

Методика и аппаратно-программный комплекс для автоматизированной калибровки средств измерений температуры с беспроводным интерфейсом

Ю. И. ШТЕРН, Я. С. КОЖЕВНИКОВ, Р. Е. МИРОНОВ, М. Ю. ШТЕРН,
И. С. КАРАБАЕВ

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия,
e-mail: r.e.mironov@gmail.com

Предложен и изготовлен автоматизированный комплекс для исследования и калибровки измерителей температуры с беспроводным интерфейсом, предназначенных для дистанционного мониторинга температуры с накоплением и передачей информации по радиоканалу. Разработаны методика калибровки данных измерителей и аппаратно-программные средства ее проведения в автоматическом режиме.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, методика автоматизированной калибровки.

The automated complex for the study and calibration of temperature measuring instruments with wireless interface designed for remote of temperature monitoring with information transfer and storage by radio channel is developed and produced. The method of measuring instruments data calibration and the hardware — software means of its realization in automatic mode are developed.

Key words: hardware-software complex, automated calibration procedure.

В настоящее время, когда использование современных энергосберегающих технологий становится повсеместным, особенно актуален постоянный и точный контроль температуры в системах энергоснабжения при производстве, переработке, хранении и транспортировке различной продукции. Для этих целей является перспективным дистанционный беспроводной мониторинг температуры с накоплением и передачей информации по радиоканалу [1, 2].

Развитие современных технологий, использующих прецизионные методы измерений температуры, сопровождается постоянным ужесточением требований к качеству измерений, выдвигая на первый план такие характеристики, как точность, стабильность и воспроизводимость. Для обеспечения высокой точности средства измерений (СИ) температуры должны периодически подвергаться поверке и калибровке. В условиях массового производства эту проблему невозможно решить без разработки методик калибровки и создания автоматизированных комплексов, оснащенных современными аппаратно-программными средствами.

Один из основных методов градуировки и поверки высокоточных СИ температуры — метод реперных точек, который применяется в том числе и для градуировки эталонных платиновых термометров сопротивления и предусмотрен Международной температурной шкалой (МТШ-90) [3]. Несмотря на высокую точность, использование такого метода нецелесообразно при поверке эталонных СИ, так как связано с использованием дорогостоящих ячеек с термометрическим материалом и специального оборудования. Наиболее часто при производстве СИ температуры их поверку и калибровку проводят методом непосредственного сличения с высокоточными измерителями температуры. Этот метод

является оптимальным с точки зрения обеспечения необходимой точности и экономичности и учтен при разработке методики калибровки СИ температуры с беспроводным интерфейсом.

Термодатчиком в беспроводных измерителях температуры (ИТБ) служит стабильный, обладающий хорошей воспроизводимостью параметров, платиновый тонкопленочный терморезистор Pt-1000 (класс допуска В). Проведенные фирмой Heraeus Sensor Technology испытания показали, что при эксплуатации этих терморезисторов в течение 5 лет при 200 °С изменение электрического сопротивления R_0 при 0 °С составляет менее 0,04 %. Платиновые тонкопленочные термометры сопротивления могут быть использованы для измерений температуры в интервале от –196 до +500 °С.

Точность измерений температуры электронными термометрами во многом определяется математической моделью, описывающей температурные изменения физических параметров датчиков. Однако зависимость сопротивления платины от температуры не удается выразить достаточно простой функцией, общей для всей области применения платинового термометра. Математическая модель для температур выше тройной точки воды по стандартному полиному девятой степени и функциям отклонения, предложенная в МТШ-90, чрезвычайно сложна для реализации в электронных термометрах. Таким образом, при измерениях температуры с использованием терморезисторов принципиальной задачей является выбор оптимальной математической модели для преобразования электрического сопротивления датчика в температуру, обеспечивающей необходимую точность.

В процессе разработки математической модели учитывали следующие граничные условия: диапазон рабочих

температур; максимально допустимую погрешность; минимальное количество вычислительных операций, что особенно актуально для расчета температуры в многоканальных термометрах с целью снижения времени определения температуры. Проведенные исследования и моделирование функциональных характеристик тонкопленочных платиновых терморезисторов позволили определить оптимальную математическую модель в виде рациональной дроби для реализации в ИТБ, обеспечивающую необходимую точность расчета в диапазоне рабочих температур 0—100 °С:

$$t = (W + a)/(bW + c), \quad (1)$$

где W — относительное сопротивление, $W = R_t/R_0$; a, b, c — некоторые постоянные коэффициенты.

Коэффициенты из (1) находят путем обработки данных стандартных таблиц значений $R = f(t)$ для платины по методу наименьших квадратов [4]. Необходимо также отметить, что математическая модель должна обеспечивать погрешность расчета температуры, как минимум в три — пять раз меньшую, чем допустимая абсолютная погрешность измерений температуры термометрами, в которых реализована данная модель. Это важно потому, что вклад в погрешность измерений вносят еще инструментальная и методическая погрешности. Такие требования к точности ИТБ не могут быть удовлетворены без проведения индивидуальной калибровки и, соответственно, корректировки математической модели. Минимальное количество калибровочных точек зависит от того, каким способом будет проводиться индивидуальная корректировка математической модели. На практике используют два различных метода: индивидуальный расчет всех коэффициентов в математической модели или введение

функции отклонения. В разработанной методике калибровки предложена линейная функция отклонения

$$W_r = kW(t) + m,$$

где k, m — калибровочные коэффициенты; $W(t)$ — относительное сопротивление калибруемого датчика. Очевидно, что в этом случае для нахождения коэффициентов функции отклонения необходимо использовать две калибровочные точки.

Проведенное при помощи (1) математическое моделирование температурной зависимости тонкопленочных платиновых терморезисторов с $W = 1,385$ показало, что данная модель обеспечивает погрешность расчета температуры $\pm 0,01$ °С в интервале 0—100 °С с увеличением до $\pm 0,06$ °С на границах интервала температур от -60 до +200 °С. Математическая модель (1) реализована в измерителях температуры с беспроводным интерфейсом ИТБ-1, имеющих абсолютную погрешность измерений $\pm 0,05$ °С в интервале температур 5—95 °С (Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.32.010.A № 43483). Данный интервал определяется температурами теплоносителя в системах отопления.

Для исследования и калибровки беспроводных СИ температуры разработан автоматизированный измерительный комплекс, структурная схема которого представлена на рис. 1. В состав комплекса входит жидкостный термостат Lauda PROLINE RP 3530 с установленной в нем технологической оснасткой, содержащей 56 ячеек для калибровки в едином цикле до 56 ИТБ. Для обеспечения изотермических условий калибровки оснастка изготовлена из медной плиты толщиной 25 мм. В центре оснастки установлен эталонный платиновый термометр сопротивления ПТСВ-2К-1, подключенный к высокоточному термометру DTI-1000, по показаниям которого калибруются ИТБ. Контроль профиля температуры осуществляется при помощи четырех эталонных платиновых термометров сопротивления ПТСВ-2К-1, установленных по периметру оснастки. Измерение профиля температуры проводится с использованием высокоточных электронных термометров ТЭН-4 или МИТ 8.10. Исследования показали, что разница температур по периметру оснастки не превышает 0,02 °С.

Проверка эталонных термометров сопротивления осуществляется на оборудовании, реализующем реперные точки МТШ-90 (тройную точку воды, точку плавления Ga и точку затвердевания In), по разработанным авторами данной статьи методикам.

В состав комплекса входит локальный ретранслятор, предназначенный для управления режимами работы ИТБ и приема и передачи информации по радиоканалу от радиопередатчиков. Передаваемая информация содержит массив данных по измеренной ИТБ температуре, которые передаются в соответствии с протоколом обмена. В локальном ретрансляторе происходит накопление, сохранение и передача данных по каналу RS-232 на компьютер, где осуществляется расчет и индикация измеренных параметров [2].

Калибруют ИТБ в последовательности, представленной на диаграмме рис. 2. При помощи программного обеспечения устанавливают первую калибровочную температуру 5 °С. Термометром DTI-1000 контролируют температуру теплоносителя, стабилизация которой происходит за время 50—70 мин. Факт стабилизации — температура теплоноси-

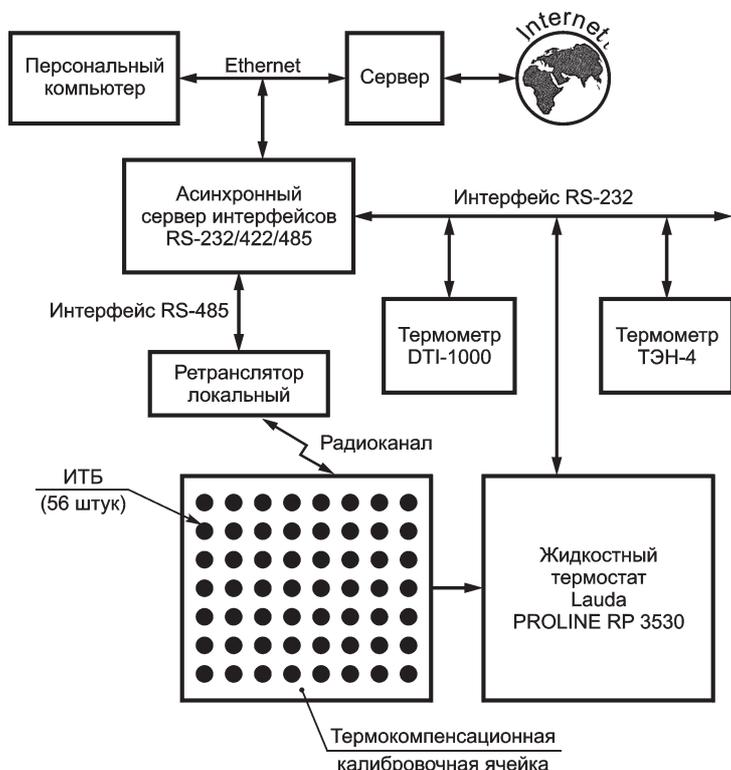


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса для автоматической калибровки беспроводных СИ температуры

теля не изменяется более чем на 0,02 °С в течение не менее 4 мин. После выхода на режим работы проводится инициализация ИТБ. Калибровка осуществляется автоматически с применением разработанного для этих целей программного обеспечения (Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ № 2011610219 и № 2011610220). Определяют расхождения данных по температуре между каждым ИТБ и эталонным термометром. Затем автоматически корректируются коэффициенты в математической модели каждого ИТБ. После калибровки при данной температуре в течение 8 мин определяют стабильность показаний.

Далее устанавливают температуру 85 °С и калибруют ИТБ при этой температуре. Таким образом окончательно корректируется математическая модель каждого ИТБ и заканчивается процесс калибровки.

Затем устанавливают контрольную температуру 45 °С и сличают результат измерений температуры ИТБ и DTI-1000. Если показания ИТБ при калибровочных температурах лежат в пределах допустимой абсолютной погрешности измерений (согласно требованиям технических условий не более $\pm 0,05$ °С), то считают, что он откалиброван. В случае превышения допустимой погрешности происходит отбраковка ИТБ. В процессе калибровки данные постоянно записываются в таблицу, которая после завершения калибровки сохраняется в электронном документе (файле), совместимом с Microsoft Excel.

Во время инициализации ИТБ каждому измерителю температуры присваивается уникальный порядковый номер и программно задается время опроса 4 мин. Полученные показания анализируются и выводятся на дисплей компьютера. В случае отказа одного из ИТБ проводится его деинициализация. Также в процессе калибровки можно поочередно идентифицировать каждый ИТБ, программно опрашивая и отображая на дисплее компьютера измеренную им температуру и расхождение между ней и температурой теплоносителя, определенной эталонным термометром.

Проведенные исследования по калибровке опытной партии ИТБ в количестве 2000 образцов показали, что абсолютная погрешность измерений температуры не превышает $\pm 0,05$ °С. Кроме того, было установлено, что контрольная операция по сличению температур ИТБ и эталонного термометра при температуре 45 °С избыточна, так как все ИТБ, прошедшие успешную калибровку при температурах 5 и 85 °С, соответствуют требованиям технических условий. Таким образом, при серийном выпуске ИТБ эта операция была упразднена, что значительно сократило время калибровки. Для увеличения производительности калибровки при производстве ИТБ в состав аппаратно-программного комплекса включены шесть термостатов Lauda PROLINE RP 3530.

Проведем расчет суммарной погрешности калибровки СИ температуры ИТБ-1 с учетом рекомендаций [5]. По результатам анализа калибровки были определены следующие источники погрешности.

Случайные эффекты при измерении температуры, или неопределенность по типу А, рассчитываются из уравнения

$$u_A = S/C, \quad (2)$$

где S — стандартное отклонение; C — коэффициент влияния.

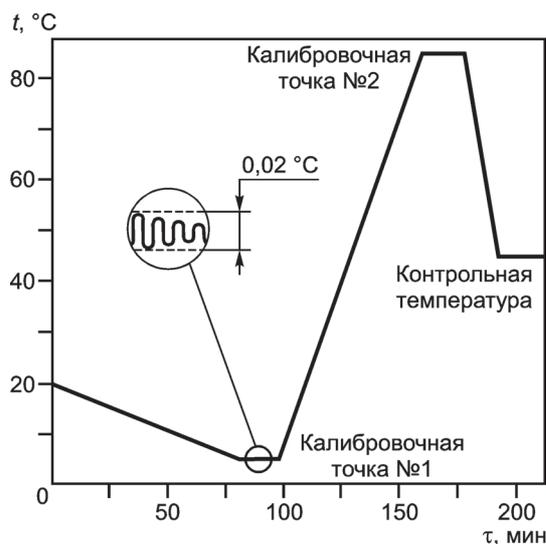


Рис. 2. Диаграмма процесса калибровки ИТБ

Температура, рассчитанная в процессе преобразования сигнала датчика, определяется как

$$t = (N + a)/(bN + c), \quad (3)$$

где N — цифровой код на выходе 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), принимает значения от 0 до 65535 в диапазоне температур 5—95 °С, соответствующий изменению относительного сопротивления W ; a, b, c — постоянные коэффициенты, $a = -1277,4$; $b = -2,123 \cdot 10^{-4}$; $c = 619,87$.

Коэффициент влияния C рассчитывается как dN/dt и в соответствии с (3) будет иметь следующий вид:

$$C = (c - ab)/(bt - 1)^2. \quad (4)$$

Стандартное отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N_{cp})^2}, \quad (5)$$

где n — количество измерений при заданной калибровочной температуре, $n = 20$; N_i — число АЦП при i -м измерении температуры; N_{cp} — среднее число АЦП за n измерений.

С учетом полученных экспериментальных данных и уравнений (2), (4), (5) найдем суммарную неопределенность по типу А $u_A = 0,008$ °С.

Вклад неоднородности температурного профиля технологической оснастки в суммарную погрешность (неопределенность по типу В) составляет $u_{B1} = \Delta t_{max} / 2 = 0,01$ °С, так как Δt_{max} — максимальная разница температур по периметру технологической оснастки, равная 0,02 °С.

Вычислим неопределенность, вносимую термометром сопротивления эталонного типа ПТСВ-2К-1:

$$u_{B2} = \Delta_t / \sqrt{3} = 0,006 \text{ °С},$$

где Δ_t — предел допускаемой погрешности сопротивления эталонного типа ПТСВ-2К-1, равный 0,01 °С.

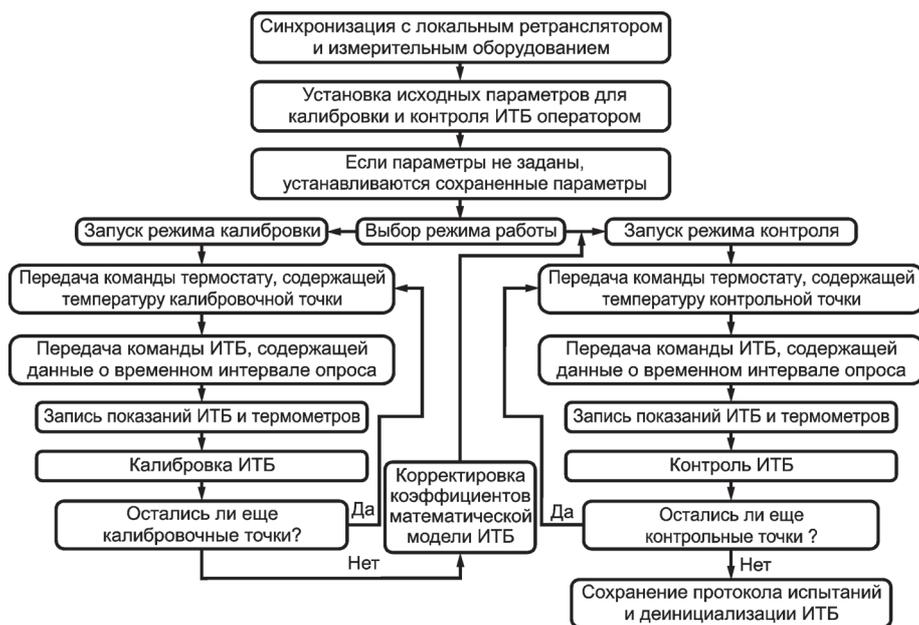


Рис. 3. Блок-схема алгоритма программного обеспечения для исследования и калибровки беспроводных СИ температуры

Неопределенность, вносимая вторичным преобразователем — измерительным блоком DTI-1000, при равномерном законе распределения

$$u_{B3} = \Delta_R / \sqrt{3} = 0,003 \text{ }^\circ\text{C},$$

где Δ_R — предел допускаемой погрешности измерительного блока DTI-1000, равный $\pm 0,005 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, суммарная погрешность калибровки СИ температуры ИТБ-1 составит

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} = 0,014 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Расширенную неопределенность измерения температуры ИТБ рассчитаем в соответствии с рекомендациями [5]:

$$u_p = 1,1 \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (6)$$

Неопределенность по типу А определяется с учетом статистических данных калибровки ИТБ согласно уравнению

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2},$$

где n — количество измерений.

Для расчета u_A использовали данные последовательных измерений температуры для $n = 60$, проведенных при помощи десяти ИТБ в термостате, и получили следующее наибольшее значение распределения: $u_A = 0,007 \text{ }^\circ\text{C}$.

Неопределенность по типу В определяем, учитывая предел допускаемой погрешности ИТБ $\Delta_{ИТБ} = 0,05$ (равномерное распределение):

$$u_B = \Delta_{ИТБ} / \sqrt{3} = 0,029 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Тогда в соответствии с (6) расширенная неопределенность ИТБ будет равна $0,033 \text{ }^\circ\text{C}$.

Аппаратно-программные средства для автоматизированного измерительного комплекса. Для автоматизации процесса калибровки разработано программное обеспечение (рис. 3), которое базируется на системной интеграции технических и программных средств и обеспечивает возможность удаленного управления процессом измерений через Интернет.

Разработанное программное обеспечение позволяет: выбирать и задавать порты ввода-вывода, к которым подключено оборудование; отображать, устанавливать и контролировать заданные параметры работы оборудования; инициализировать и деинициализировать ИТБ; анализировать данные по измеренной ИТБ температуре и сравнивать их с данными эталонного термометра; рассчитывать, отображать и изменять коэффициенты в математической модели; проводить и анализировать измерения в контрольных точках; определять погрешность СИ; отображать в режиме реального времени параметры ИТБ при помощи графического интерфейса; отбраковывать не прошедшие калибровку ИТБ по значениям погрешности СИ.

Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме проводить исследования, сохранять в памяти и графически отображать полученные результаты.

Таким образом, в процессе исследований разработаны автоматизированный измерительный комплекс и методика калибровки ИТБ, предназначенных для дистанционного мониторинга температуры в системах теплоснабжения [2], а также при производстве, переработке, хранении и транспортировке различной продукции. Разработанные аппаратно-программные средства дают возможность калибровать и исследовать СИ температуры в автоматическом режиме с накоплением и передачей информации по радиоканалу.

Литература

1. Штерн Ю. И. Високоточные электронные средства измерения температуры / Кибернетика и высокие технологии XXI века: Сб. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2010. Т. 1. С. 420—432.
2. Штерн Ю. И., Кожевников Я. С., Рыков В. М. Интеллектуальная система контроля индивидуального потребления энергоресурсов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 12. С. 52—58.
3. Preston-Thomas H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) // Metrologia. 1990. V. 27. P. 3—10.
4. ГОСТ Р 8.625—2006. ГСИ. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний.
5. ГОСТ 8.461—2009. ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки.

Дата принятия 12.02.2013 г.