

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ И ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Введение

Терморезисторы представляют собой полупроводниковые приборы, электросопротивление которых сильно зависит от температуры. Благодаря этому они получили широкое применение в качестве термопреобразователей в системах теплового контроля и термостабилизации, а также пожарных сигнализациях и измерителях мощности СВЧ излучения [1]. Поскольку терморезисторы обладают нелинейной зависимостью сопротивления от температуры и разбросом параметров (даже в пределах одной партии), экспериментальное определение характеристик конкретного терморезистора в требуемом температурном диапазоне является очень важным для практического их применения. Кроме того, при условии «жесткой» эксплуатации терморезистора его термоэлектрические характеристики изменяются со временем. Поэтому существует необходимость в недорогом и компактном автоматизированном измерительном комплексе, позволяющем производить калибровку и контролировать параметры терморезисторов в процессе работы.

Для решения поставленной задачи необходимы бюджетные полнофункциональные устройства, обладающие высокой вычислительной мощностью, компактностью и малым энергопотреблением. Этим требованиям удовлетворяют микроконтроллеры. Из всего многообразия микроконтроллерных устройств, представленных на рынке, выделяется программно-аппаратная платформа Arduino [2], основными преимуществами которой являются: простота освоения, «открытость», кроссплатформенность, стоимость и минимальные требования к наличию дополнительных элементов. Для данной платформы существует огромное количество недорогих датчиков и различных дополнительных модулей [2, 3]. Arduino – это плата, содержащая микроконтроллер, элементы обвязки и интерфейсы ввода-вывода для взаимодействия с другими устройствами. Программирование микроконтроллера осуществляется через интерфейс USB в среде разработки Arduino IDE.

В данной работе показана возможность использования Arduino Uno для исследования температурной зависимости сопротивления терморезистора и определения его характеристик: температурного коэффициента сопротивления, постоянной времени и коэффициентов, входящих в уравнение Стейнхарта – Харта. Плата Arduino Uno содержит 14 цифровых входов/выходов, шесть из которых поддерживают широтно-импульсную модуляцию, шесть аналоговых входов, тактовая частота микроконтроллера 16 МГц, 32 Кбайт flash-памяти команд и 2 Кбайт SRAM-памяти данных.

Экспериментальная установка и режимы ее работы

Структурная схема установки для определения характеристик терморезисторов приведена на рис. 1. Для изменения температуры исследуемого образца используется элемент Пельтье (TEC1-12706), подключенный к мощному блоку питания. На верхней стороне элемента Пельтье зафиксированы терморезистор и цифровой термометр (DS18B20), который измеряет температуру элемента Пельтье, и передает полученные значения на Arduino по однопроводному интерфейсу (1-Wire). Управление TEC1-12706 осуществляется релейным модулем и полевым транзистором IRFZ44N, на затвор которого подается управляющее напряжение с ЦАП MCP 4725. Напряжение на выходе ЦАП регулируется платой Arduino, используя последовательный протокол обмена данными (I²C). Релейный модуль задает режим рабочей стороны элемента Пельтье – нагревание или охлаждение. Включение реле происходит по низкому уровню цифрового сигнала, поступающего с платы Arduino. Поскольку одновременно может работать только одно из двух реле, то на реле 1 (P1) сигнал

подается через логический инвертор. Исследуемый терморезистор подключается одним выводом к общему проводу (земле), а вторым, через сопротивление 10 кОм, к цифровому выводу Arduino. В процессе измерения сопротивления на нем появляется логическая единица, что позволяет минимизировать самонагревание исследуемого терморезистора. Для повышения точности оцифровки сигнала 10-битным АЦП Arduino используется перестраиваемый источник опорного напряжения. По полученным значениям напряжения на исследуемом терморезисторе микроконтроллер рассчитывает его сопротивление.

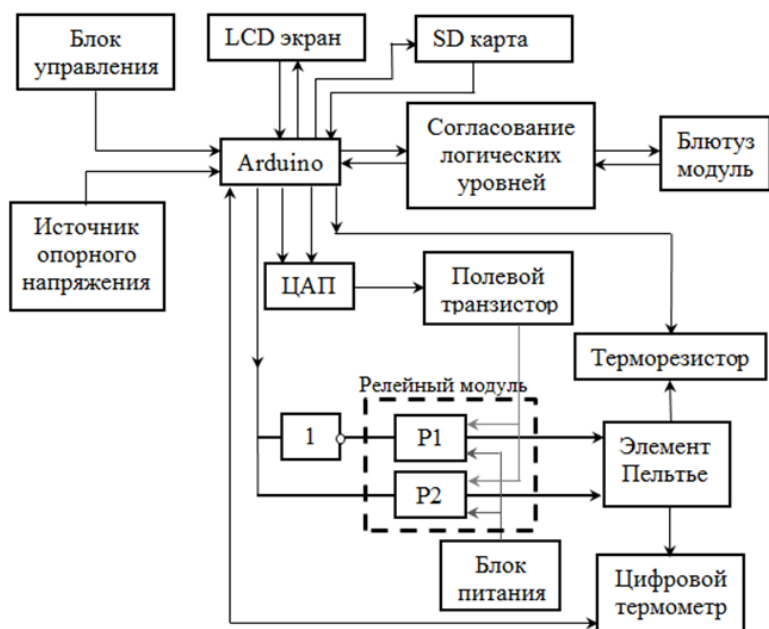


Рис. 1. Структурная схема установки

Для отображения полученной информации установка оснащена жидкокристаллическим экраном (LCD1602), подключенным к плате Arduino через I²C модуль. На экране выводится следующая информация: температура элемента Пельтье, сопротивление терморезистора, режим работы реле, управляющее напряжение на выходе ЦАП и время, прошедшее с момента изменения этого напряжения. Управление установкой происходит с помощью блока управления, состоящего из инкрементального энкодера, подключенного к портам аппаратного прерывания Arduino, и трех тактовых кнопок. Вращение энкодера позволяет изменять напряжение на элементе Пельтье. Короткое нажатие

на кнопку энкодера записывает данные, отображаемые на LCD экране, на карту памяти, подключенную к плате Arduino по последовательному периферийному интерфейсу (SPI). Длительное нажатие ($t > 2$ с) на кнопку энкодера переключает релейный модуль. Две тактовые кнопки служат для запуска двух режимов работы установки: автоматического измерения сопротивления терморезистора в заданном диапазоне температур и измерения постоянной времени. При запуске этих режимов на экране указывается время до окончания режима измерений. Третья тактовая кнопка служит для входа и выхода в меню настройки – шаг изменения напряжения на выходе АЦП в ручном режиме работы, температурный диапазон и число точек измерений в автоматическом режиме, а также режим измерения постоянной времени (нагревание или охлаждение терморезистора, число точек и длительность измерения). Изменение и выбор необходимой величины производится путем вращения энкодера и короткого нажатия его кнопки. При необходимости измененные настройки можно сохранить в EEPROM платы Arduino путем длительного нажатия кнопки энкодера.

Измерительный комплекс может работать в следующих режимах:

- 1) *автоматический* – установка управляется и обменивается данными с компьютером по специально написанной программе. Измеряется сопротивление и температура терморезистора в заданном температурном интервале, рассчитывается температурный коэффициент сопротивления и выполняется градуировка терморезистора;
- 2) *автономный автоматический* – измерение сопротивления в указанном диапазоне температур, при этом данные записываются на SD карту;
- 3) *ручной* – устанавливается температура терморезистора и измеряется его сопротивление;
- 4) *режим обработки* – установка подключается к компьютеру и выполняется обработка данных, записанных на SD карту;
- 5) *режим определения постоянной времени терморезистора* – измерение зависимости

температуры терморезистора от времени при его нагревании или свободном охлаждении в воздухе. Данные одновременно поступают на SD карту и USB порт компьютера.

Для дистанционного управления в ручном и автономном режимах работы используется смартфон с операционной системой Android, сопряженный с установкой с помощью Bluetooth модуля, подключенного к Arduino через преобразователь логических уровней. Дублирование блока управления и LCD экрана установки на смартфоне осуществляется с помощью специально написанной программы в среде визуальной разработки Android приложений App Inventor 2.

Результаты и их обсуждение

При включении реле 1 и подаче на элемент Пельтье максимального напряжения в 12 В его нижняя сторона, зафиксированная на радиаторе, начинает нагреваться, а верхняя – охлаждаться. Температура элемента Пельтье и сопротивление терморезистора изменяются со временем (рис. 2, *a*, *б*) и спустя $t = (60 - 70)$ с после начала охлаждения становятся постоянными. При дальнейшем охлаждении $t \geq (90 - 100)$ с температура и сопротивление изменяются из-за недостаточного охлаждения горячей стороны элемента Пельтье. Для повышения эффективности охлаждения при максимальной мощности работы элемента Пельтье используется дополнительный вентилятор, который закреплен на боковой стороне радиатора и включается автоматически (что увеличивает временную протяженность плато на рис. 2, *б*).

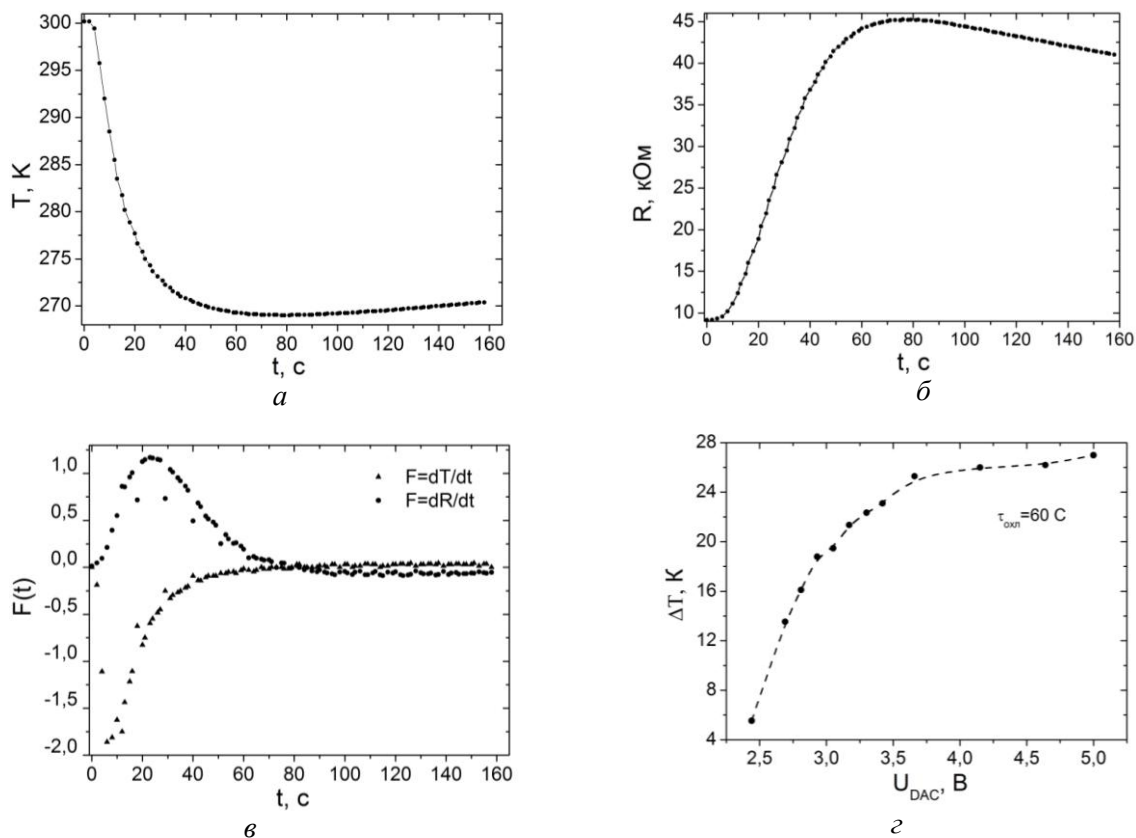


Рис. 2. Исследование характеристик терморезистора и элемента Пельтье при охлаждении: *a* – временная зависимость температуры элемента Пельтье; *б* – временная зависимость сопротивления терморезистора (R); *в* – временная зависимость производных температуры элемента Пельтье и сопротивления терморезистора; *г* – зависимость ΔT для элемента Пельтье от управляющего напряжения U_{DAC} на выходе АЦП ($\tau_{охл}$ – время охлаждения)

Из рис. 2, *в* видно, что в процессе охлаждения производные сопротивления и температуры по времени обращаются в нуль в интервале $t = (75 - 85)$ с. Это означает, что элемент Пельтье и терморезистор находятся в состоянии термодинамического равновесия и их температуры одинаковы. Поэтому параметры терморезистора измерялись через $t = 80$ с после подачи или изменения напряжения на элементе Пельтье.

Минимальная температура охлаждаемой стороны элемента Пельтье зависит от температуры окружающей среды и управляющего напряжения на выходе АЦП (рис. 3, з). При максимальном управляющем напряжении (5 В) разность температур ΔT окружающей среды и охлаждаемого элемента Пельтье составила $\Delta T \approx 27$ К. Если переключить релейный модуль (включить Р2), то верхняя сторона элемента Пельтье начинает нагреваться, достигая температуры $T_{\text{верх}} = 353$ К.

В работе исследовалось сопротивление терморезистора, находящегося в герметичной металлической капсуле, в диапазоне температур $T = (265 - 323)$ К (рис. 3). Было установлено, что при протекании через терморезистор электрического тока мощностью $P = 18$ мВт в течение $t = 7$ минут его сопротивление изменяется на $\delta R = 4\%$ (температура увеличивается на 0,8 К). В измерительной установке максимальная мощность, которая рассеивалась на терморезисторе $P_{\text{max}} \leq 0,5$ мВт и минимальное время одного измерения 10 с, поэтому самонагреванием терморезистора в процессе измерений можно пренебречь.

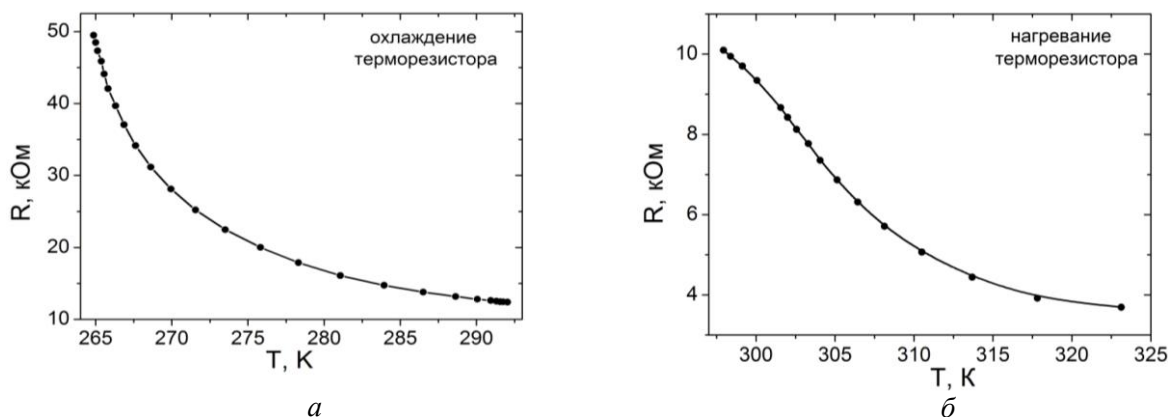


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления терморезистора

Полученные экспериментальные данные поступают на компьютер, где по специально разработанной программе производится: 1) расчет температурного коэффициента сопротивления [1] $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ в исследуемом диапазоне температур (рис. 4, а); 2) аппроксимация экспериментальных данных (рис. 4, б) согласно алгоритму Левенберга – Марквардта [4] для определения коэффициентов A, B, C , входящих в уравнение Стейнхарта – Харта [5]:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C \ln^3 R. \quad (1)$$

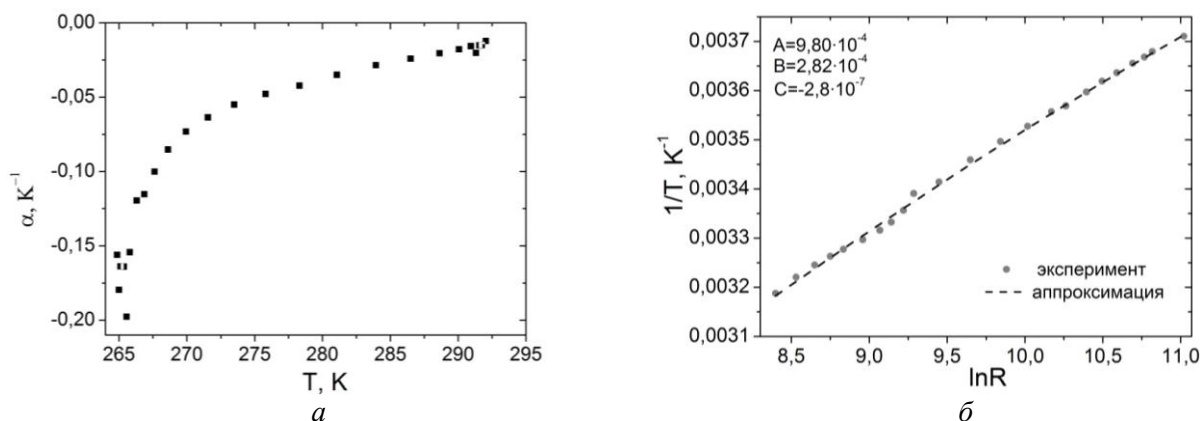


Рис. 4. Определение характеристик терморезистора: а – зависимость $\alpha(T)$ при охлаждении терморезистора; б – нелинейная аппроксимация функции $T^{-1} = f(\ln R)$

После градуировки терморезистора (нахождения коэффициентов A, B, C) с помощью уравнения (1) можно вычислять температуру терморезистора T , зная его электрическое

сопротивление, т.е. использовать терморезистор в качестве аналогового термометра, имеющего высокую чувствительность и устойчивость к механическим воздействиям.

Тепловая инертность терморезистора численно характеризуется постоянной времени τ – это промежуток времени, в течение которого температура терморезистора изменится на 63% (в e раз) от разности температур терморезистора и окружающей среды [1]. Постоянная времени зависит от конструкции и размеров терморезистора, а также от теплопроводности среды, в которой он находится. Для определения τ образец нагревается до определенной температуры, величина которой задается программно или в меню настроек. Затем элемент Пельтье выключается, и терморезистор перемещается в спокойную воздушную среду. В процессе остывания сопротивление терморезистора измеряется через одинаковые промежутки времени и с помощью уравнения (1) рассчитывается его температура. Данные одновременно поступают на SD карту и компьютер, на котором визуализируются результаты измерений (рис. 5, а) и выполняется линейная аппроксимация экспериментальных данных (рис. 5, б) по методу наименьших квадратов. Постоянная времени терморезистора численно равна котангенсу угла наклона прямой (рис. 5, б) к оси абсцисс.

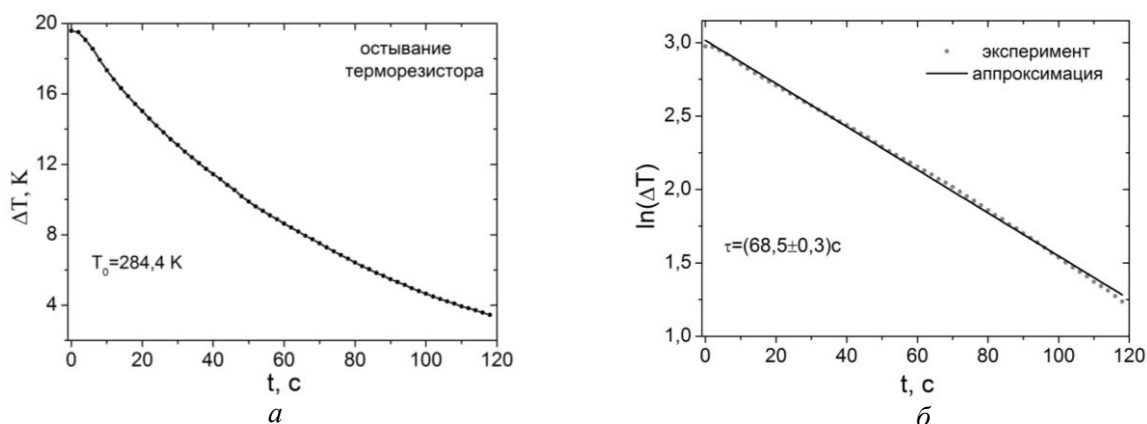


Рис. 5. Экспериментальные данные для определения постоянной времени терморезистора: а – временная зависимость разности температур ΔT терморезистора и температуры окружающей среды (T_0 – температура окружающей среды); б – аппроксимация экспериментальных данных

В измерительном комплексе также предусмотрен режим определения постоянной времени в процессе нагревания терморезистора.

Выводы

Разработан компактный и низкобюджетный (стоимость деталей 15\$) автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий: исследовать температурную зависимость терморезистора, определять постоянную времени и температурный коэффициент сопротивления, выполнять градуировку терморезистора. Представленный комплекс может быть использован в учебном процессе в качестве лабораторной установки и для разработки различных устройств на базе терморезисторов.

Список литературы:

1. Меклин Э.Д. Терморезисторы ; пер. с англ. ; под общей ред. К. И. Мартюшова. – Москва : Радио и связь, 1983. – 208 с.
2. Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб. : БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.
3. Карвинен Т., Карвинен К., Валтокар В. Делаем сенсоры: Проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi ; пер. с англ. – Москва : ООО И.Д.Вильямс, 2015. – 432 с.
4. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1963. – V. 11, № 2. – P. 431–441.
5. Steinhart J.S., Hart S.R. Calibration curves for thermistors // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. – 1968. – V. 15, №4. – P. 497–503.

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

Поступила в редколлегию 10.08.2018