популярных термисторов. Он получил широкое применение благодаря своей простоте, точности, стойкости к вибрации, коррозии и способности работать в широком диапазоне температур [6]. Он используется в термодатчиках в самых разных областях человеческой деятельности, начиная от вентиляции, хранения продуктов и медицинских лекарств [7], зеленой энергетики [8], до сбора метеорологических данных и данных с космических аппаратов [9, 10]. Зависимость его сопротивления от температуры выражается линейно:

$$R_{PT100} = R_0 (1 + \alpha T) \quad (1)$$

где:

R_{PT100} – сопротивление термистора PT100;

R_0 – сопротивление термистора PT100 при 0 °С;

α – калибровочный коэффициент;

T – температура, сообщаемая термистору системой.

Вид термистора PT100 приведен на рисунке 1. Название PT100 означает, что терморезистор изготовлен из платины, и при 0 °С имеет сопротивление 100 Ом. Платиновые термисторы давно показали себя одними из лучших, они проявляют высокую стабильность и имеют широкий для термосопротивления диапазон измеряемых температур [11]. Он способен измерять температуру в диапазоне от -200 °С до +850 °С [8]. Так как такие термисторы активно используются в различных областях техники и производства, для них существуют измеренные калибровочные значения сопротивлений и температур. Тем не менее, разница в конструкции датчиков различных производителей, а также эффект нелинейности зависимости сопротивления от температуры при высоких температурах (о котором будет сказано ниже) приводят к тому, что реальные калибровочные значения могут быть индивидуальными для каждого датчика, хотя и не сильно отличаются от широко известных.

Динамически измерять сопротивление такого термистора принято при помощи классической схемы моста Уитстона (рисунок 2).

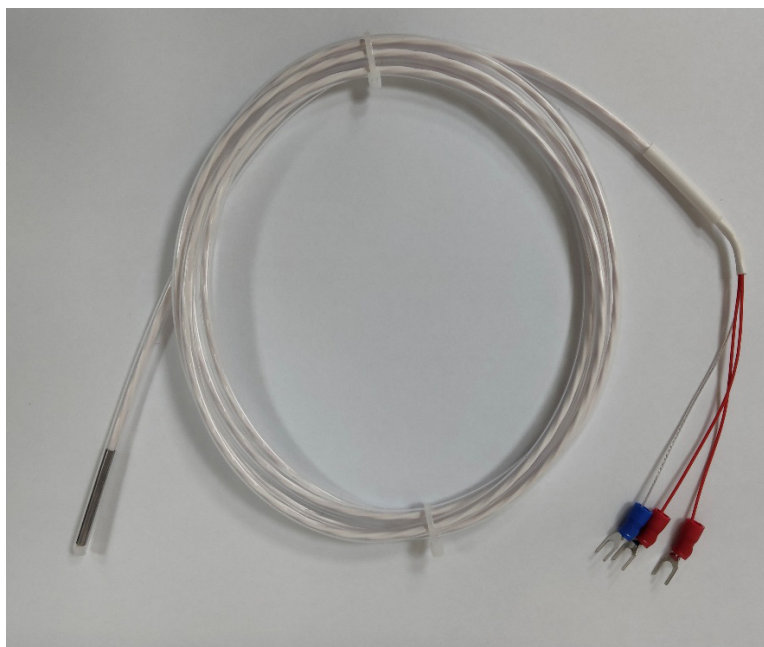


Рисунок 1 – Термистор PT100 с тремя контактами

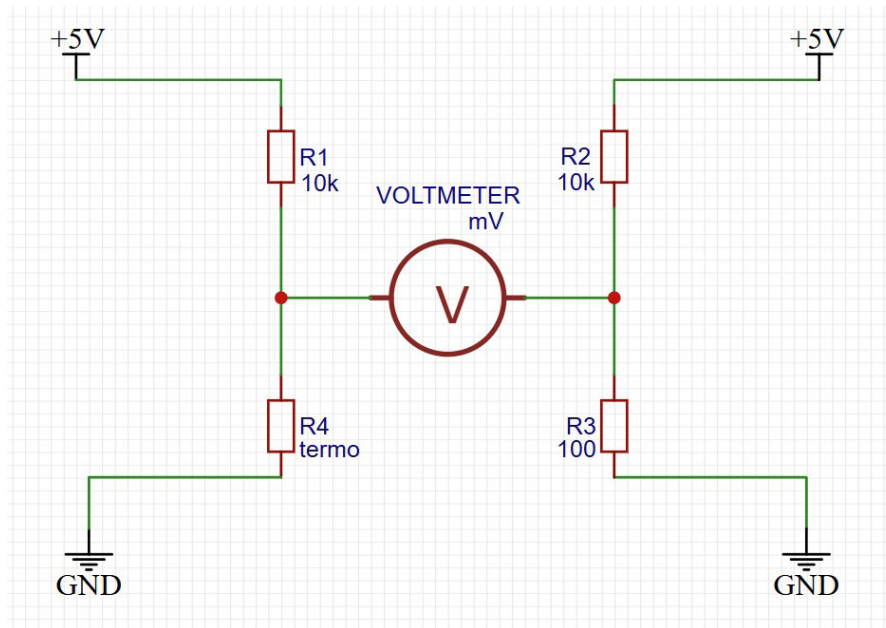


Рисунок 2 – Мост Уитстона – делитель напряжения для измерения сопротивления терморезистора

Мост Уитстона работает как делитель напряжения на четырех резисторах. При сбалансированном мосте, зная значения трех сопротивлений, четвертое можно найти по формуле

$$R_4 = R_2 * \frac{R_3}{R_1} \quad (2)$$

Если взять за R_4 сопротивление термистора PT100, можно получать данные о сопротивлении термистора в реальном времени. Тем не менее, мост Уитстона обладает рядом ограничений. Например, чем больше температура термистора, тем больше реальная зависимость сопротивления от температуры отличается от вида (1). Эта проблема – классическая и основная проблема, возникающая при работе с датчиками термосопротивления, ей озадачены многие исследователи [12, 13]. Отдельные работы [14] показывают, что влияние эффекта самонагрева может искажать значения измеряемых температур на величины от десятых до десятков градусов. Разные конструкторы предлагают разные технические решения для этой проблемы. Так, например, некоторые ученые [6, 15] приводят нелинейные уравнения для описания зависимости сопротивления от температуры резистора в разных диапазонах температур. Другая группа [16] вместо классической схемы моста Уитстона с питанием

от источника напряжения предлагает усовершенствованную схему с питанием от источника постоянного тока. Это позволяет держать очень малые значения тока, не допуская самонагрева термистора.

Методология

В качестве исследовательского материала использовалась электронная измерительная система, разработанная на основе микроконтроллера STM32. Основными компонентами схемы являлись терморезистор PT100, обеспечивающий преобразование температуры в электрическое сопротивление; операционный усилитель LM224, применяемый для усиления аналогового сигнала; а также вспомогательные элементы, обеспечивающие корректное функционирование измерительного канала. Количественные характеристики элементов (номиналы, диапазоны измерений и классы точности) подбирались в соответствии с требованиями к стабильности и точности термометрических измерений.

Работа проводилась поэтапно. На первом этапе была разработана принципиальная электрическая схема устройства и выполнена её отрисовка в EasyEDA. На втором этапе произведена программная настройка и калибровка из-

мерительной системы с использованием языка C++ и программной среды STM32CubeIDE. В ходе работы применялись классические методы проектирования и калибровки электронных схем.

Использование комбинированного подхода – аппаратного (электронная схема) и программного (калибровка в STM32CubeIDE) – обеспечило повышение точности и воспроизводимости данных.

Этапы исследования:

1. Разработка и моделирование принципиальной схемы;
2. Проектирование и отрисовка печатной платы в EasyEDA;
3. Программирование и калибровка системы в STM32CubeIDE;

Методы исследования: схемотехническое моделирование, экспериментальная сборка, программная калибровка, сравнительный анализ полученных данных.

Результаты и обсуждение

Электронная схема

В нашей статье мы предлагаем схему для калибровки зависимости сопротивления термистора PT100 от температуры. Это позволяет не стремиться к получению линейной зависимости, а найти индивидуальную калибровочную кривую для используемого температурного датчика. Схема позволяет получить аналоговый сигнал и усилить его с помощью датчика LM224. Аналоговый сигнал в последующем подается на микроконтроллер STM32. Полученный с микроконтроллера сигнал обрабатывается в системе STM32CubeIDE, алгоритм обработки будет приведен ниже. Упрощенный вид реализуемой схемы представлен на рисунке 3.

Модификация моста Уитстона с усилением сигнала датчиком LM224 приведена на рисунке 4. Эта простая схема позволяет получить сигнал для АЦП с минимальными затратами на компоненты.

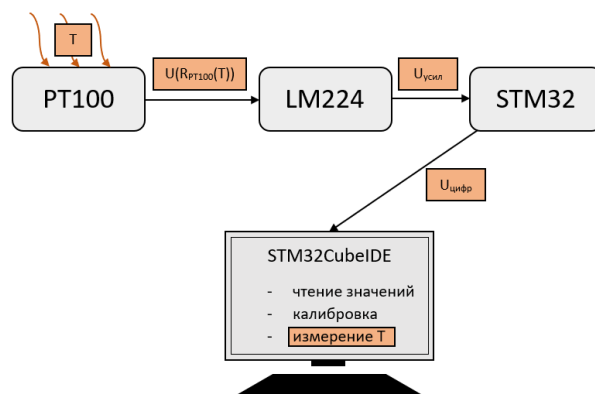


Рисунок 3 – Упрощенный вид схемы, предложенной для калибровки термистора PT100 и последующих экспериментальных измерений

Выбор операционного усилителя LM224 не случаен. Он позволяет добиться простоты и компактности схемы при возможности измерения температуры сразу тремя и даже четырьмя терморезисторами. Это может быть необходимо в переносных устройствах, в лабораторных, воздушных и космических установках, которые ограничены в размерах электронных плат и компонентов. Возможна замена усилителя на аналогичные, к примеру, LM324, что увеличивает гибкость предлагаемой схемы и её адаптируемость под индивидуальные технические решения.

Вариант данной схемы для подключения сразу трех датчиков Pt100 и усиления их через единый усилитель LM224 представлен на рисунке 5.

Обе предложенные схемы просты в сборке, а также адаптируемы под аналогичные термосопротивления, к примеру PT1000. Для этого требуется только пересчет нагрузок сопротивлений цепи. Гибкость реализации схемы позволяет внедрять её в широкий ряд лабораторных устройств самостоятельной сборки, хотя это и может быть не самым подходящим решением в случае широкомасштабного производства.

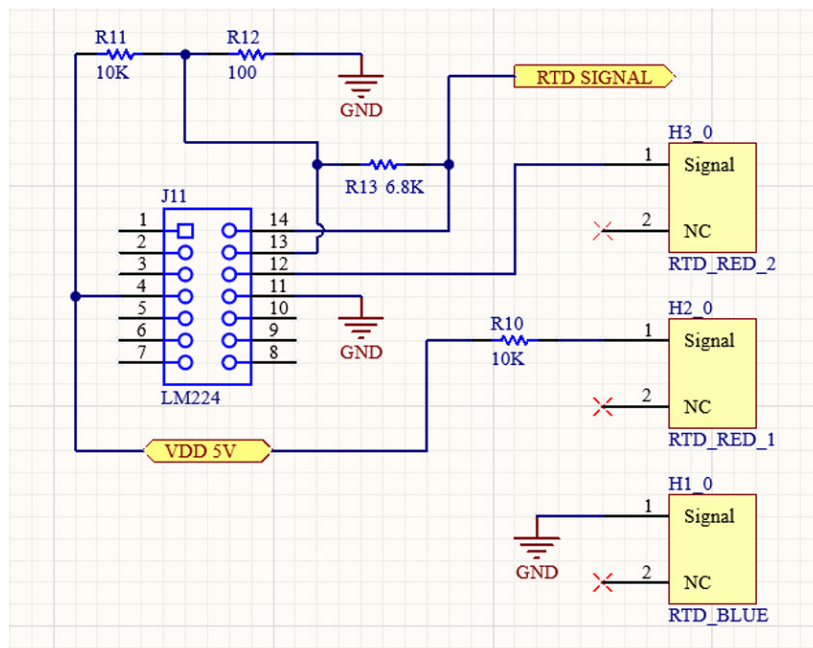


Рисунок 4 – Принципиальная электронная схема измерения температуры с помощью PT100

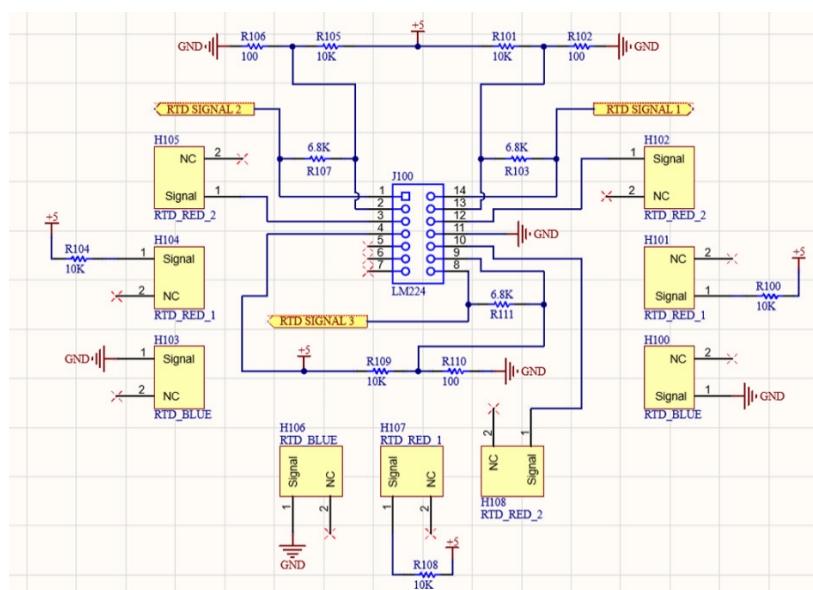


Рисунок 5 – Принципиальная электронная схема измерения температуры с помощью трёх PT100

Калибровка в STM32CubeIDE

Вышеуказанная схема позволяет получить аналоговый сигнал. Обработка этого сигнала осуществляется с помощью микроконтроллера STM32. Для взаимодействия микроконтроллера с пользователем используется интерфейс программы STM32CubeIDE. STM32CubeIDE позволяет

тактировать микроконтроллер, а также вносить дополнения и модификации в его программный код.

Программный код для микроконтроллера был написан на C++. Он содержит следующие логические блоки:

1. Создание массивов данных напряжений и температур. По умолчанию массивы заполняют-

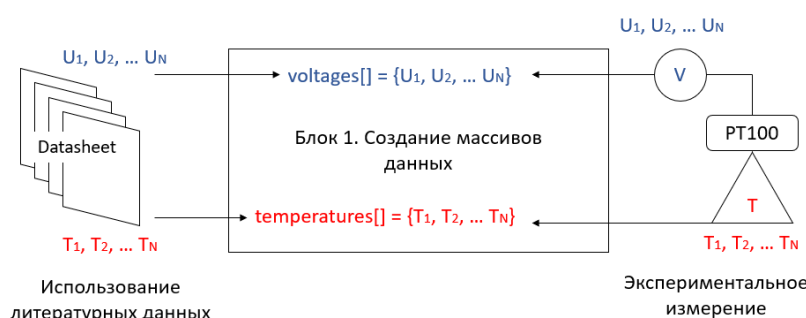
ся известными данными для PT100 из литературы, но могут быть заданы и измеренные экспериментально пользовательские значения. Выбор напряжений, а не сопротивлений обусловлен удобством обработки данных.

2. Задание калибровочной кривой с помощью каждых двух соседних точек. Между соседними точками интерполяционная кривая линейна, а на всём диапазоне значений имеет вид ломаной. Такое приближение не позволяет описать зависимость в совершенстве, однако является допустимым компромиссом между сложными нелинейными приближениями и теоретической

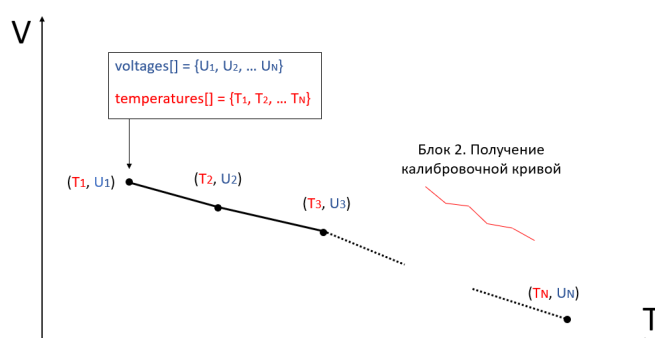
линейной зависимостью. Более того, при подстановке больших массивов значений, полученных экспериментально, она наиболее точно отражает индивидуальные характеристики каждого терморезистора.

3. Организация считывания значений напряжений и подстановка полученных значений в калибровочную кривую для получения значений температур. Данный шаг дополнен функцией расширения диапазона принимаемых от АЦП значений.

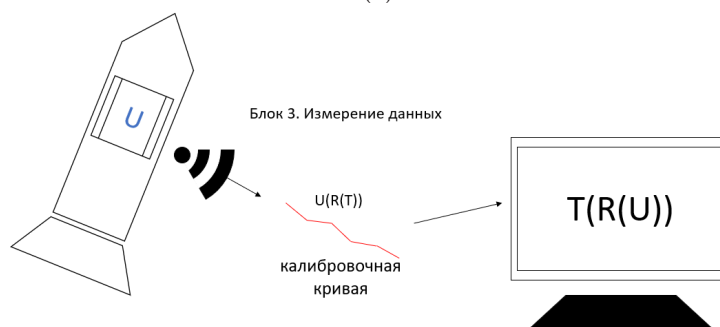
Схематический вид вышеописанных блоков приведён на рисунке 6.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 6 – (а) – Создание массивов и заполнение их значениями напряжений и температур, полученными экспериментально или из литературных источников, (б) – обработка массивов данных и получение калибровочной кривой для термистора PT100, (в) – использование калибровочной кривой для измерения значений температур.

Полученные значения температуры в дальнейшем могут быть экспортированы для дальнейшей обработки.

Заключение

Проектирование электроники для эксклюзивных ракетно-космических проектов – важная часть научной и инженерной работы. Такие индивидуальные решения не только расширяют разнообразие электронных схем, но и позволяют достигать оптимизации параметров установки, предпочтительных в каждом конкретном случае. Помимо этого, они позволяют не зависеть от недоступных технологий стран, лидирующих в ракетно-космической промышленности. Предложенная схема является гибким решением для внедрения в эксклюзивные космические установки и может быть легко пересобрана под аналогичные термисторы или операционные усилители, к примеру термистор PT1000 и усилитель LM234. Алгоритм калибровки позволяет вносить экспериментально полученные значения сопротивления и температуры для каждого тер-

мистора или использовать теоретически известные значения. Помимо гибкости, сделан упор на простоту, компактность и прочность схемы, что позволяет применять её в транспортируемых воздушных системах, метеорологических и космических ракетах, подверженных тряске и нагрузкам. Развитие национальной космической промышленности в настоящее время является актуальной и остро стоящей темой, а документирование общих принципов технических решений, внедряемых в отечественные проекты, может в будущем стать основой для больших шагов в этой области.

Благодарность, конфликт интересов

Данное исследование финансируется в рамках программно-целевого финансирования научной и(или) научно-технической деятельности, Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR249008/0224).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литературы

1. Hunt L.B. The origin of the platinum resistance thermometer // *Platinum Metals Review*. – 1980. – Vol. 24, No. 3. – P. 104–112. – DOI: 10.1595/003214080X243104112.
2. Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C.A. Review of temperature measurement // *Review of Scientific Instruments*. – 2000. – Vol. 71. – P. 2959–2978. – DOI: 10.1063/1.1305516.
3. Dornheim T., Böhme M., Kraus D. et al. Accurate temperature diagnostics for matter under extreme conditions // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13. – P. 7911. – DOI: 10.1038/s41467-022-35578-7.
4. Paydar A.Z., Zadfathollah R., Mousavi S.K., Zohuri B. Resistance temperature detector (RTD) system in nuclear power plant: a short review // *Global Journal of Research in Engineering: Electrical and Electronics Engineering*. – 2023. – Vol. 23, No. G1. – P. 1–7. – URL: <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/101569>.
5. Чистяков А. Сравнение характеристик РДТ и термопар // *Компоненты и технологии*. – 2003. – № 31. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-harakteristik-rdt-i-termopar> (дата обращения: 15.10.2025).
6. Liu J., Li Y., Zhao H. A temperature measurement system based on PT100 // *Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering (iCECE)*. – Wuhan, China, 25–27 June 2010. – P. 296–298. – DOI: 10.1109/iCECE.2010.79.
7. Almubrad T. Performance of the PT100 noncontact tonometer in healthy eyes // *Clinical Ophthalmology*. – 2011. – Vol. 5. – P. 661–666. – DOI: 10.2147/OPHTH.S19885.
8. Chesser R.J., Ezell N.D.B. Thermocouple and RTD drift due to neutron irradiation and temperature for space nuclear applications: a review // *IEEE Sensors Journal*. – 2025. – Vol. 25, No. 10. – DOI: 10.1109/JSEN.2025.3615405.
9. Małek M.T., Koczyk H. Influence of temperature sensor (Pt100) accuracy on the interpretation of experimental results of measuring temperature on the surface // *Civil and Environmental Engineering Reports*. – 2024. – Vol. 34, No. 4. – P. 1–21. – DOI: 10.59440/ceer/192146.
10. Chekichev A., Aleksandrov A., Popov R., Parushev A., Shehova D. High precision measurement of the air temperature using resistance temperature detector Pt100 sensor // *Proceedings of the 2025 19th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. – Sofia, Bulgaria, 19–21 June 2025. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/ELMA65795.2025.11083416.
11. Claggett T.J., Worrall R.W., Clayton W.A., Lipták B.G. Resistance temperature detectors (RTDs) // *Temperature Measurement*. – 1st ed. – Boca Raton: CRC Press, 1993. – P. 10.
12. Li J., Pei H., Kochan O., Wang C., Kochan R., Ivanyshyn A. Method for correcting error due to self-heating of resistance temperature detectors suitable for metrology in Industry 4.0 // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – Art. 7991. – DOI: 10.3390/s24247991.
13. Kochan O., et al. Correcting measurement error due to heating by operating current of resistance temperature detectors // *Proceedings of the 2023 14th International Conference on Measurement*. – Smolenice, Slovakia, 2023. – P. 296–299. – DOI: 10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164351.

14. Hwang I., Kim J., Bae S., Park W., Park G. Self-heating and wire resistance effects in temperature measurement using RTD sensors // *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*. – Jeju, Korea, 17–18 May 2018.
15. Wang W., Yang M., Yu L., Liu D. Design of PT100 high-precision temperature measurement systems based on third-order model // *Instrumentation Science & Technology*. – 2020. – Vol. 48, No. 2. – P. 118–127. – DOI: 10.1080/00150193.2020.1760616.
16. Chauhan J., Neelakantan U. An experimental approach for precise temperature measurement using platinum RTD PT1000 // *Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical, Electronics and Optimization Techniques (ICEEOT)*. – Chennai, India, 2016. – P. 3213–3215. – DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7755297.

References

1. L.B. Hunt, *Platinum Metals Rev.* 24 (3), 104–112 (1980). <https://doi.org/10.1595/003214080X243104112>
2. P.R.N. Childs, J.R. Greenwood and C.A. Long, *Rev. Sci. Instrum.* 71, 2959–2978 (2000). <https://doi.org/10.1063/1.1305516>
3. T. Dornheim, M. Böhme, D. Kraus et al., *Nat. Commun.* 13, 7911 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35578-7>
4. A.Z. Paydar, R. Zadfathollah, S.K. Mousavi and B. Zohuri, *Glob. J. Res. Eng.: Electr. Electron. Eng.* 23 (G1), 1–7 (2023). <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/101569>
5. A. Chistyakov, *Komponenty i Tekhnologii* 31 (2003). <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-harakteristik-rdt-i-termopar>
6. J. Liu, Y. Li and H. Zhao, *Proc. 2010 Int. Conf. on Electrical and Control Engineering (iCECE)*, Wuhan, China, 296–298 (2010). <https://doi.org/10.1109/iCECE.2010.79>
7. T. Almuhrad, *Clin. Ophthalmol.* 5, 661–666 (2011). <https://doi.org/10.2147/OPHTH.S19885>
8. R.J. Chesser and N.D.B. Ezell, *IEEE Sens. J.* 25 (10) (2025). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3615405>
9. M.T. Malek and H. Koczyk, *Civ. Environ. Eng. Rep.* 34 (4), 1–21 (2024). <https://doi.org/10.59440/ceer/192146>
10. A. Chekichev, A. Aleksandrov, R. Popov, A. Parushev and D. Shehova, *Proc. 19th Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, Bulgaria, 1–4 (2025). <https://doi.org/10.1109/ELMA65795.2025.11083416>
11. T.J. Claggett, R.W. Worrall, W.A. Clayton and B.G. Lipták, *Temperature Measurement*, CRC Press, Boca Raton (1993), p. 10.
12. J. Li, H. Pei, O. Kochan, C. Wang, R. Kochan and A. Ivanyshyn, *Sensors* 24, 7991 (2024). <https://doi.org/10.3390/s24247991>
13. O. Kochan et al., *Proc. 14th Int. Conf. on Measurement*, Smolenice, Slovakia, 296–299 (2023). <https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164351>
14. I. Hwang, J. Kim, S. Bae, W. Park and G. Park, *Trans. Korean Nucl. Soc. Spring Meeting*, Jeju, Korea (2018).
15. W. Wang, M. Yang, L. Yu and D. Liu, *Instrum. Sci. Technol.* 48 (2), 118–127 (2020). <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1760616>
16. J. Chauhan and U. Neelakantan, *Proc. 2016 Int. Conf. on Electrical, Electronics and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, India, 3213–3215 (2016). <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755297>

Сведения об авторах:

Подопригора Андрей – студент Университета штата Аризона (Аризона, США, e-mail: podoprighora04@gmail.com).
 Тастайбек Динара Темірхановна (корреспондентный автор) – научный сотрудник АО «НЦКИТ» (Алматы, Казахстан, e-mail: dinaratastaipek@yandex.ru).
 Жалымбетова Іңкәр – инженер-конструктор АО «НЦКИТ» (Алматы, Казахстан, e-mail: i.zhalymbetova@spacceres.kz).
 Саметов Диас Ерікұлы – научный сотрудник АО «НЦКИТ» (Алматы, Казахстан, e-mail: d.sametov@spacceres.kz).

Information about the authors:

Andrey Podoprighora – student at Arizona State University (Arizona, USA, e-mail: podoprighora04@gmail.com)
 Dinara Temirkhanovna Tastaybek (corresponding author) – researcher at JSC «NCKIT» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: dinaratastaipek@yandex.ru);
 Inkar Zhalymbetova – design engineer at JSC «NCKIT» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: i.zhalymbetova@spacceres.kz)
 Dias Erikuly Sametov – researcher at JSC «NCKIT» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: d.sametov@spacceres.kz)

Авторлар туралы мәлімет:

Подопригора Андрей – Аризона штаты университетінің студенті (Аризона, АҚШ, e-mail: podoprighora04@gmail.com)
 Тастайбек Динара Темірхановна (корреспондент автор) – АҚ «НЦКИТ» ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: dinaratastaipek@yandex.ru)
 Жалымбетова Іңкәр – АҚ «НЦКИТ» инженер-құрастырушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: i.zhalymbetova@spacceres.kz)
 Саметов Диас Ерікұлы – АҚ «НЦКИТ» ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: d.sametov@spacceres.kz)

Поступила на рассмотрение 20.10.21

Принята 08.12.25