МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭКВИВАЛЕНТОВ ОБРАЗЦОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

В.А. Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

Предлагается метод построения измерителя температуры на основе множества резисторных датчиков с разными градуировочными характеристиками и осреднения по множеству измерений. Этот метод распространяется и на эквивалент образцового резистора.

Широко используются измерители температуры с использованием терморезисторных датчиков, сопротивление которых функционально зависит от температуры. Обычно для измерения температуры в одной точке используется один датчик температуры и один вторичный измерительный преобразователь с последующим включением аналого-цифрового преобразователя. Преобразуемой электрической величиной при этом является электрическое сопротивление, а погрешность измерения температуры определяется точностью преобразования температуры в сопротивление (датчика) и точностью преобразования сопротивления в цифру (вторичного измерительного преобразования и АЦП). Точность датчика ограничивается точностью определения и стабильностью единичной градуировочной характеристики $\theta(R)$, а точность преобразования сопротивления в цифру ограничивается точностью определения и стабильностью сопротивлений образцовых резисторов, которые обычно используются для замещения датчика при калибровке АЦП и разрешением (уровнем собственных шумов) и погрешностью линейности АЦП.

Современные АЦП обеспечивают относительное разрешение и погрешность линейности в рабочем диапазоне на уровне 10^{-7} и не являются узким местом в борьбе за повышение точности. Основными ограничениями в повышении точности остаются точность датчиков и образцовых резисторов. Принципиальным ограничением точности единичной градуировочной характеристики датчика $\theta(R)$ является погрешность задания реперных точек температурной шкалы, которая характерна для достигнутого уровня науки и техники, и для современных эталонов температуры составляет не менее ±0,002 °С. Её снижение было бы возможно при реализации статистического эталона температуры.

Другим ограничением точности датчика является погрешность расчета и стабильность во времени коэффициентов единичной градуировочной характеристики. Хотя всегда имеется возможность аппроксимации градуировочной характеристики полиномами высокой степени для достижения погрешности аппроксимации на уровне погрешности экспериментальных данных, но остается погрешность из-за нестабильности коэффициентов градуировочной характеристики, обусловленная достигнутым уровнем технологии изготовления датчиков и влиянием на датчик внешних факторов среды.

Дальнейшее повышение точности градуировочной характеристики было бы возможно за счет осреднения по множеству градуировок.

В работе ставится задача создания принципа построения нового точного измерителя температуры на базе нескольких резисторных датчиков, в котором осуществляется подавление случайных погрешностей градуировок измерителя и одновременно в котором обеспечивается возможность точного определения при изменении внешней температуры сопротивления, эквивалентного сопротивлению образцового резистора.

Общим результатом является повышение точности измерений.

Поставленная задача решается тем, что измеритель температуры или эквивалент образцового резистора содержит цепочку 1 из размещенных локально на общей теплопроводящей подложке и последовательно-подключенных резисторов $R_1 - R_n$ с известными и разными зависимостями их сопротивлений от температуры, при этом один внешний вывод цепочки подключен к выходу генератора тока 2, другой внешний вывод заземлен, а внутренние выводы цепочки параллельно подключены к входам группового аналого-цифрового преобразователя 3, выход которого соединен с входом микропроцессора 4, выход которого является выходом устройства (рисунок 1).

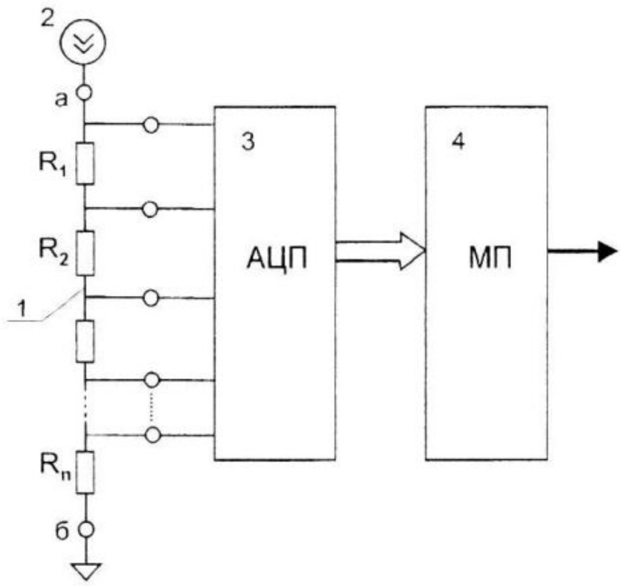

Рисунок 1 – Структурная схема измерителя температуры или эквивалента образцового резистора

В состав аналого-цифрового преобразователя может входить многоканальное устройство выборки и хранения, у которого входы подключены к внутренним выводам цепочки из резисторов, а выход подключен к входу коммутатора, выход которого является входом одноканального аналого-цифрового преобразователя.

Сущность метода заключается в следующем. Для измерения температуры используют цепочку из резисторных датчиков температуры. При подаче тока $I(t)$ на цепочку резисторов на каждом из них будет иметь место напряжение $U_i(t) = R_i(t)I(t)$. Отношение напряжений на двух резисторах будет равно отношению их сопротивлений $R_i(t)$ и $R_j(t)$

$$\frac{U_i(t)}{U_j(t)} = \frac{R_i(t)I(t)}{R_j(t)I(t)} = \frac{R_i(t)}{R_j(t)} = K_{ij}(t). \quad (1)$$

Поскольку сопротивления зависят от текущей температуры по функциям $\varphi_i[\theta(t)]$, то

$$\frac{R_i(t)}{R_j(t)} = \frac{\varphi_i[\theta_{ij}(t)]}{\varphi_j[\theta_{ij}(t)]} = K_{ij}(t) = \frac{U_i(t)}{U_j(t)}, \quad (2)$$

где $\theta_{ij}(t)$ – общая температура резисторов i и j, разная для разных N пар ij из-за погрешностей определения $\varphi_i(\theta)$.

Текущее значение общей температуры $\theta(t)$ резисторов определяют по формуле

$$\theta(t) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i=1,n \\ j=1,n \\ i \neq j}}^{N} \theta_{ij}(t), \quad (3)$$

где

$$N = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (4)$$

Например, при линейной температурной зависимости сопротивления $\varphi_i(\theta)$ получим

$$R_i(t) = R_{i0} + \alpha_i R_{i0} \theta_{ij}(t);$$
$$R_j(t) = R_{j0} + \alpha_j R_{j0} \theta_{ij}(t), \quad (5)$$

где R_{i0} и R_{j0} – сопротивления резисторов при температуре, принятой за нулевую; α_i и α_j – коэффициенты термочувствительности.

Выражение (2) будет иметь вид

$$\frac{R_{i0} + \alpha_i\, R_{i0}\, \theta_{ij}(t)}{R_{j0} + \alpha_j\, R_{j0}\, \theta_{ij}(t)} = K_{ij}(t). \qquad (6)$$

Решение последнего уравнения относительно $\theta_{ij}(t)$ имеет вид

$$\theta_{ij}(t) = \frac{R_{i0} - R_{j0}\, K_{ij}(t)}{\alpha_j\, R_{j0}\, K_{ij}(t) - \alpha_i\, R_{i0}} \, . \qquad (7)$$

Общую температуру $\theta(t)$ определяют осреднением всех температур $\theta_{ij}(t)$ по выражению (3).

Поскольку при этом математические ожидания и дисперсии величин суммируются, среднеквадратическая погрешность результата измерения температуры из-за неточности датчиков и градуировки уменьшается в $\sqrt{N}$ раз.

Таким образом погрешность измерения температуры, ограниченная погрешностью градуировки $\pm 0{,}002$ °С при измерении одним датчиком, уменьшается в $\sqrt{N}$ раз или примерно $\frac{n}{\sqrt{2}}$ раз. Современные каналы измерения температуры имеют уровень собственных шумов порядка 0,00001 °С, поэтому потенциал для снижения погрешности измерения температуры составляет около 200 и целесообразно строить измерители с n до 280.

Сопротивление i-го резистора определяют по формуле

$$R_i(t) = \varphi_i[\theta(t)] \, . \qquad (8)$$

Текущее значение сопротивления $R_{обр.}(t)$, эквивалентного сопротивлению образцового резистора, определяют по формуле

$$R_{обр}(t) = \sum_{i=1}^{n} R_i(t) = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i\, [\theta(t)] \, . \qquad (9)$$

Например, для линейных $\varphi_i(\theta)$

$$R_i(t) = R_{i0} + \alpha_i\, R_{i0}\, \theta(t), \qquad (10)$$

$$R_{обр}(t) = \sum_{i=1}^{n} R_{i0} + \theta(t) \sum_{i=1}^{n} \alpha_i\, R_{i0} \, . \qquad (11)$$

При этом относительная погрешность определения сопротивления, эквивалентного сопротивлению образцового резистора, по отношению к погрешности определения сопротивления одного резистора с коррекцией по температуре уменьшается в $\sqrt{n}$ раз и реализуется статистическая образцовая мера сопротивления.

Для вычислений необходимо знание параметров R_{i0} и α_i, которое обеспечивается градуировкой. Например, для линейных термопреобразователей достаточно задать две образцовые температуры θ_{01} и θ_{02}.

Тогда можем записать для каждого i-го элемента

$$R_{i1} = R_{i0}(1 + \alpha_i \theta_{01}) \equiv U_{i1},$$

$$R_{i2} = R_{i0}(1 + \alpha_i \theta_{02}) \equiv U_{i2},$$

$$\frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{1 + \alpha_i \theta_{01}}{1 + \alpha_i \theta_{02}} = k_{i,12}, \qquad (12)$$

$$\alpha_i = \frac{1 - k_{i,12}}{\theta_{01} - k_{i,12}\theta_{02}}, \qquad (13)$$

$$R_{i0} = \frac{1}{2}\left(\frac{\theta_{01}}{1 + \alpha_i \theta_{01}} + \frac{\theta_{02}}{1 + \alpha_i \theta_{02}}\right). \qquad (14)$$

Для нахождения R_{i0} и α_i с большей точностью за счет осреднения по множеству градуировок можно воспользоваться большим числом образцовых температур θ_{0S} (S > 2) и методом наименьших квадратов, который приводит к системе условных уравнений и ее решению, например, так, как это показано в [2, С. 569].

Аналогичные процедуры градуировки применяются и для нахождения параметров градуировочных характеристик образцовых сопротивлений, например, для линейных термозависимостей – параметров R_{0S} и α_{0S}.

В общем случае зависимость сопротивлений от температуры может быть представлена степенным полиномом вида

$$\varphi_i[\theta(t)] = \sum_{s=0}^{m} a_s \theta^s(t). \quad (15)$$

В этих случаях выражение (6) имеет вид

$$K_{ij}(t) = \frac{\sum_{s=0}^{m} a_{is}\,\theta_{ij}^s(t)}{\sum_{s=0}^{m} a_{js}\,\theta_{ij}^s(t)}. \quad (16)$$

Это выражение приводится к уравнению m-ой степени

$$\left[K_{ij}(t)a_{jm} - a_{im}\right]\theta_{ij}^m(t) + \left[K_{ij}(t)a_{j(m-1)} - a_{i(m-1)}\right]\theta_{ij}^{m-1}(t) + \cdots \left[K_{ij}(t)a_{j0} - a_{i0}\right] = 0. \quad (17)$$

При нахождении искомого корня уравнения (17) можно учитывать тот факт, что реальная температура $\theta_{ij}(t)$ лежит в априорно известном достаточно узком диапазоне, поэтому другие корни уравнения можно отбрасывать.

В другом, достаточно распространенном случае, например, для термисторов, температурная зависимость сопротивления имеет вид

$$R_i(t) = A_i\, e^{-\frac{\theta(t)}{B_i}}, \quad (18)$$

где A_i и B_i – константы.

В этом случае выражение (6) можно записать так

$$K_{ij}(t) = \frac{A_i}{A_j}\, e^{\theta_{ij}\left(\frac{1}{B_j} - \frac{1}{B_i}\right)}. \quad (19)$$

Для температуры резисторов получим

$$\theta_{ij}(t) = \frac{B_i B_j}{B_i - B_j} \ln\left[\frac{A_j}{A_i} K_{ij}(t)\right]. \quad (20)$$

Общую температуру $\theta(t)$ определяют по формуле (3).

Сопротивление эквивалента образцового резистора определяется по формуле

$$R_{\text{обр.}}(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i\, e^{-\frac{\theta(t)}{B_i}}. \quad (21)$$

Для нахождения коэффициентов A_i и B_i выражения (18) при градуировке по двум образцовым температурам θ_{01} и θ_{02} справедливы выражения

$$B_i = \frac{\theta_{01} + \theta_{02}}{\ln(R_{i2} / R_{i1})}, \quad (22)$$

$$A_i = \frac{R_{i1} + R_{i2}}{e^{-\frac{\theta_{01}}{B_i}} + e^{-\frac{\theta_{02}}{B_i}}}, \quad (23)$$

где R_{i1} и R_{i2} – значение сопротивлений датчиков при заданных температурах θ_{01} и θ_{02}.

Для эквивалента образцового резистора могут использоваться образцовые резисторы со слабой температурной зависимостью, линейной или более сложной. От этого будет зависеть сложность вычислений, которая не является существенным ограничением для современных микропроцессоров.

Погрешность определения значения сопротивления резистора снижается пропорционально относительной погрешности определения температуры резистора в рабочем диапазоне температур.

Поскольку в качестве резисторов могут быть взяты стандартные образцовые резисторы с очень малым температурным коэффициентом сопротивления (например 10^{-6}), то при относительной погрешности измерения температуры 10 % точность образцового резистора будет 10^{-7}.

Погрешность определения сопротивления эквивалента образцового резистора дополнительно уменьшается в $\sqrt{n}$ раз.

Это позволяет использовать в качестве образцовых более дешевые резисторы, с большим коэффициентом температурной зависимости α_{0i} и меньшей точностью технологической подгонки R_{0i} под заданный номинал.

При использовании образцового резистора в конкретной схеме вместо традиционно используемого одного резистора с двумя выводами предложен элемент с $(n+1)$ выводами, при этом роль микроконтроллера с АЦП и МП может выполнять внешняя часть устройства.

Если измеритель температуры и эквивалент образцового резистора использовать совмещенно, то образцовый резистор используется для градуировки АЦП, а результат измерения температуры – для внесения поправки на температурный дрейф образцового резистора.

Этот процесс может выполняться итеративно. В итоге для линейных совмещенных термопреобразователей можем записать

$$\varepsilon_\theta \approx \frac{\alpha_0 \Delta\theta_0}{\alpha}, \qquad (24)$$

где ε_θ – разрешение по измеряемой температуре; $\Delta\theta_0$ – неопределенность температуры образцового резистора; α_0 и α – температурные коэффициенты образцового резистора и датчика температуры.

Устройство на рис. 1 работает следующим образом: датчики (резисторы) цепочки 1 принимают общую температуру $\theta(t)$, которая по известной с погрешностью индивидуальной функции преобразования $\varphi_i(\theta)$ преобразуется в сопротивление датчика (резистора) R_i. Напряжения $U_i\left(i=\overline{1,n}\right)$, возникающие на датчиках (резисторах) при прохождении рабочего тока, снимаются с них и преобразуются в цифровую форму групповым АЦП 3. Желательно съем осуществлять одновременно, а преобразование выполнять одним АЦП. Это может выполнять АЦП с многоканальным устройством выборки-хранения на входе и коммутатором. Микропроцессор 4, используя коды напряжений U_i, выполняет далее все приведенные выше вычисления, необходимые для определения $\theta(t)$ и $R_{\text{обр}}$.

Заключение. Предложен метод построения устройства температуры или эквивалента образцового резистора из n резисторов (датчиков температуры или образцовых), позволяющий примерно в $\frac{n}{\sqrt{2}}$ раз повысить точность измерения температуры или в $\sqrt{n}$ – образцового резистора.

Литература

1. Патент Украины 85243 Измеритель температуры или сопротивления эквивалентного сопротивлению образцового резистора и способ, реализованный в нем. Авторы: В.А. Гайский, П.В. Гайский. Опубл. 12.01.2009. Бюл. № 1.

2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: изд-во "Наука", 1964. – 608 с.